

# ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2022, Том 27, № 3

Основан в 1996 г.  
Выходит 4 раза в год

## Учредители:

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

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

*Главный редактор*

**Л.Н. Владимиров**

Член-корреспондент РАН

*Заместители главного редактора:*

**В. Ю. Фридовский**, член-корр. РАН

**Ю.М. Григорьев**, д-р физ.-мат. наук

*Ответственный секретарь*

**З.А. Корнилова**

*Адрес редакции:*

677000, г. Якутск, пр. Ленина, 33  
nras2018@mail.ru

<http://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), 2022  
© ФИЦ «Якутский научный центр», 2022  
© Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова, 2022  
© Министерство образования и науки РС (Я), 2022

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

# ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 «Nauka i Obrazovanie»)

Scientific journal

2022, Vol. 27, No. 3

Founded in 1996  
4 issues per year

## Founders:

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia),  
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, 677000, Russia  
nras2018@mail.ru

<http://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 (RSCI)

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2022  
© Research Centre «The Yakut Scientific Centre of SB RAS», 2022  
© M.K. Ammosov North-Eastern  
Federal University, 2022  
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2022

#### Редакционный совет:

Владимиров Л.Н. – чл.-корр. РАН, АН РС (Я); 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.з.н., Минобрнауки РС (Я)

#### Редакционная коллегия:

##### Науки о Земле

Горячев Н.А. – чл.-корр. РАН, СВКНИИ ДВО РАН, Магадан, Россия  
Григорьев М.Н. – д.з.н., ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия  
Железняк М.Н. – чл.-корр. РАН, ИМЗ СО РАН, Якутск, Россия  
Колодезников И.И. – д.з.-м.н., проф., АН РС (Я), Якутск, Россия  
Кутыгин Р.В. – к.з.-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.з.-м.н., ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия  
Фридовский В.Ю. – чл.-корр. РАН, ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия  
Шепелев В.В. – д.з.-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, AS RS(Ya), AS RS(Ya); 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 – Corresponding Member, RAS, Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia  
M.N. Grigoriev – Dr. Sci. (Geogr.), Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia  
M.N. Zhelezniak – Corresponding Member, RAS, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia  
I.I. Kolodeznikov – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., AS RS(Ya), Yakutsk, Russia  
R.V. Kutugin – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia  
A.I. Matveev – Dr. Sci. (Eng.), Chersky Inst. of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia  
N.P. Pokhilenko – Academician, RAS, V.S. Sobolev Inst. of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia  
V.E. Romanovsky – Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, Fairbanks, USA  
A.V. Tolstov – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia  
V.Yu. Fridovsky – Corresponding Member, RAS, Prof., Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia  
V.V. Shepelev – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia  
H.-V. Hubberten – Dr., Prof., Alfred Wegener Inst. for Polar and Marine Research, Potsdam Research Unit, Potsdam, Germany  
V.L. Yakovlev – Corresponding Member, RAS, Inst. of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia

##### 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

### Науки о Земле

#### **Общая и региональная геология, петрология и вулканология**

- Овчинников И.М., Толстов А.В.* Новые возможности обработки геолого-геофизической информации на примере Сюльдюкарского кимберлитового поля (Якутия) ..... 335
- Иванов А.И., Иванов М.С., Журавлев А.И.* Петро- и геохимический состав мезозойских магматических пород массива Таежный (Южная Якутия, Алданский щит, Эвотинский золотоносный район) ..... 346
- Яковлев В.Л.* О необходимости разработки Программы комплексного освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия) ..... 363

#### **Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение**

- Максимов Г.Т., Григорьев М.Н., Большианов Д.Ю.* Формирование и распространение многолетней мерзлоты и таликов под руслами проток в дельте р. Лена ..... 370
- Макаров В.Н., Седельникова А.Л.* Донные отложения озер г. Якутск как динамичная геокриолого-геохимическая система ..... 381

### Общая биология

#### **Биологические ресурсы**

- Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г., Охлопков И.М.* Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список. *Часть 1.* Насекомоядные, Рукокрылые, Зайцеобразные, Грызуны ..... 393
- Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П.* Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых насекомых (Orthoptera) в таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). *Часть 1.* Сообщества прямокрылых Тюнгилюнской террасы ..... 405
- Порядина Л.Н.* Дополнение к лишенобиоте бассейна реки Алазея (северо-восточная Якутия) ..... 415

#### **Экология**

- Василевская Н.В., Стружко В.В.* Онтогенетические реакции мезоструктуры листьев *Betula papa* L. на техногенный стресс в условиях Арктики ..... 423
- Кириллов А.Ф.* Чужеродные виды рыб в бассейне реки Лена ..... 434

### Материаловедение

- Марков А.Е., Копырин М.М., Дьяконов А.А., Туисов А.Г., Охлопкова А.А., Лазарева Н.Н.* Поверхностная обработка армирующих наполнителей смесью фенилметана и полибутиадена для повышения адгезии с эластомером ..... 439
- Попов С.Н., Буренина О.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е.* Перспективы применения природного сырья для строительства временных сооружений в северных и арктических условиях ..... 450

*Григорьев Ю.М., Шарин Е.П., Муксунов Н.Я.* Электронные свойства вертикально уложенной гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> ..... 459

Даты, события

«Геолог, учитель, директор»(к 90-летию со дня рождения Б. В. Олейникова) ..... 466

## CONTENTS

### Earth sciences

#### *General and regional geology, petrology and volcanology*

- Ovchinnikov I.M., Tolstov A.V.* New opportunities for processing geological and geophysical information: case study Syuldyukar kimberlite field (Yakutia)..... 335
- Ivanov A.I., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I.* Petro- and geochemical composition of mesozoic magmatic rocks of the Taezhny massif (South Yakutia, Evotinsky gold bearing region)..... 346
- Yakovlev V.L.* Integrated development program for mineral resource base in the Republic of Sakha (Yakutia)..... 363

#### *Engineering geology, permafrost and soil science*

- Maksimov G.T., Grigoriev M.N., Bolshiyarov D.Yu.* Formation and distribution of permafrost and taliks under channels of the Lena River Delta..... 370
- Makarov V.N., Sedelnikova A.L.* Bottom sediments of city lakes as a dynamic geocryological and geochemical system ..... 381

### General biology

#### *Biological resources*

- 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, and Rodents* ..... 393
- Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P.* Structure and spatial distribution of communities Orthoptera in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia). *Part 1. Communities of Orthoptera on the Tyungyulyun Terrace* ..... 405
- Poryadina L.N.* Addition to the lichenobiota of the Alazeya River basin (north-eastern Yakutia)..... 415

#### *Ecology*

- Vasilevskaya N.V., Struzhko V.V.* Ontogenetic reactions of the mesostructure of leaves of *Betula nana* L. on the technogenic stress in the Arctic..... 423
- Kirillov A.F.* Non-native freshwater fish species in the Lena River basin ..... 434

### Materials science

- Markov A.E., Kopyrin M.M., Dyakonov A.A., Tuisov A.G., Okhlopkova A.A., Lazareva N.N.* Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene to increase adhesion with elastomer ..... 439
- Popov S.N., Burenina O.N., Andreeva A.V., Savvinova M.E.* Prospects for the use of natural raw materials for temporary constructions in northern and arctic conditions ..... 450

*Grigor'ev Yu.M., Sharin E.P., Muksunov N.Ya.* Electronic properties of vertically stacked MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure..... 459

**Dates and events**

Geoscientist, teacher and director (B.V. Oleinikov's 90th Anniversary )..... 466

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

### *Общая и региональная геология, петрология и вулканология*

УДК

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-335-345>

### **Новые возможности обработки геолого-геофизической информации на примере Сюльдюкарского кимберлитового поля (Якутия)**

**И. М. Овчинников<sup>1</sup>, А. В. Толстов<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup>АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ \*tols61@mail.ru

#### **Аннотация**

Приведены новые данные о структурном контроле первого кимберлитового тела в Сюльдюкарском поле Ыгыаттинского алмазоносного района в Западной Якутии, полученные на основе нового подхода к обработке геолого-геофизических данных – трехмерной компьютерной интерполяции. Благодаря современным технологиям обработки первичных данных получены результаты, свидетельствующие о высокой эффективности данного подхода и позволяющие скорректировать поисковые работы в пределах нового кимберлитового поля, а также всего Ыгыаттинского алмазоносного района.

**Ключевые слова:** Сюльдюкарское кимберлитовое поле, трехмерное моделирование, ГИС, гамма-каротаж

**Для цитирования:** Овчинников И.М., Толстов А.В. Новые возможности обработки геолого-геофизической информации на примере Сюльдюкарского кимберлитового поля (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):335–345. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-335-345>

### **New opportunities for processing geological and geophysical information: case study Syuldyukar kimberlite field (Yakutia)**

**I. M. Ovchinnikov<sup>1</sup>, A. V. Tolstov<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup>AK ALROSA (PJSC), Mirny, Russian Federation

<sup>2</sup>Diamond and Precious Metals Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ \*tols61@mail.ru

#### **Abstract**

The article presents the data on the structural control of the first kimberlite body in the Syuldyukar field of the Ygyatta diamondiferous region in Western Yakutia. We applied a new approach to processing geological and geophysical data. Three-dimensional computer interpolation technology used for processing primary data indicate high efficiency of this approach and make it possible to correct prospecting within the new kimberlite field and the entire Ygyatta diamondiferous region.

**Keywords:** Syuldyukar kimberlite field, 3D modeling, well logging, gamma-ray logging

**For citation:** Ovchinnikov I.M., Tolstov A.V. New opportunities for processing geological and geophysical information: case study Syuldyukar kimberlite field (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):335–345. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-335-345>

#### **Введение**

В 2015 г. в прогнозируемом Сюльдюкарском кимберлитовом поле Ыгыаттинского алмазонос-

ного района геологами Ботуобинской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО) при заверке колонковым бурением геофизической аномалии Т-54, выделен-

ной геофизиком М.В. Покровским по результатам аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000, было вскрыто первое алмазоносное кимберлитовое тело [8, 9], которое подтвердило многочисленные прогнозы предшественников на коренную алмазоносность Ыгыаттинского алмазоносного района [3, 10, 16–19]. Однако в дальнейшем, несмотря на интенсивные поисковые работы вблизи выявленного первого кимберлитового тела, на протяжении последующих семи лет в пределах Сьюльдюкарского кимберлитового поля не было обнаружено новых тел, и это объясняется сложными геолого-поисковыми условиями (рис. 1). Территория нового поля в большей степени расположена в зоне развития вулканогенно-терригенных структур и комплексов, в пределах так называемого V геологического типа, при котором породы трапповой формации зачастую прорывают или бронируют подстилающие нижнепалеозойские толщи, в том числе вмещающие кимберлитовые тела. Это практически не позволяет использовать в полной мере традиционные площадные геофизические методы для выделения детальных аномалий ранга куст/тело [12–14, 16, 17]. Помимо этого, существует еще одна сложность, обусловленная тем, что в пределах Ыгыаттинского алмазоносного района основные концентрации индикаторных минералов кимберлита (ИМК) локализованы в каменноугольных отложениях ботубобинской (С2-3bt) и пермских осадках ахтарандинской (Р1ah) свит, которые обладают чрезвычайно низкой продуктивностью, связанной с особенностями их формирования в делювиально-пролювиальных условиях, не способствовавших накоплению алмазов и индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) [11, 12].

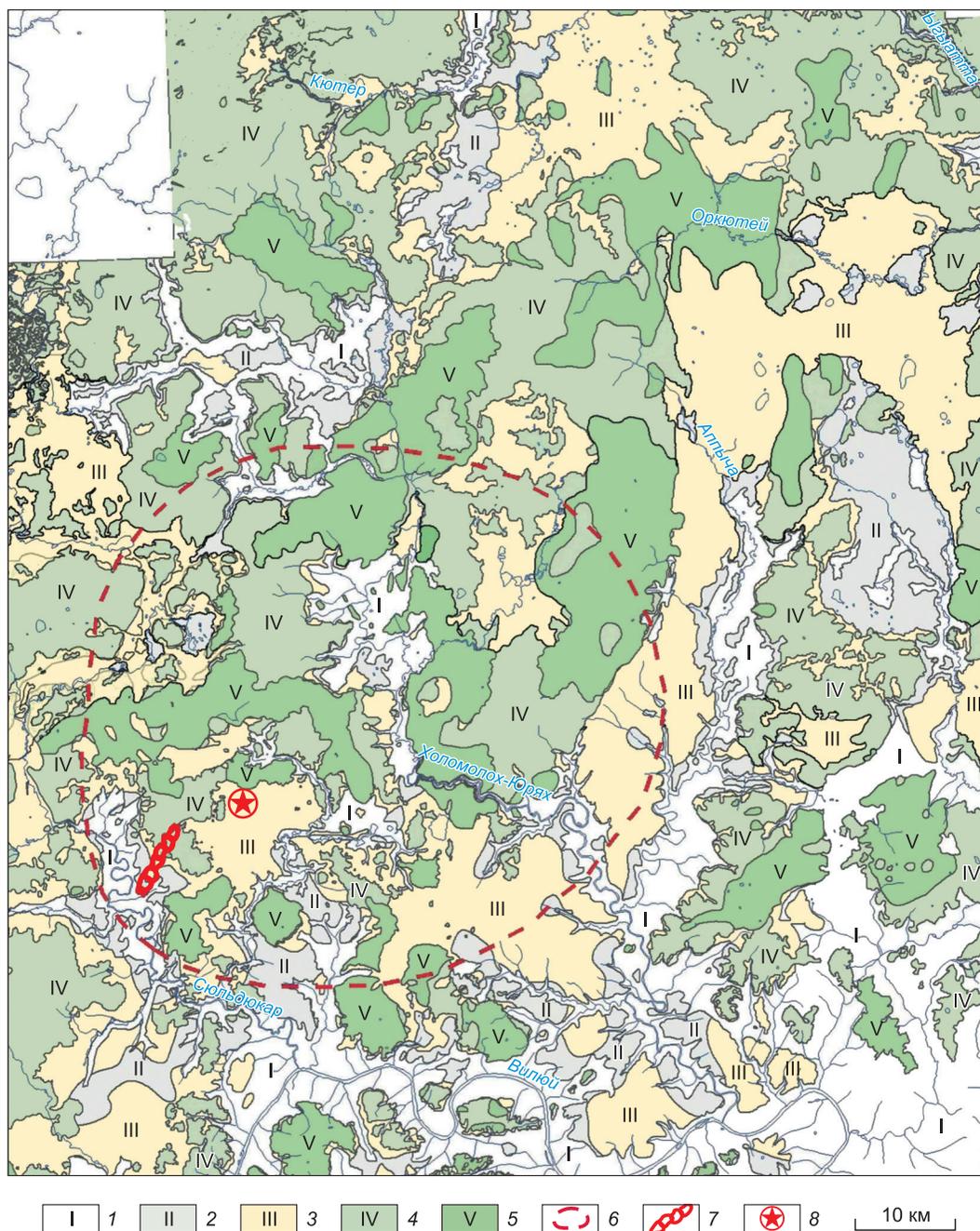
### Материалы

Оценочные работы в пределах нового кимберлитового тела, выявленного на геофизической аномалии Т-54-14, проводились путем бурения колонковых скважин по сети 40·20 м глубиной, в среднем 250 м, с применением эффективного комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), зарекомендовавшего себя в геологоразведочном комплексе АК «АЛРОСА», включающего спектральный гамма-каротаж (СГК), скважинную магнитометрию (СМ), каротаж магнитной восприимчивости (КМВ) и индукционный каротаж (ИК) [2]. Положительную роль при выявлении кимберлитового тела сыграло расположение его в пределах так называемого траппово-

го окна, которое позволило выделить магнитную аномалию, обусловленную кимберлитами.

После выявления первого трубчатого тела в новом районе было предпринято его интенсивное изучение, увенчавшееся значительными успехами, о которых можно судить по многочисленным публикациями. Этому способствовали интенсивные геолого-поисковые работы с помощью колонкового бурения, охватившие всю территорию поля и района [8, 9, 11, 12]. На территории Сьюльдюкарского кимберлитового поля с поисковой целью были пройдены скважины с различной густотой сети: от структурно-картировочных скважин по сети 2×2 км для уточнения структуры поля в пределах алмазоносного района до детальной треугольной сети через 250 м – для проведения радиоволновой геоинтроскопии непосредственно вблизи кимберлитового тела. Обширный объем геолого-геофизических данных, полученных при изучении нового кимберлитового тела, позволил, помимо осмысления результатов предшественников, провести дополнительный анализ полученной геолого-геофизической информации [2, 6–8, 10, 13–15, 20]. Новые возможности современных геоинформационных технологий оказали авторам при изучении незаменимую услугу, однако, несмотря на это, новых кимберлитовых объектов не было вскрыто.

Причиной низкой эффективности поисков на новом кимберлитовом поле можно считать применявшийся традиционный, во многом устаревший и не вполне соответствующий современным реалиям механизм обработки полученной информации, требующий кардинального пересмотра. Так, одной из поставленных задач при детальном изучении Сьюльдюкарского кимберлитового поля являлась разработка методики трехмерного моделирования кимберлитового узла в особо сложных геологических условиях. В трехмерную модель была интегрирована вся геолого-геофизическая, минералого-петрографическая и геохимическая информация, полученная предшественниками и новыми данными за семилетний период поисковых работ, включающая и учитывающая данные геофизических, геохимических исследований, выполненных за это время по Ыгыаттинскому алмазоносному району (рис. 2) [11, 12, 14, 17]. Построение итоговой модели Сьюльдюкарского кимберлитового поля проведено авторами в ГГИС Micromine (рис. 3).



**Рис. 1.** Схема Сюльдюкарского поля по условиям ведения поисков [4]. 1–4 – типы площадей: 1 – с маломощными аллювиальными и делювиальными отложениями (до 3 м); 2 – развития терригенных отложений мощностью до 20 м; 3 – с мощностью от 20 до 200 м; 4 – преимущественно развития пород трапповой формации, залегающих на терригенных отложениях каменноугольного, пермского и триасового возрастов; 5 – развития пород трапповой формации залегающих непосредственно на карбонатных породах нижнего палеозоя; 6 – прогнозные контуры Сюльдюкарского кимберлитового поля; 7 – ореол рассеяния ИМК «Хатырык»; 8 – кимберлитовое тело.

**Fig. 1.** Scheme of the Syuldyukar field according to the conditions of conducting searches [4]. 1–4 – types of areas: 1 – with thin alluvial and deluvial deposits (up to 3 m); 2 – development of terrigenous deposits up to 20 m thick; 3 – with a thickness of 20 to 200 m; 4 – predominantly the development of rocks of the trap formation occurring on terrigenous deposits of the Carboniferous, Permian and Triassic ages; 5 – development of rocks of the trap formation occurring directly on the carbonate rocks of the Lower Paleozoic; 6 – forecast contours of the Syuldyukar kimberlite field; 7 – halo scattering IMC «Khatyryk»; 8 – kimberlite body.

В связи с неравномерностью полученной поисковой сети буровых скважин, интерполяция данных ГИС зачастую нуждается в корректировке и обладает весьма низкой достоверностью.

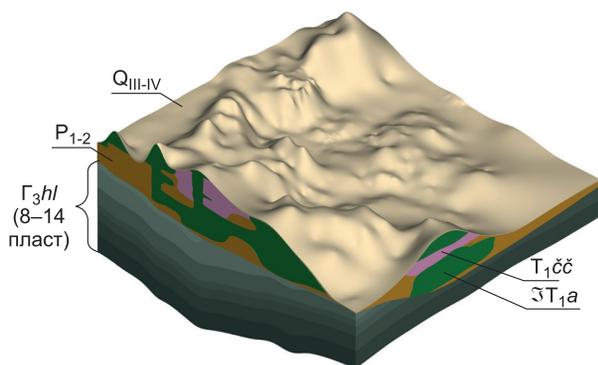


Рис. 2. Трехмерная каркасная модель Сюльдюкарского узла (вид модели в направлении на северо-восток).

Fig. 2. Three-dimensional wireframe model of the Syuldyukar node (northeast direction of the model).

Поэтому нами проведено построение и анализ детальной модели по ГИС непосредственно околорудного пространства кимберлитового тела. В качестве исходных данных для построения использована геолого-геофизическая информация по 27 поисково-оценочным скважинам по сети 40·20 м.

С целью выделения подсчетных блоков ранее геологической службой Виллюйской ГРЭ была построена трехмерная модель (каркас) Сюльдюкарского кимберлитового тела на основе данных документации оценочных скважин (см. рис. 3, а), для создания каркаса применена методика пого-

ризонтных срезов. Эта методика характеризуется своей простотой и для выделения подсчетных блоков в целом применима, однако в связи с частичным сглаживанием контуров рудного тела она не позволяет в полной мере учитывать тонкости строения кимберлитового тела сложной морфологии.

При исследовании околорудного пространства в пределах Средне-Мархинского и Ыгыатинского алмазоносных районов были использованы разработанные ранее Игнатовым П.А. принципиально новые для данного алмазоносного района методики, основанные на детальном геолого-геохимическом и структурно-тектоническом изучении вмещающих толщ и хорошо апробированные на других алмазоносных полях [5], позволяющие вполне уверенно прогнозировать возможное расположение новых кимберлитовых тел или отходящих от них апофизных жил на площади в ранге алмазоносного района и поля [4, 6]. Подобные же детальные геолого-геохимические исследования были выполнены нами и в пределах Сюльдюкарского поля. Результаты могут быть оценены весьма высоко [7].

### Методика

С развитием геоинформационных систем появилась возможность использования более сложных алгоритмов построения каркасов. В настоящий момент набирает обороты построение кар-

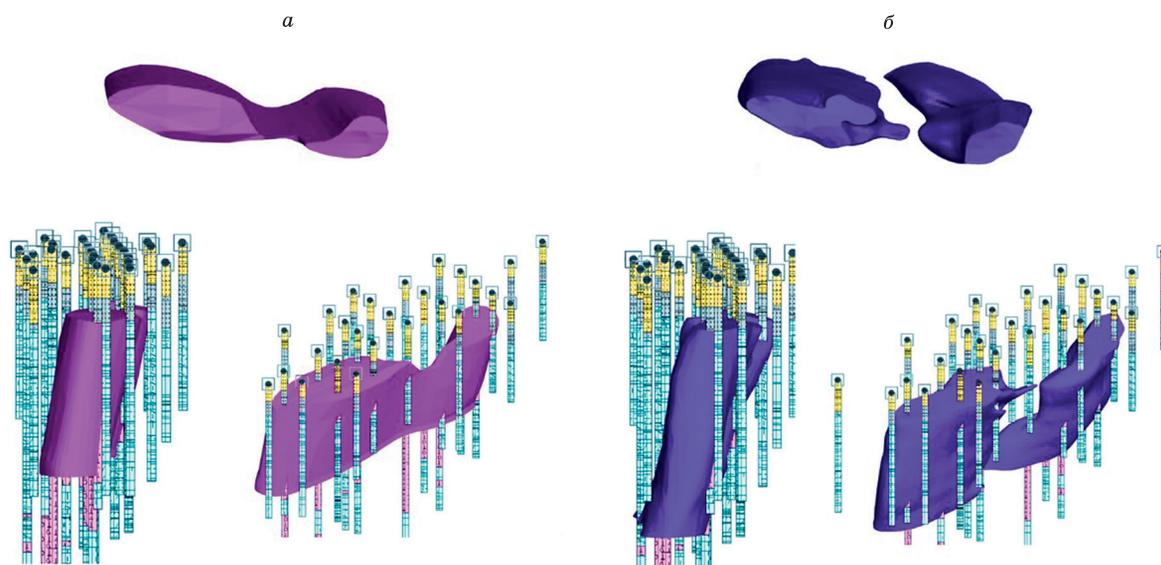


Рис. 3. Каркасы кимберлитового тела Т-54-14, построенные на основе геологической документации скважин (а – методом погоризонтных срезов; б – методом условного моделирования).

Fig. 3. Frameworks of the T-54-14 kimberlite body, constructed on the basis of geological documentation of wells (а – by horizontal sections method; б – by conditional modeling method).

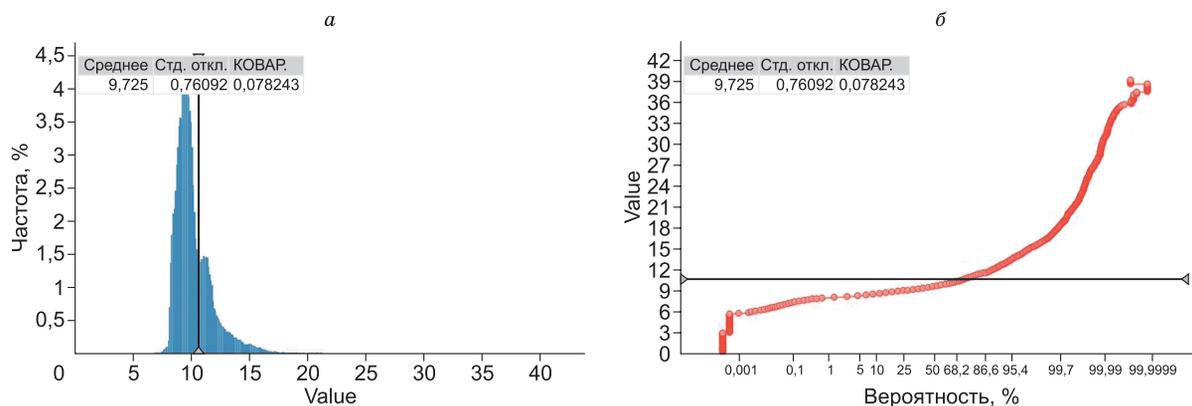


Рис. 4. Гистограмма (а) и график вероятности (б) распределения радиоактивности.

Fig. 4. Histogram (a) and graph of radioactivity distribution probability (b).

касов с помощью условного моделирования, основанного на применении расчета радиально-базисной функции. Данный способ позволяет разделить весь массив данных (облако точек) на три основных кластера: внутри рудного тела – 1; граница рудного тела – 0; вне рудного тела – (–1).

Эта методика условного моделирования позволяет построить каркас более детальным с учетом информации не по отдельным горизонтам, а в объеме, учитывая общий массив точек наблюдения. Таким образом был построен каркас Сюльдюкарского кимберлитового тела, существенно уточнивший его морфологию (см. рис. 3, б).

По результатам данного моделирования, Сюльдюкарская кимберлитовая трубка сложена двумя сопряженными телами (западным и восточным). Кимберлиты, выполняющие эти два тела, различаются некоторыми особенностями петрографического, минералогического, геохимического состава и их алмазонасностью [8, 9, 11, 12, 16]. Кимберлитовое тело имеет четко выраженное западное простирание (азимут около  $280^\circ$ ) со средним углом падения  $77^\circ$ . Морфология тела близка к жильной, с единичными апофизами.

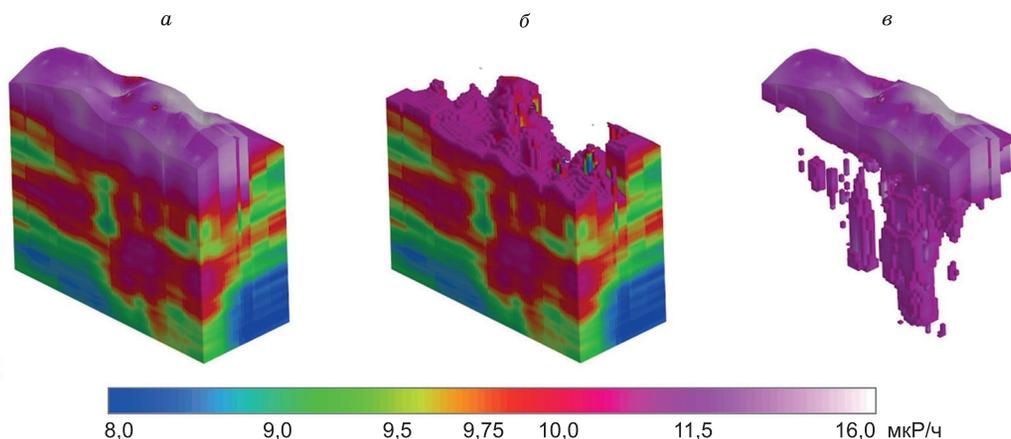
Интерпретация данных ГИС в ходе поисковых работ выполнена по традиционной схеме, в первую очередь с целью корреляции геофизических пластов и обнаружения разрывных нарушений и неравномерностей залегания карбонатного кимберлитовмещающего цоколя. Также в ходе интерпретации данных по поисково-оценочным скважинам геофизической службой Вилпойской ГРЭ была предпринята попытка построения трехмерной блочной модели кимберлитового тела по различным геофизическим параметрам, од-

нако, данная работа не выявила его ярких особенностей.

В ходе дополнительного анализа геофизической информации по данным каротажа скважин была построена блочная модель распределения радиоактивности пород. Гамма-картаж был выбран как основной метод для определения параметров интерполяции блочной модели, поскольку среди всех методов ГИС он является наименее зависимым от конструкции скважин и имеет наименьшую дисперсию распределения.

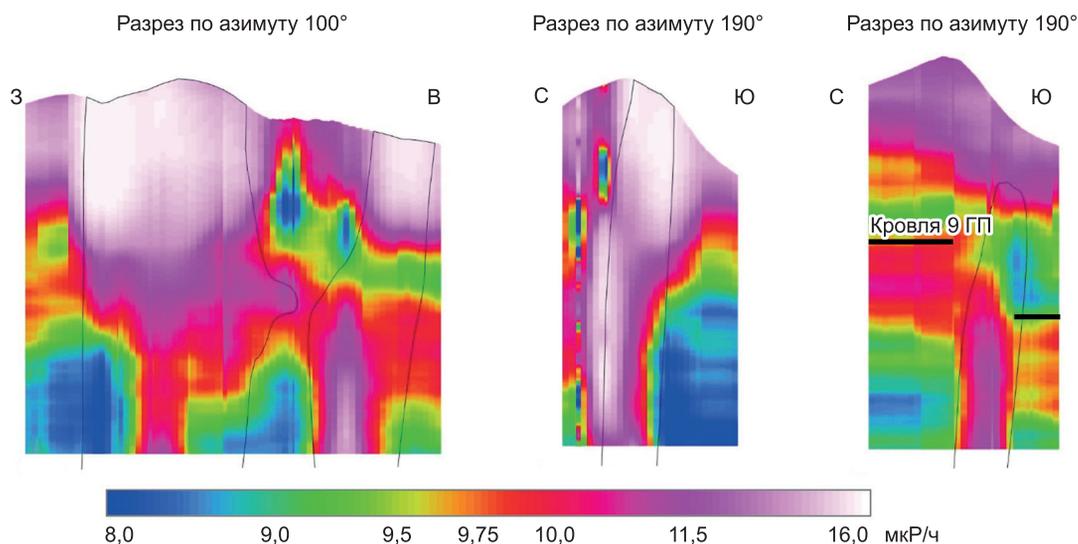
Первоначально модель была построена только по радиоактивности карбонатных пород и кимберлитового тела в пределах поисково-оценочного участка. Проведен общий статистический анализ (рис. 4), который указывает на наличие двух отдельных популяций пород по радиоактивности: от 5 до 10,56 и от 10,56 до 22 мкР/ч. Пространственно данные группы выделяются также отчетливо. К первой группе относятся карбонатные породы кимберлитовмещающего цоколя, ко второй – коры выветривания карбонатных пород и западное тело Сюльдюкарской трубки, также частично восточное тело (рис. 5).

Для оценки близких околорудных изменений и выявления особенностей в карбонатных породах кимберлитовмещающего цоколя проведено изучение разрезов блочной модели вдоль и вкрест простирания кимберлитового тела Т-54-14 (рис. 6). В разрезе по азимуту  $100^\circ$  отчетливо выделяются оба тела трубки Т-54-14, характеризующиеся радиоактивностью центральных частей тел более 10 мкР/ч, относительно вмещающих пород, имеющих радиоактивность порядка 8 мкР/ч.



**Рис. 5.** Блочная модель (вид на юго-запад) радиоактивности кимберлитовмещающего цоколя в пределах поисково-оценочного участка Т-54-14. *a* – общая модель; *б* – первая группа (<10,56 мкР/ч); *в* – вторая группа (>10,56 мкР/ч).

**Fig. 5.** Radioactivity block model (south-west view) of the kimberlite-bearing basement within the prospecting and appraisal area T-54-14. *a* – general model; *б* – the first group (<10.56 μR/hour); *в* – the second group (> 10.56 μR / hour).



**Рис. 6.** Разрезы блочной модели радиоактивности кимберлитовмещающего цоколя в пределах поисково-оценочного участка аномалии Т-54-14.

**Fig. 6.** Sections of the radioactivity block model of the kimberlite-bearing basement within the prospecting and appraisal area of the anomaly T-54-14.

Кимберлиты Мирнинского, Далдынского и Алакит-Мархинского полей обладают средними значениями гамма-активности, сопоставимыми с вмещающими породами (~ 10 мкР/ч), кимберлиты Накынского поля обладают радиоактивностью порядка 3–5 мкР/ч [1], это позволяет утверждать, что кимберлиты Сюльдюкарского тела в целом сопоставимы по радиоактивности с кимберлитами Мирнинского поля.

Разрез вкрест простирания западного тела в целом отображает морфологию тела лучше, чем восточное, в силу большей интенсивности радио-

активности, однако на разрезе вкрест восточного тела отмечается сбросовзбросовая структура, проявленная в опускании кровли 9 геофизического пласта южнее кимберлитового тела, амплитуда понижения составляет 10 м. Стоит отметить, что в современном рельефе кимберлитовмещающего цоколя Сюльдюкарское кимберлитовое тело проявлено локальным поднятием с превышением около 12 м.

Также, помимо данных ГК, были построены модели по КМВ и ИК. Однако, результаты данных построений представляют меньший инте-

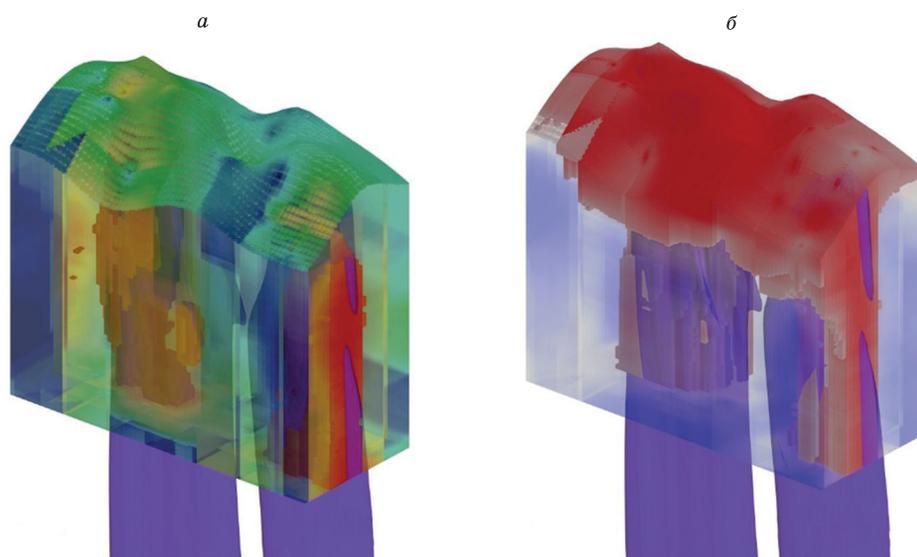


Рис. 7. Блочные модели по КМВ (а) и ИК (б).

Fig. 7. Block models for CMW (a) and IC (b).

рес вследствие их менее четкой наглядности. По данным КМВ отчетливо выделяются западное и восточное кимберлитовые тела, при значениях более  $500 \cdot 10^{-5}$  ед. СИ. (рис. 7, а). По данным ИК аналогично ГК отчетливо выделяются коры выветривания и кимберлиты со значениями выше 23 мСм/м (рис. 7, б).

В конце 2021 г. в 170 м северо-западнее Сьюльдюкарской трубки наклонной скважиной НС-1, азимут  $145^\circ$ , наклон  $75^\circ$  на глубине около 200 м (рис. 8) была вскрыта новая жила кимберлита, расчетная мощность которой составила 0,17 м [15].

Замер элементов залегания кимберлитовой жилы показал, что угол падения в скважине НС-1 составляет  $86^\circ$ ; во вмещающих породах наблюдаются также микросбросы амплитудой порядка 0,78 см. Микросбросы и их системы возникают в локальных зонах растяжения [2]. При этом угол падения практически совпадает с углом падения Сьюльдюкарского кимберлитового тела.

Целевое назначение скважины НС-1, вскрывшей новую жилу, – заверка сейсмической аномалии на продолжении предполагаемого рудовмещающего кимберлитового тела разлома. Аналогичность кинематики микротектонических нарушений в керне скважины НС-1 и в околоскважинном пространстве нового кимберлитового тела позволяет идентифицировать простираание данной жилы аналогичным с простираанием основного кимберлитового тела (рис. 9). Кроме

того, кимберлиты, слагающие жилу НС-1, отличаются от пород Сьюльдюкарского тела по структурно-текстурным признакам, составу и представлены мелкопорфировыми разностями существенно карбонатного состава.

Среди ИМК в кимберлитах значительно преобладают пикроильмениты, доля пиропов и хромитов невысока. Состав и характер изменений пикроильменитов из жильных кимберлитов указывает на их низкую потенциальную алмазонасность. Предполагается, что жила, подсеченная скважиной НС-1, является частью прожилковой системы, обрамляющей и сопровождающей кимберлитовое тело Сьюльдюкарское [6]. Изучение и поиски новых кимберлитов продолжаются.

## Выводы

1. Несмотря на то что традиционный комплекс ГИС, применяемый при поисках кимберлитовых тел, не дает возможности достоверно прогнозировать нахождение объектов в межскважинном пространстве, использование трехмерной интерполяции путем построения блочных моделей в условиях достаточно густой сети позволяет обнаружить тектонические нарушения малых амплитуд с определением их кинематики, влияющие на морфологию кимберлитовых тел.

2. Кимберлитовмещающее тектоническое нарушение, контролирующее размещение Сьюльдюкарского кимберлитового тела (аномалия Т-54-14),

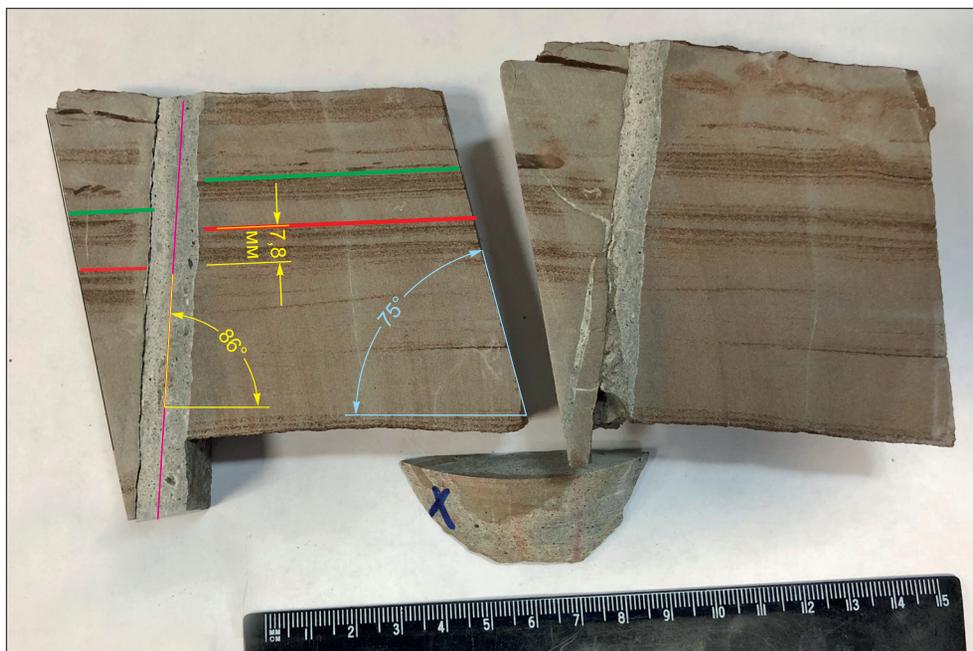


Рис. 8. Продольный спил образца ядра из скважины НС-1 с глубины 208 м.

Fig. 8. Longitudinal cut of the core sample from the well NS-1, 208 m depth.

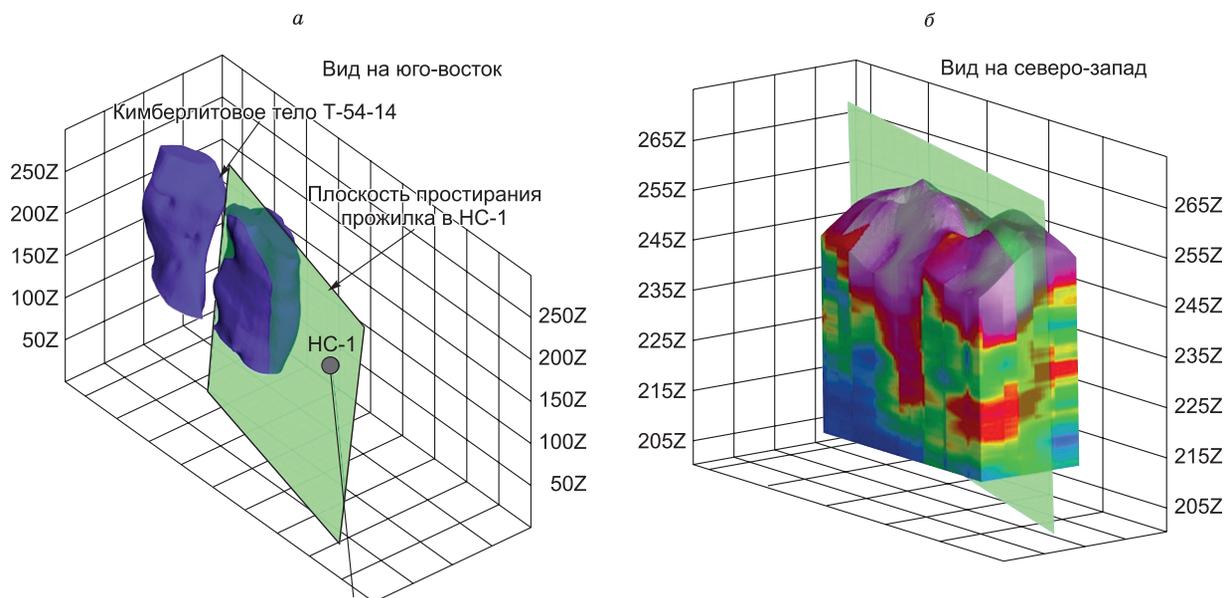


Рис. 9. Сопоставление плоскости развития жилы и Сюльдюкарского кимберлитового тела (а – основного тела, б – блочная модель по ГК).

Fig. 9. Comparison of the development plane of the vein and the Syuldyukar kimberlite body (а – the main body, б – block model according to the Civil Code).

наиболее вероятно, имеет простираие  $280^\circ$ , с крутым падением  $75\text{--}86^\circ$ . Данное нарушение имеет сложное строение и представляет сбросо-взбросовую систему. Локальное поднятие, к которому

приурочено кимберлитовое тело, вероятно, также обусловлено природой тектонического нарушения, однако вопрос о возрасте вертикальных движений на данный момент открыт.

3. Согласно выполненному моделированию, жила, вскрытая скважиной НС-1 к северо-западу от Сьюльдюкарского кимберлитового тела, наиболее вероятно, приурочена к единой с основным телом разломной зоне. Это, в свою очередь, указывает на направление кимберлитовмещающего нарушения, что позволяет локализовать детальные прогнозные построения и, соответственно, скорректировать дальнейшие поисковые работы в пределах нового кимберлитового поля и всего Ыгыаттинского алмазодносного района.

### Список литературы / References

1. Горев Н.И., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Толстов А.В. Тектонические аспекты строения Вилуйско-Мархинской зоны и их использование при прогнозировании кимберлитовых полей. *Наука и образование*. 2011;88(3):5–10.

[Gorev N.I., Gerasimchuk A.V., Protsenko E.V., Tolstov A.V. Tectonic aspects of the structure of the Vilyuisko-Markhinskaya zone and their use in predicting kimberlite fields. *Nauka i obrazovanie*. 2011;88(3):5–10. (In Russ.)]

2. Горев Н.И., Новопашин А.В., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Зайцевский Ф.К. Новая методика анализа геофизических данных при прогнозно-поисковых исследованиях в Накынском кимберлитовом поле (Западная Якутия). *Наука и образование*. 2016;82(2):7–15.

[Gorev N.I., Novopashin A.V., Gerasimchuk A.V., Protsenko E.V., Zaitsevsky F.K. A new technique for analyzing geophysical data in predictive and prospecting studies in the Nakyn kimberlite field (Western Yakutia). *Nauka i obrazovanie*. 2016;82(2):7–15. (In Russ.)]

3. Емельянов В.С., Толстов А.В., Борис Е.И. Новые данные о перспективах коренной алмазодности Вилуйско-Мархинской зоны разломов. *Вопросы методики прогнозирования и поисков месторождений полезных ископаемых (применительно к объектам геологоразведочных работ АК «АЛРОСА»)*. ЯНИГП ЦНИГРИ. Якутск, 2004. С. 115–123.

[Emelyanov V.S., Tolstov A.V., Boris E.I. New data on the prospects for the primary diamond content of the Vilyuisko-Markhinskoy fault zone. *Questions of methods for forecasting and prospecting for mineral deposits. (in relation to the objects of geological exploration work of JSC «ALROSA»)*. YANIGP TsNIGRI. Yakutsk; 2004: 115–123. (In Russ.)]

4. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Штейн Я.И., Толстов А.В., Яныгин Ю.Т. Геологические и минералогическо-геохимические признаки структур, контролирующих алмазодносные кимберлиты Накынского поля Якутии. *Руды и металлы*. 2006;(4):59–67.

[Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Shtein Ya.I., Tolstov A.V., Yanygin Yu.T. Geological and mineralogical

geochemical signs of structures controlling diamond-bearing kimberlites of the Nakyn field of Yakutia. *Ores and metals*. 2006;(4):59–67. (In Russ.)]

5. Игнатов П.А., Новиков К.В., Бушков К.Ю., Толстов А.В. Реконструкция кинематики разломов на закрытых территориях по данным анализа микронарушений в керне. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2011;(3):55–60.

[Ignatov P.A., Novikov K.V., Bushkov K.Yu., Tolstov A.V. Reconstruction of the kinematics of faults in closed areas according to the analysis of microdisturbances in the core. *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2011;(3):55–60. (In Russ.)]

6. Игнатов П.А., Новиков К.В., Шмонов А.М., Еремеев Р.В., Лисковая Л.В., Ковальчук О.Е., Толстов А.В. Оценка перспектив и локальное прогнозирование кимберлитов с помощью ГИС-технологий на закрытых территориях Накынского кимберлитового поля, Западная Якутия. *Руды и металлы*. 2012;(4):54–60.

[Ignatov P.A., Novikov K.V., Shmonov A.M., Eremeev R.V., Liskovaya L.V., Kovalchuk O.E., Tolstov A.V. Evaluation of prospects and local forecasting of kimberlites using GIS technologies in closed areas of the Nakyn kimberlite field, Western Yakutia. *Ores and Metals*. 2012;(4):54–60. (In Russ.)]

7. Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Толстов А.В., Колесник А.Ю., Мальцев М.В. Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудомещающей структуры кимберлитов Сьюльдюкарского поля Якутии. *Руды и металлы*. 2021;(1):93–105. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10006

[Ignatov P.A., Zaripov N.R., Tolstov A.V., Kolesnik A.Yu., Maltsev M.V. Hydrothermal mineralization in Cambrian sedimentary rocks as an indicator of the ore-bearing structure of kimberlites in the Syuldyukar field of Yakutia. *Ores and Metals*. 2021;(1):93–105. (In Russ.)]

8. Корнилова В.П., Специус З.В., Иванов А.С., Храпцов А.А. Петрология кимберлитов первой трубки нового Сьюльдюкарского поля. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России*, Якутск, 05–07 апреля 2017 года. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. С. 302–307.

[Kornilova V.P., Spetsius Z.V., Ivanov A.S., Khramtsov A.A. Petrology of kimberlites of the first pipe of the new Syuldyukar field. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia*, Yakutsk, April 05–07, 2017. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2017:302–307. (In Russ.)]

9. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2016;(3):86–94.

[Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals. *Vestnik VGU. Series: Geology*. 2016;(3):86–94. (In Russ.)]

10. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Минин В.А. Перспективы выявления новых кимберли-

тов на Вилюй-Мархинском междуречье (Западная Якутия). *Месторождения алмазов: процессы формирования, закономерности локализации, методы прогнозирования и поисков*. ИГМ СО РАН, Новосибирск; 2016:76–80.

[Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Minin V.A. Prospects for the discovery of new kimberlites in the Vilyui-Markhin interfluvium (Western Yakutia). *Diamond deposits: formation processes, localization patterns, forecasting and prospecting methods*. IGM SB RAS, Novosibirsk; 2016:76–80. (In Russ.)]

11. Мальцев М.В., Толстов А.В., Старкова Т.С., Иванов А.С. Особенности вещественного состава кимберлитов Слюдякарского поля (Западная Якутия). *Наука и образование*. 2017;88(4):37–43.

[M.V. Maltsev, A.V. Tolstov, T.S. Starkova, A.S. Ivanov. Features of the Matter of the Suldyukar Field Kimberlites (Western Yakutia). *Nauka I Obrazovanie*. 2017; 88(4):37–43. (In Russ.)]

12. Мальцев М.В., Толстов А.В., Бережнев И.И. Условия локализации и критерии поисков кимберлитов (на примере Ыгыаттинского алмазоносного района, Западная Якутия). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2018;(6):41–49. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-6-41-49

[Maltsev M.V., Tolstov A.V., Berezhnev I.I. Localization conditions and criteria for searching for kimberlites (on the example of the Ygyatta diamondiferous region, Western Yakutia). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018;(6): 41–49. (In Russ.)]

13. Проценко Е.В., Толстов А.В., Горев Н.И. Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазоносности Якутии. *Руды и металлы*. 2018;(4):14–23. DOI: 10.24411/08695997201810009

[Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Criteria for the search for kimberlites and new prospects for the primary diamond content of Yakutia. *Ores and Metals*. 2018;(4):14–23. (In Russ.)]

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

[Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasil'eva V.I. A new approach to the geochemical search for kimberlites in closed areas. *Exploration and protection of mineral resources*. 2008;(4-5):108–112. (In Russ.)]

15. Старкова Т.С., Муллаярова Л.С., Овчинников И.М., Остапенко Д.В., Толстов А.В. Новые кимберлиты Слюдякарского поля (Ыгыаттинский алмазоносный район, Якутия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию ИГАЮМ Сибирского от-*

*деления РАН*, Якутск, 23–25 марта 2022 года. Якутск: СВФУ им. М.К. Аммосова; 2022. С. 354–357.

[Starkova T.S., Mullayarova L.S., Ovchinnikov I.M., Ostapenko D.V., Tolstov A.V. New kimberlites of the Suldyukar field (Ygyatta diamond-bearing region, Yakutia). *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the XII All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of the IGAUM of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*, Yakutsk, March 23–25, 2022. Yakutsk: M.K. Ammosov NEFU; 2022:354–357.]

16. Толстов А.В., Разумов А.Н., Гончаров Е.М., Шерстяных А.И. Перспективы выявления и разведки нового типа коренных месторождений алмазов в Якутской алмазоносной провинции. *Алмазы Сибири и Арктических регионов мира – история, настоящее и будущее. VI Международный горно-геологический форум «МИНГЕО СИБИРЬ 2012»*. Красноярск; 2012: 153–164.

[Tolstov A.V., Razumov A.N., Goncharov E.M., Sherstyanykh A.I. Prospects for the discovery and exploration of a new type of primary diamond deposits in the Yakutsk diamond province. *Diamonds of Siberia and the Arctic regions of the world – history, present and future. VI International mining and geological forum «MINGEO SIBERIA 2012»*. Krasnoyarsk; 2012:153–164. (In Russ.)]

17. Толстов А.В., Фомин В.М., Разумов А.Н., Гончаров Е.М. Новые подходы к поискам месторождений алмазов в Якутской алмазоносной провинции. *Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідувального інституту*. 2013;(1):154–160.

[Tolstov A.V., Fomin V.M., Razumov A.N., Goncharov E.M. New approaches to prospecting for diamond deposits in the Yakutsk diamondiferous province. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Geological Institute*. 2013;(1):154–160. (In Russ.)]

18. Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. Sr and Nd isotopic compositions of kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton. *Doklady Earth Sciences*. 2007; 414(1):557–560.

19. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the Geochemical heterogeneity of Kimberlites. *Geochemistry International*. 2007;45(12):1197–1209.

20. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., Logvinova A.M., Bul'bak T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskii V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhanov S.A., Kostrovitskii S.I., Yakovlev D.A., Anastasenko G.F., Tolstov A.V. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the Northeastern Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10): 1365–1379.

*Об авторах*

<sup>1</sup>ОВЧИННИКОВ Илья Максимович, эксперт управления планирования производства, e-mail: OvchinnikovIM@alrosa.ru

<sup>2</sup>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

*Аффилиация*

<sup>1</sup>АК «АЛРОСА» (ПАО), 678170, г. Мирный, ул. Московская, 9А, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677007, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

*About the authors*

<sup>1</sup>OVCHINNIKOV Ilya Maksimovich, Expert of Production Planning Department, e-mail: OvchinnikovIM@alrosa.ru

<sup>2</sup>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

*Affiliation*

<sup>1</sup>PJSC «ALROSA», 9A Moskovskaya st., Mirny 678170, Russian Federation

<sup>2</sup>Diamond and Precious Metals Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677007, Russian Federation

*Поступила в редакцию / Submitted 20.07.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 10.08.2022*

*Принята к публикации / Accepted 22.08.2022*

УДК 553.411.071

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-346-362>

## **Петро- и геохимический состав мезозойских магматических пород массива Таежный (Южная Якутия, Алданский щит, Эвотинский золотоносный район)**

**А. И. Иванов, М. С. Иванов, А. И. Журавлев**

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

✉ [aiivanov@diamond.ysn.ru](mailto:aiivanov@diamond.ysn.ru)

### **Аннотация**

В работе приводятся результаты изучения петро- и геохимических особенностей составов магматических образований массива Таежный. Массив расположен в центральной части Нимнырского блока Алданского щита, в пределах Леглиерского рудного узла Эвотинского золотоносного района. По нашим полевым и петрографическим наблюдениям впервые было установлено двухфазовое строение массива. Первая фаза представлена сиенит-порфирами, вторая – лейкократовыми сиенитами. На поздних стадиях развития магматизма происходило внедрение даек бостонитов и вогезитов. В ходе исследований петро- и геохимических составов всех мезозойских магматических образований, участвующих в строении массива Таежный, выявлены следующие особенности: по различным классификационным данным в массиве выделяются две группы пород – кварцевые сиениты (I фаза) с неоднозначными петрохимическими характеристиками, по которым они близки как к высококальцевой известково-щелочной, так и к шошонитовой петрохимической серии; лейкократовые сиениты (II фаза) шошонитовой петрохимической серии; бостониты дайки близки сиенитам и отвечают породам только шошонитовой петрохимической серии; вогезиты дайки (сиенит-монцонитовый лампрофир) отвечают породам шошонитовой петрохимической серии. Все породы геохимически специализированы на Rb, Ba, Sr, B, Cr, V, Nb, Sc, т. е. на литофильные элементы. По различным отношениям и соотношениям элементов примесей все рассматриваемые породы несут как коровые, так и мантийные метки. А также сделан вывод о том, что все породы, участвующие в строении массива, могут рассматриваться в составе монцонит-сиенитового формационного типа.

**Ключевые слова:** Эвотинский золотоносный район, Леглиерский рудный узел, Алданский щит, магматизм, массив, дайки, сиенит, вогезит

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Государственного задания НИР ИГАБМ СО РАН и договора с АО «Золото Селигдара».

**Для цитирования:** Иванов А.И., Иванов М.С., Журавлев А.И. Петро- и геохимический состав мезозойских магматических пород массива Таежный (Южная Якутия, Алданский щит, Эвотинский золотоносный район). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):346–362. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-346-362>

## **Petro- and geochemical composition of mesozoic magmatic rocks of the Taezhny massif (South Yakutia, Evtotinsky gold bearing region)**

**A. I. Ivanov, M. S. Ivanov, A. I. Zhuravlev**

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

✉ [aiivanov@diamond.ysn.ru](mailto:aiivanov@diamond.ysn.ru)

### **Abstract**

We studied petro- and geochemical features of the compositions of magmatic formations in the Taezhny massif. The massif is located in the central part of the Nimnyr block of the Aldan shield within the Leglier ore cluster in the Evtotinsky gold bearing region. For the first time, according to our field and petrographic observations, the two-phase structure of the massif has been established. The first phase was represented by syenite-porphyry, and the second, by leucocratic syenite. At the later stages of magmatism development, the intrusion of bostonite and

vogesite dikes took place. According to various classification data, we distinguish two groups of rocks in the Tazhny massif: quartz syenites (phase I) with ambiguous petrochemical characteristics, which make them close to both high-potassium calc-alkaline and shoshonite petrochemical series; leucocratic syenites (phase II) of the shoshonite petrochemical series; bostonite dikes, similar to syenites and corresponding to rocks of the shoshonite petrochemical series only; vogesite dikes (syenite-monzonite lamprophyre) correspond to rocks of the shoshonite petrochemical series. All rocks are geochemically specialized for lithophilic elements: Rb, Ba, Sr, B, Cr, V, Nb, Sc. According to the ratios of trace elements, all studied rocks bear both crustal and mantle marks. We conclude that all the rocks involved in the structure of the massif could be considered as part of the monzonite-syenite formation type.

**Keywords:** Evotinsky gold-bearing region, Leglier ore cluster, Aldan shield, magmatism, massif, dykes, syenite, vogesite

**Funding.** This study was carried out within the framework of the State Assignment to DPMGI SB RAS and contract with PJSC «Seligdar».

**For citation:** Ivanov A.I., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I. Petro- and geochemical composition of mesozoic magmatic rocks of the Tazhny massif (South Yakutia, Evotinsky gold bearing region). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):346–362. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-346-362>

## Введение

Проблемы генезиса и металлогенической специализации многофазовых магматических образований рудных районов всегда актуальны и дискуссионны [1–6; и др.]. Одним из ключевых моментов в решении этих проблем является комплексное изучение отдельно взятых объектов, в частности, их петро- и геохимических характеристик, металлогенической специализации во взаимосвязи с условиями образования.

В Эвотинском золотоносном районе на территории Леглиерского рудного узла многофазовые магматические образования периода мезозойской тектономагматической активизации представлены Медведевским и Таежным массивами, а также многочисленными малыми телами – штоками, силлами и дайками, разобщенными по площади и приуроченными к разрывным нарушениям. На смежной территории Центрально-Алданского рудного района золоторудные проявления генетически связаны с многофазовым? мезозойским магматизмом [7–15; и др.].

## Материалы и аналитические методы

Петрографический состав пород был изучен на поляризационном микроскопе МИН-8 (70 шлифов). Фото шлифов сделаны на поляризационном микроскопе Olympus BX 50, при увеличении 25, 40, 100, камера Zeiss Axio CamICs 3. Главные компоненты и микроэлементы пород определялись, соответственно, методами силикатного анализа (Галенчикова Л.Т.) и многоканальной атомно-эмиссионной спектрометрии (Коркина С.Ю.) в отделе физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН (г. Якутск). Проанализировано 70 проб. Содержания микроэлементов

в породах (25 проб) определялись с помощью масс-спектрометра ELAN модель DRC-е в лаборатории ООО «ХАЦ «Плазма» (г. Томск).

## Геология массива Таежный

Эвотинский золотоносный район расположен в центральной части Алданского щита и пространственно совпадает с Центрально-Алданским супертеррейном. На западе по Амгинской зоне тектонического меланжа он граничит с Западно-Алданским составным террейном, а на востоке по Тыркандинской зоне тектонического меланжа – с Восточно-Алданским супертеррейном. В его составе различаются Нимнырский и Сутамский составные террейны, разделенные Сеймским надвигом [10] (рис. 1).

Массив Таежный расположен в пределах Леглиерского рудного узла центральной части Нимнырского блока Алданского щита, Эвотинского золотоносного района. На современном уровне эрозионного среза массив имеет форму неправильного эллипсоида, длинная ось которого ориентирована в северо-восточном направлении (рис. 2). По нашим полевым наблюдениям впервые было установлено его двухфазовое строение. Первая фаза представлена сиенит-порфирами, вторая – лейкократовыми сиенитами (рис. 2, 3, б, в). Контакт между ними ровный, четкий (см. рис. 2, 3, а). Массив интродуцирует породы фундамента (см. рис. 3, б), а сам прорывается дайками бостонитов и вогезитов.

## Петрография пород массива Таежный

Наименее распространенными породами массива Таежный являются *сиенит-порфиры* (см. рис. 3, а), которые образуют небольшой выход в

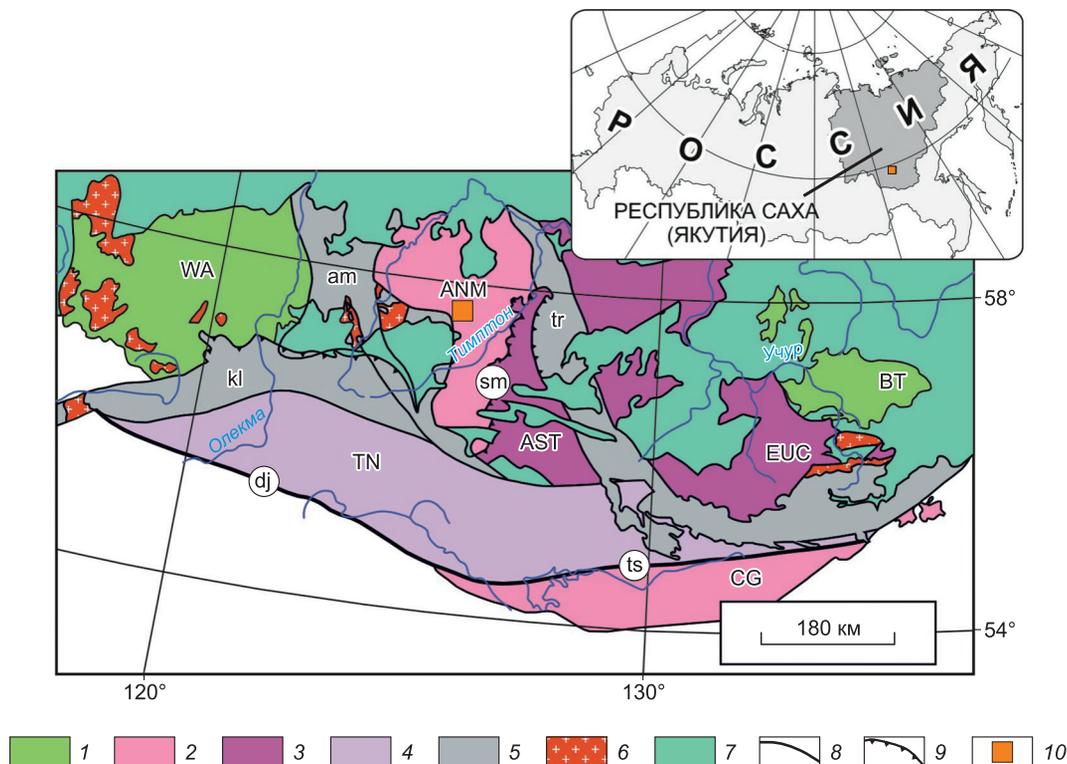


Рис. 1. Тектоническая схема Алданского щита [10].

1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-ортоogneiss террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-параgneiss террейны (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 4 – тоналит-трондьемит-гнейсовые террейны (TN – Тындинский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский), 9 – надвиги (sm – Сеймский), 10 – район работ.

Fig. 1. Tectonic scheme of the Aldan shield [10].

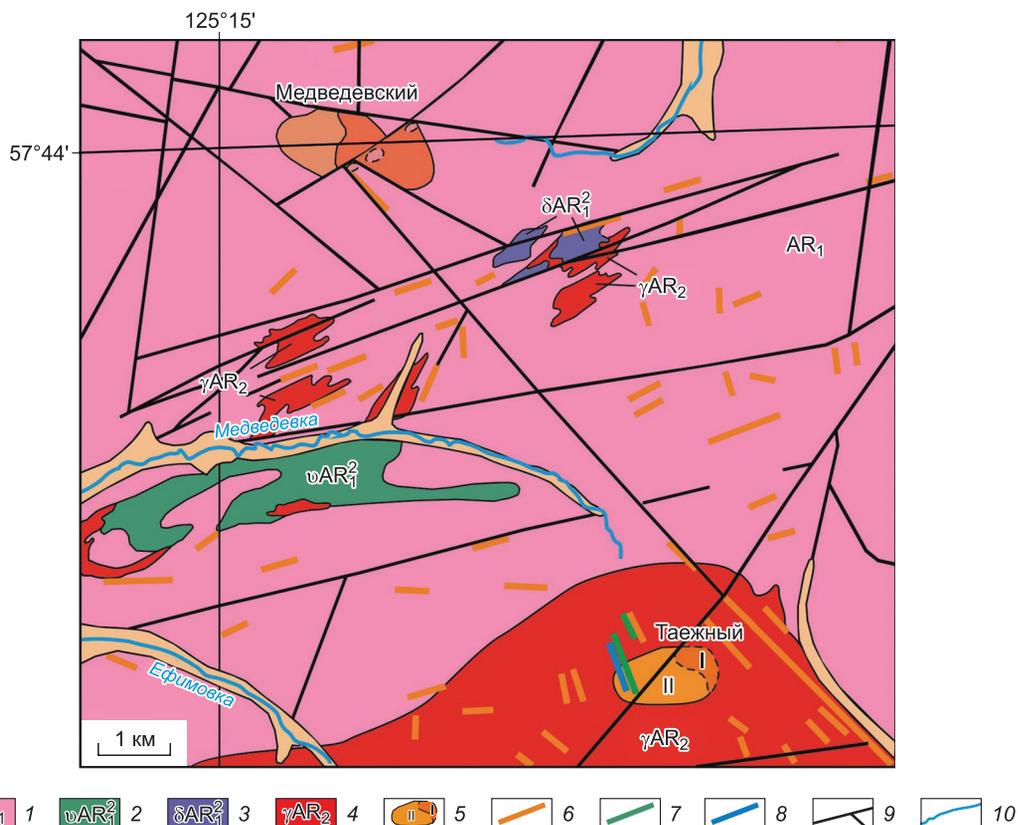
1 – granite-greenstone terranes (WA – West Aldan, BT – Batomgsky); 2 – granulite-orthogneiss terranes (ANM – Nimnyrsky, CG – Chogarskiy); 3 – granulite-paragneiss terranes (AST – Sutamskiy, EUC – Uchurskiy); 4 – Tonalite-trondhjemite-gneiss terranes (TN – Tyndinsky); 5 – Zones of tectonic melange (am – Amginskaya, kl – Kalarskaya, tr – Tyrkandinskaya); 6 – stitching early Proterozoic granites; 7 – sedimentary cover of the Siberian platform; 8 – faults (dj – Dzheltulaksky, ts – Taksakandinsky), 9 – thrusts (sm – Seimsky), 10 – work area.

его северо-восточной части. Порфировая структура пород обусловлена наличием вкрапленников КППШ и плагиоклаза размерами до 5 мм. Текстура пород массивная. Основная масса микрозернистая. Из особенностей минерального состава отмечается преобладание плагиоклаза (60 %) над КППШ (20 %), амфибола (8 %) над пироксеном (2 %), содержание кварца – 6 %, содержание апатита и циркона – 2 %, рудного минерала – 2 % (см. рис. 3, в). Породы фазы несут следы вторичных изменений (пелитизация, серитизация, хлоритизация).

Гипидиоморфно-зернистые, существенно лейкократовые сиениты характеризуются наибольшим распространением по площади массива (см. рис. 3, б, е). Текстура пород массивная. Из особенностей петрографического состава наименее

измененных разностей стоит отметить преобладание КППШ (60 %) над плагиоклазом (30 %), амфибола (3 %) над пироксеном (1 %), содержание биотита – 1 % и кварца – до 5 %. Породы несут многочисленные ксенолиты сиенит-порфиров предыдущей фазы, а также вмещающих пород фундамента (см. рис. 3, з, д). Для пород фазы характерно наличие следов вторичных изменений – пелитизации, серицитизации, хлоритизации. В юго-западной части массива в обломках метасоматитов по архейским гранитам отмечаются единичные друзы и щетки кварца, в целом породы фазы значительно прокварцованы.

Для дайки бостонитов, секущей массив Таежный, характерна бостонитовая структура, обусловленная извилистыми очертаниями лейст КППШ и плагиоклаза (см. рис. 3, ж). Текстура пород мас-



**Рис. 2.** Фрагмент схематической геологической карты Леглиерского рудного узла [16] с дополнениями авторов. 1 – породы чехла, 2 – габбро нерасчлененные, 3 – оливин-пироксеновые горнблендиты, 4 – позднеархейские граниты и гранитогнейсы, нерасчлененные; мезозойские магматические образования: 5 – породы Таежного массива, сиениты (I) и монзониты (II), дайки: 6 – сиенитов, 7 – бостонитов, 8 – вогезитов; 9 – разрывные нарушения, 10 – реки.

**Fig. 2.** Fragment of the schematic geological map of the Legliersky ore cluster [16] with the additions of the authors. 1 – rocks of sedimentary cover, 2 – undivided gabbro, 3 – olivine-pyroxene hornblendites, 4 – Late Archean granites and granite-gneisses, undivided; Mesozoic igneous formations: 5 – rocks of the Tazhnyy massif, syenites (I) and monzonites (II), dikes: 6 – syenites, 7 – bostonites, 8 – vogesites; 9 – faults, 10 – rivers.

сивная. Состав пород: калиевый полевой шпат (КПШ) – 60 %, плагиоклаз – 15, пироксен – 15, амфибол – 5, биотит – 5 %. В дайке отмечаются мелкие ксенолиты вмещающих пород фундамента и лейкократовых сиенитов массива Таежный (см. рис. 3, ж), что говорит о более позднем возрасте пород этой дайки по отношению к массиву.

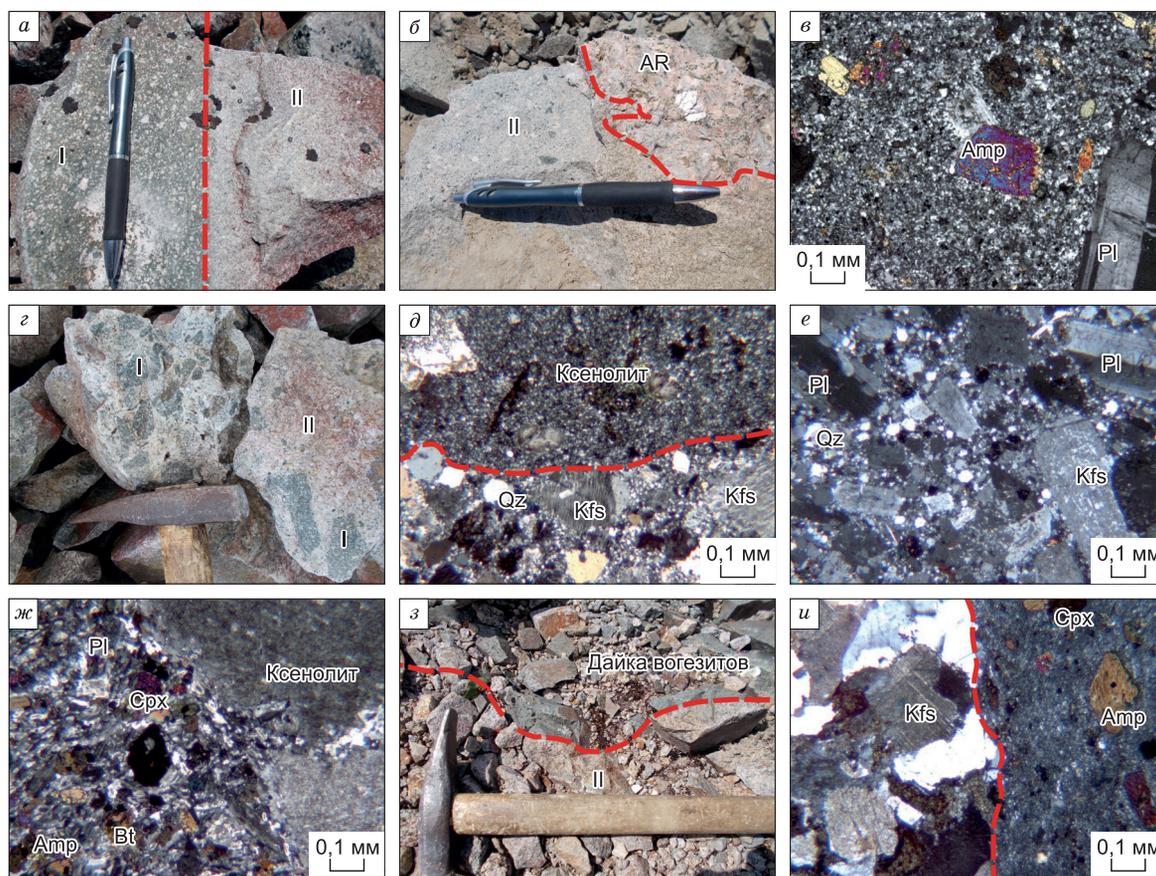
*Дайка бостонитов*, расположенная в непосредственной близости от массива, по петрографическому составу отличается от предыдущей преобладанием амфибола над пироксеном. Структура пород бостонитовая с лейстоподобной основной массой. Текстура массивная. Состав наименее измененных разностей: КПШ – 55 %, плагиоклаз – 30, пироксен – 2, амфибол – 10, биотит – 3 %.

*Дайка вогезитов*, расположенная в юго-западной части массива Таежный (см. рис. 2), имеет лампрофировую структуру, массивную текстуру

и следующий петрографический состав: плагиоклаз и КПШ – 50 %, роговая обманка – 35, баркевикит – 10, клинопироксен – 5 %. Основная масса породы микрокристаллическая, трудно диагностируемая даже при больших увеличениях. Вкрапленники представлены роговой обманкой и диопсидом. Помимо обыкновенной роговой обманки часто наблюдаются простые двойники и зональные кристаллы баркевикита. Контакт с вмещающими породами в основном ровный, четкий (см. рис. 3, з, и).

### Петрохимический состав пород массива Таежный

Сиенит-порфиры массива Таежный по содержанию петрогенных окислов относятся к кварцевым сиенитам [18] (табл. 1, рис. 4, а). Суммарное содержание щелочей ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) в них отвечает щелочным породам (9,23–12,83 %), при



**Рис. 3.** Породы, принимающие участие в строении массива Таежный.

*a* – контакт между сиенит-порфирами (I) и лейкократовыми сиенитами (II); *б* – контакт между лейкократовыми сиенитами и породами фундамента; *в* – шлиф И19, вкрапленники Amp и зонального Pl в сиенитах массива Таежный, увел. 40, николи +; *г* – ксенолиты сиенит-порфиров в лейкократовых сиенитах; *д* – шлиф И19, ксенолит сиенит-порфира в поздних сиенитах, увел. 10, николи +; *е* – пелитизированный Kfs в лейкократовых сиенитах, увел. 40, николи +; *ж* – шлиф И19-31/3, ксенолит пород массива Таежный в породах дайки бостонитов, увел. 40, николи +; *з* – контакт дайки вогезитов с породами массива Таежный; *и* – шлиф И19-33/2, контакт дайки вогезитов с вмещающими породами, увел. 10, николи +. Сокращения минералов [17]: Срх – клинопироксен; Amp – амфибол; Bt – биотит; Kfs – калиевый полевой шпат; Pl – плагиоклаз, Qz – кварц.

**Fig. 3.** Rocks participating in the structure of the Tahezny massif.

*a* – contact between syenite-porphury (I) and leucocratic syenite (II); *б* – contact between leucocratic syenite and basement rocks; *в* – thin section I19 phenocrysts of Amp and zonal Pl in syenites of the Tahezny massif, mag. x40, nicols +; *г* – xenoliths of syenite-porphury in leucocratic syenites; *д* – thin section I19 xenolith syenite-porphury in late syenite, mag. x10, nicols +; *е* – pelitized Kfs in leucocratic syenites, mag. x40, nicols +; *ж* – thin section I19-31 / 3, xenolith of the Tahezny massif rocks in the rocks of the bostonite dike, mag. x40, nicols +; *з* – contact of the vogesite dike with the rocks of the Tahezny massif; *и* – thin section I19-33 / 2: contact of the vogesite dike with the host rocks, mag. x10, nicols +. Abbreviations of minerals [17]: Срх – clinopyroxene; Amp – amphibole; Bt – biotite; Kfs – potassium feldspar; Pl – plagioclase, Qz – quartz.

незначительном преобладании  $K_2O$  (3,79–7,29 %) над  $Na_2O$  (3,92–6,15 %) (см. табл. 1). Породы характеризуются калиевым типом щелочности  $Na_2O/K_2O < 1$  и относятся к весьма высокоглиноземистой серии ( $al' = 1,14–4,13$ ), (коэффициент  $AG$  0,82–1,13) (см. табл. 1). Согласно классификационной диаграмме  $(Na_2O+K_2O)-SiO_2$  [19], породы фазы относятся к сиенитам (рис. 4, *a*). Фигуративные точки составов пород массива на классификационной диаграмме  $R_1-R_2$  [20] зани-

мают промежуточное положение между сиенитами и кварцевыми монцонитами (рис. 4, *б*). По соотношению  $K_2O-SiO_2$  [21] они близки породам как высококалийевой известково-щелочной, так и шшонитовой петрохимической серии (рис. 4, *в*).

Наименее измененные разности лейкократовых сиенитов массива в отличие от образований предыдущей фазы, характеризуются несколько повышенными содержаниями  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  и

## Петрохимический состав магматических пород массива Тасжньий

## Petrochemical composition of magmatic rocks of the Tazhny massif

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

Продолжение таблицы 1

Na+K	11,32	9,54	9,45	9,8	9,23	10	10,67	11,84	12,12	12,61
Na/K	0,85	1,08	1,04	0,94	1,08	1,04	1,11	1,01	0,98	0,99
al'	4,13	2,85	2,8	2,17	1,72	3,64	3,89	3,89	5,7	4,73
AG	0,93	0,8	0,81	0,86	0,79	0,86	1	0,92	1,02	1,04
	И19-28	И19-28/2	И19-28/3	И19-28/4	И19-31	И19-31/2	И19-31/3	И19-31/4	И19-31/5	И19-33
фаза					3					4
SiO <sub>2</sub>	64,71	66,26	62,32	66,05	58,77	58,53	60,64	59,53	58,87	60,84
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,18	0,44	0,2	0,69	0,8	0,65	0,61	0,61	0,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,5	16,23	15,45	15,35	14,74	14,63	14,43	14,89	14,99	15,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,22	1,68	2,86	1,42	4,26	3,96	4,51	3,96	4,68	3,06
FeO	1,11	0,57	1,41	1,23	2,83	2,97	2,66	2,79	2,44	3,13
MnO	0,06	0,06	0,1	0,06	0,11	0,1	0,11	0,11	0,1	0,09
MgO	0,57	0,4	0,92	0,5	2,48	2,51	2,57	2,5	2,49	2,08
CaO	1,64	0,83	2,91	1,27	4,04	4,38	4,34	4,07	4	3,74
Na <sub>2</sub> O	6,25	5,75	5,83	5,55	4,38	4,24	3,96	3,95	4,91	3,9
K <sub>2</sub> O	6,59	7,86	7,2	8,12	5,82	4,59	4,68	4,84	5,44	4,77
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,1	0,26	0,18	0,18	0,18	0,32	0,38	0,42	0,4	0,2
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,32	0,18	0,31	0,08	0,31	0,2	0,16	0,36	0,05	0,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,06	0,2	0,07	0,5	0,5	0,53	0,53	0,52	0,43
CO <sub>2</sub>	0,18	0,28	0,17	0,24	0,39	1,88	0,4	1,67	0,44	1,03
S	0	0	0,01	0	0	0,01	0,01	0,05	0	0,01
F	0,01	0,09	0,04	0,03	0,17	0,13	0,13	0,12	0,17	0,08
Summa	99,47	100,69	100,35	100,35	99,67	99,75	100,47	100,4	100,28	99,63
Na+K	12,84	13,61	13,03	13,67	10,2	8,83	8,64	8,79	10,35	8,67
Na/K	0,95	0,73	0,81	0,68	0,75	0,92	0,85	0,82	0,9	0,82
al'	4,24	4,35	5,63	2,51	3,93	1,13	1,12	1,1	1,16	1,18
AG	1,1	1,06	1,11	1,12	1,17	0,92	0,82	0,8	0,79	0,931
	И19-33/2	И19-33/3	И19-33/4	И19-33/5	И-35	И-35/2	И-35/3			
фаза	4				5					
SiO <sub>2</sub>	61,96	60,12	61,08	61,76	62,47	62,05	61,74			
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,59	0,54	0,46	0,57	0,54	0,55			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,06	14,92	15,05	15,9	14,89	14,87	14,79			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,36	3,62	3,33	3,39	3,54	3,45	3,61			
FeO	2,65	2,59	2,52	2,32	2,23	2,48	1,96			
MnO	0,06	0,08	0,06	0,05	0,09	0,09	0,08			
MgO	1,73	2,08	2,02	1,69	2,2	2,24	2,09			
CaO	2,62	2,86	2,86	2,98	4,66	4,98	4,4			
Na <sub>2</sub> O	4,38	4,3	3,72	4,31	4,42	4,32	4,94			
K <sub>2</sub> O	5,94	5,59	5,93	5,25	4,49	4,56	4,84			
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,6	0,44	0,5	0,4	0,16	0,18	0,24			
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,51	1,12	0,35	0,06	0,32	0,28	0,48			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,5	0,38	0,37	0,31	0,35	0,34	0,33			
CO <sub>2</sub>	0,49	0,91	1,21	0,59	0,12	0	0,03			
S	0	0	0,24	0	0	0	0			
F	0,13	0,13	0,15	0,07	0,1	0,09	0,12			

Summa	100,86	99,73	99,93	99,59	100,68	100,53	100,2			
Na+K	10,32	9,89	9,65	9,56	8,91	8,88	9,78			
Na/K	0,74	0,77	0,63	0,82	0,98	0,95	1,02			
al'	1,3	1,47	1,33	1,39	5,27	1,36	1,31			
AG	0,764	0,905	0,879	0,833	0,83	0,81	0,81			

*Примечание.* 1 – сиенит-порфиры; 2 – лейкократовые сиениты; 3 – дайка бостонитов в массиве; 4 – дайка вогезитов; 5 – дайка бостонитов в экзоконтакте массива.  $al' = Al/(2Ca + Na + K)$ ;  $AG = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ .

*Note.* 1 – syenite porphyry; 2 – leucocratic syenites; 3 – bostonite dike in the massif; 4 – dike vogesites; 5 – bostonite dike in the exocontact of the massif.  $al' = Al/(2Ca + Na + K)$ ;  $AG = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ .

низкими –  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $MgO$  и  $CaO$  (см. табл. 1). Для пород фазы характерна высокая суммарная щелочность ( $Na_2O+K_2O = 10–13,67\%$ ), где  $K_2O$  (4,91–8,12 %) преобладает над  $Na_2O$  (5,09–6,28 %) (см. табл. 1). Породы характеризуются калиевым типом щелочности ( $Na_2O/K_2O < 1$ ) и относятся к весьма высокоглиноземистой серии ( $al' = 2,51–5,70$ ), при значении коэффициента  $AG$  0,86–1,12 (см. табл. 1). По соотношениям  $(Na_2O+K_2O)–SiO_2$  породы отвечают сиенитам (см. рис. 4, а). На классификационной диаграмме  $R_1–R_2$  точки их составов образуют секущий тренд от сиенитов в поле кварцевых сиенитов (см. рис. 4, б). По соотношениям  $K_2O–SiO_2$  лейкократовые сиениты относятся к шошонитовой петрохимической серии (см. рис. 4, в).

Породы *дайки бостонитов*, секущей массив Таежный, по содержанию петрогенных окислов относятся к кварцевым сиенитам [18] (см. табл. 1). Суммарное содержание щелочей ( $Na_2O+K_2O = 8,64–10,35\%$ ) в них отвечает щелочным породам при преобладании  $K_2O$  (4,59–5,82 %) над  $Na_2O$  (3,95–4,91 %) (см. табл. 1). Породы характеризуются калиевым типом щелочности ( $Na_2O/K_2O < 1$ ) и высокой глиноземистостью ( $al' = 1,10–3,92$ , коэффициент  $AG$  0,79–1,17) (см. табл. 1). По классификации  $(Na_2O+K_2O)–SiO_2$  породы дайки отвечают сиенитам (см. рис. 4, а). На классификационной диаграмме  $R_1–R_2$  точки их составов образуют секущий тренд от сиенитов в поле кварцевых монцонитов (см. рис. 4, б), а на диаграмме  $K_2O–SiO_2$  локализуются в поле пород шошонитовой петрохимической серии (см. рис. 4, в).

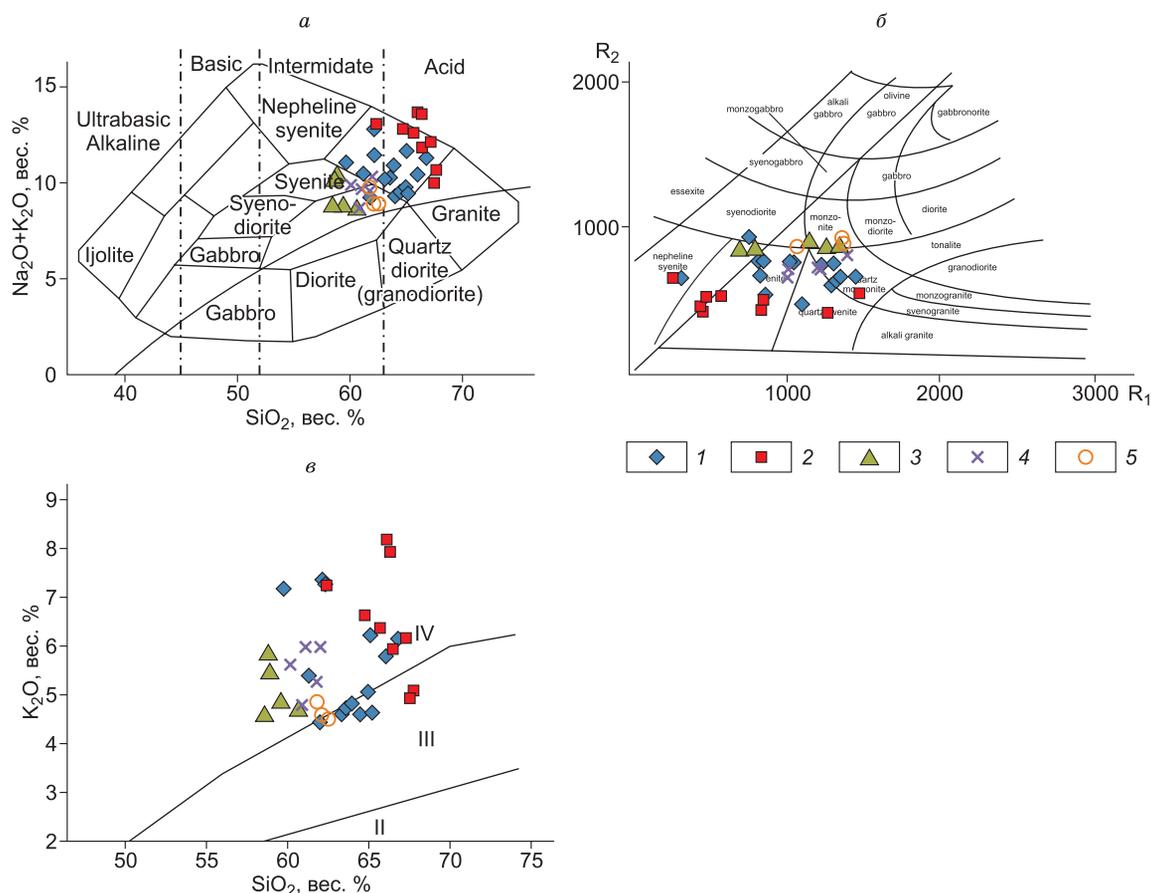
Породы *дайки бостонитов*, расположенные вблизи массива, по химическому составу близки монцонитам [18] (см. табл. 1, рис. 4, а). Сумма ( $Na_2O+K_2O$ ) в них отвечает щелочным образованиям (8,81–9,785 %), при незначительном пре-

обладании  $K_2O$  (4,49–5,98 %) над  $Na_2O$  (4,32–4,94 %) (табл. 1). Породы характеризуются калиевым типом щелочности ( $Na_2O/K_2O < 1$ ) и весьма высокой глиноземистостью ( $al' = 1,18–1,47$ , коэффициент  $AG$  0,76–0,93). По классификации  $(Na_2O+K_2O)–SiO_2$  породы дайки близки монцонитам (см. рис. 4, а). На классификационной диаграмме  $R_1–R_2$  точки их составов образуют секущий тренд от сиенитов в поле кварцевых монцонитов (см. рис. 4, б), соотношения  $K_2O–SiO_2$  в них отвечают шошонитовой петрохимической серии (см. рис. 4, в).

Породы *дайки вогезитов*, секущей массив Таежный, по содержанию петрогенных окислов наиболее близки к кварцевым монцонитам [18] (см. табл. 1). Суммарное содержание щелочей ( $Na_2O+K_2O$ ) в них отвечает щелочным породам (8,67–10,32 %), при заметном преобладании  $K_2O$  (4,77–5,94 %) над  $Na_2O$  (3,72–4,38 %) (см. табл. 1). Породы характеризуются калиевым типом щелочности ( $Na_2O/K_2O < 1$ ) и высокой глиноземистостью ( $al' = 1,31–5,27$ , коэффициент  $AG$  0,81–0,83). По классификации  $(Na_2O+K_2O)–SiO_2$  породы фазы отвечают монцонитам (см. рис. 4, а). На классификационной диаграмме  $R_1–R_2$  точки составов образуют секущий тренд от сиенитов к монцонитам (см. рис. 4, б). По соотношению  $K_2O–SiO_2$  отвечают породам шошонитовой петрохимической серии (см. рис. 4, в).

#### Геохимический состав пород массива Таежный

*Сиенит-порфиры* массива геохимически специализированы на литофильные элементы Rb, Ba, Sr, B, Cr, V, Nb, Sc (табл. 2). Содержания в них как халькофильных Cu, Sn, Zn Pb, Ge, так и сидерофильных Ni, Co элементов значительно ниже литофильных. Породы массива по высокому содержанию Rb (66–223 г/т), Sr (330–1100 г/т),



**Рис. 4.** Классификация магматических образований массива Таежный: *a* – диаграмма  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$  [19]; *б* – диаграмма  $(R_1\text{--}R_2)$  [20].  $R_1 = 4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})$ ,  $R_2 = 6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$ ; *в* – диаграмма  $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$  [21]. Поля: I – низкокальцевая толеитовая, II – среднекальцевая известково-щелочная, III – высококальцевая известково-щелочная, IV – шохонитовая. 1 – сиенит-порфиры, 2 – лейкократовые сиениты, 3 – дайка бостонитов в массиве, 4 – дайка вогезитов в массиве, 5 – дайка бостонитов рядом с массивом.

**Fig. 4.** Classification of magmatic formations of the Taehzny massif: *a* – Diagram  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$  [19]; *б* – Diagram  $(R_1\text{--}R_2)$  [20].  $R_1 = 4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})$ ,  $R_2 = 6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$ ; *в* – Diagram  $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$  [21]. Fields: I – low-potassium tholeiitic, II – medium-potassium calc-alkaline, III – high-potassium calc-alkaline, IV – shoshonite. Legend of the compositions of magmatic formations of the Taehzny massif: 1 – syenite-porphiry, 2 – leucocratic syenite, 3 – bostonite dike in the massif, 4 – vogesite dike in the massif, 5 – bostonite dike near the massif.

аномально высокому – Ва (1200–2700 г/т), а также по концентрациям Zr (81–160 г/т) и Co (4–15 г/т) наиболее близки к производным латитовой магмы [22, 23]. Отношения  $\text{K}/\text{Rb} = 271\text{--}560$ ,  $\text{Rb}/\text{Sr} = 0,07\text{--}0,22$  и соотношения  $\text{K}/\text{Rb} - \text{Rb}, \text{Sr} - \text{Rb}/\text{Sr}$  (рис. 5, *a, б*) в сиенит-порфирах массива характерны для пород, образовавшихся из мантийного источника [22, 24].

Породы фазы имеют плавный отрицательный наклон в распределении РЗЭ, т. е. они обогащены легкими (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены тяжелыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами (табл. 3, рис. 5, *в*). Величины отношений  $\text{La}/\text{Yb} = 14,42\text{--}16,93$ ,  $\text{Ce}/\text{Yb} = 28,90\text{--}33,21$  в сиенит-порфирах массива близки таковым пород

латитового ряда [23]. Для сиенит-порфиров массива характерно наличие слабой отрицательной Eu-аномалии ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,88\text{--}0,90$ ) что может говорить о формировании материнского расплава при фракционной кристаллизации темноцветных породообразующих минералов [25].

*Лейкократовые сиениты* отличаются от сиенит-порфиров низкими значениями как халькофильных, так и литофильных элементов (см. табл. 2). По содержаниям Rb (90–126 г/т), Ва (450–3000 г/т), Sr (230–1000 г/т), Zr (80,2–190 г/т), Nb (5,9–11,8 г/т) Co (3,2–7,8 г/т) они наиболее близки к производным латитовой магмы [22, 23]. Отношения  $\text{K}/\text{Rb} = 359\text{--}734,3$ ,  $\text{Rb}/\text{Sr} = 0,1\text{--}0,4$  и соотношения  $\text{K}/\text{Rb} - \text{Rb}, \text{Sr} - \text{Rb}/\text{Sr}$  [24] (рис. 5, *б, в*)

## Геохимический состав магматических пород массива Таяжньий

## Geochemical composition of magmatic rocks of the Taezhny massif

Показатель	И19-24/2	И19-24/4	И19-26	И19-26/2	И19-26/3	И19-26/4	И19-26/5	И19-29	И19-29/2	И19-29/4
фаза	1									
Cu	20	11	7,5	7,4	20	<5	8	5,6	17	8,1
Sn	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Zn	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	-57	<60
Pb	16	16	15	15	10	30	13	19	20	29
Ge	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	2,4	<2,2	-2,1	<2,2	<2,2	<2,2
Cr	180	48	37	140	160	92	220	220	87	45
V	85	85	79	75	120	66	170	150	110	71
Sc	7,7	7,8	9,2	7,6	16	5,8	18	12	13	4,9
Ba	2000	2100	2500	2500	1200	2000	1900	1800	2300	2300
Sr	860	1000	940	910	330	790	640	670	950	720
Rb	66	70	82,8	76,5	223,2	93,6	139,5	117	82,8	108
Nb	8,9	6,5	9,1	11	6,2	8,8	6,9	6,3	6,7	6,1
Zr	98	120	130	95	120	120	150	150	160	81
B	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9
Y	12	13	16	14	18	8,8	1,9	21	20	9,3
Yb	1,6	1,8	1,9	1,7	2,1	1,2	2,5	2,5	2,8Fe	1,4
Ni	17	14	11	16	35	12	34	17	18	11
Co	8,2	7,2	6,9	6,9	9,1	4,5	15	8,4	10	5,2
K/Rb	476,7	559,74	480,23	500,25	271,13	509,96	423,69	512,27	538,38	475,79
Rb/Sr	0,08	0,07	0,09	0,08	0,68	0,12	0,22	0,17	0,09	0,15
Ba/Rb	30,3	30	30,19	32,68	5,38	21,37	13,62	15,38	27,78	21,3
	И19-29/5	И19-30/2	И19-30/3	И19-30/4	И19-30/5	И19-27/2	И19-27/3	И19-27/4	И19-27/5	И19-27/6
фаза						2				
Cu	6,1	16	38	32	28	5,1	5,5	<5	5	5,8
Sn	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Zn	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60	<60
Pb	38	22	17	21	19	31	18	25	30	31
Ge	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2
Cr	190	28	37	230	140	190	27	130	230	280
V	58	76	75	100	90	42	37	47	45	44
Sc	3,3	8,2	8,7	12	12	4,6	2,6	4,9	4,4	-3,3
Ba	2700	2200	2300	2200	2200	1600	450	1800	1800	1700
Sr	640	910	900	980	1100	770	230	790	730	610
Rb	117	72	94	83,7	73,8	108	90	117	123	125
Nb	11	11	7,5	6,4	10	8,7	11	7,4	7,1	9
Zr	91	130	120	130	160	88	190	110	110	100
B	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9
Y	7,7	15	16	15	18	6,6	5,4	7,3	7,2	6,2
Yb	1,1	1,9	1,9	1,8	2,3	<1	1,1	1	0,9	0,9

Продолжение таблицы 2

Ni	16	12	12	19	32	9,4	7	7,6	11	11
Co	3,7	6,7	7	8,7	9	3,4	<3,2	<3,2	3,2	<3,2
K/Rb	434,22	529,21	408,88	499,86	498,3	377,4	473,17	359,01	399,73	407,24
Rb/Sr	0,18	0,08	0,1	0,09	0,07	0,14	0,39	0,15	0,17	0,2
Ba/Rb	23,08	30,56	24,47	26,28	29,81	14,81	5	15,38	14,69	13,63
	И19-27/7	И19-28	И19-28/2	И19-28/3	И19-28/4	И19-31	И19-31/2	И19-31/3	И19-31/4	
фаза	2					3				
Cu	10	7,7	<5	7,9	14	39	17	23	23	
Sn	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	
Zn	<60	<60	<60	<60	<60	67	-56	80	-57	
Pb	17	28	30	24	19	17	20	19	18	
Ge	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	
Cr	48	48	47	44	67	72	220	86	80	
V	65	66	68	130	73	180	150	170	170	
Sc	4,4	4,4	4,1	9	3,6	22	24	24	25	
Ba	1900	3000	2200	2300	1700	2400	2300	3200	2400	
Sr	710	1000	770	780	570	750	920	1100	850	
Rb	107	126	117	117	91,8	117	90,9	86,4	94,5	
Nb	8,4	12	7	5,9	8	6,7	4,2	5,6	9,9	
Zr	110	81	80	120	100	190	210	190	180	
B	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	<9	
Y	7,5	6,9	7	14	6,9	20	23	23	23	
Yb	1,1	1,2	1,1	1,9	1,1	2,9Fe	3,2Fe	3,5Fe	3,1Fe	
Ni	10	13	8,5	14	13	26	32	29	28	
Co	4,4	4,7	<3,2	7,8	3,7	22	21	23	23	
K/Rb	488,85	434,17	557,68	510,85	734,28	412,94	419,17	449,65	425,17	
Rb/Sr	0,15	0,13	0,15	0,15	0,16	0,16	0,1	0,08	0,11	
Ba/Rb	17,68	23,81	18,8	19,66	18,52	20,51	25,3	37,04	25,4	
	И19-31/5	И19-33	И19-33/2	И19-33/3	И19-33/4	И19-33/5	И19-35	И19-35/2	И19-35/3	
фаза		4					5			
Cu	17	15	28	20	24	21	12	<5	19	
Sn	2,9	<4	<4	<4	<4	2,9	<4	<4	<4	
Zn	-54	<60	-58	<60	86	<60	<60	68	<60	
Pb	18	14	23	37	96	11	17	12	12	
Ge	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	<2,2	
Cr	80	87	190	180	140	160	110	170	120	
V	190	140	150	150	140	120	130	120	120	
Sc	25	21	20	20	17	14	17	17	14	
Ba	2500	2900	1200	1500	1800	1800	2100	2100	1300	
Sr	800	890	490	540	490	570	700	790	540	
Rb	95,4	89,1	135,9	108,9	108,9	85,5	91,8	88,2	111,6	
Nb	11	4	4,7	4	6,6	5,9	4,8	5,9	7,6	
Zr	200	160	210	160	120	140	130	140	130	
B	<9	<9	<9	65	<9	<9	<9	8,7	<9	

Окончание таблицы 2

Y	21	22	19	19	15	15	17	15	12	
Yb	3,1Fe	2,9Fe	1,9	2,2	1,9	2	2	2,2Fe	1,7	
Ni	28	29	24	29	24	24	21	27	23	
Co	23	21	17	19	12	13	16	16	12	
K/Rb	473,37	444,41	362,84	426,12	452,04	509,73	406,02	429,18	360,02	
Rb/Sr	0,12	0,1	0,28	0,2	0,22	0,15	0,13	0,11	0,21	
Ba/Rb	26,21	32,55	8,83	13,77	16,53	21,05	22,88	23,81	11,65	

*Примечание.* 1 – сиенит-порфиры; 2 – лейкократовые сиениты; 3 – дайка бостонитов в массиве; 4 – дайка вогезитов; 5 – дайка бостонитов возле массива. Содержание элементов в г/т.

*Note.* 1 – syenite porphyry; 2 – leucocratic syenites; 3 – bostonite dike in the massif; 4 – dike vogesites; 5 – bostonite dike in the exocontact of the massif.

Таблица 3

## Геохимический состав пород массива Таежный по данным ISP MS, г/т

Table 3

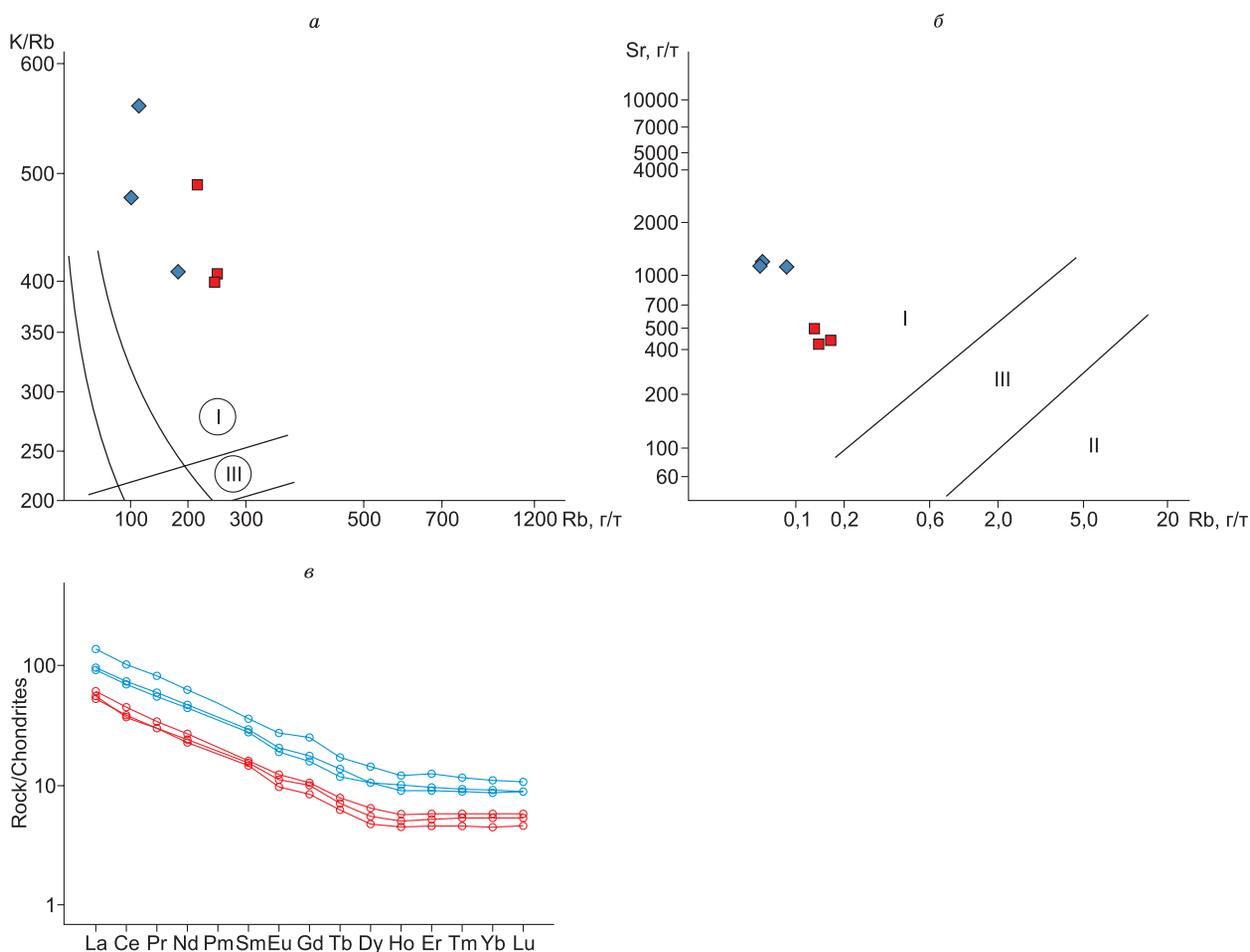
## Geochemical composition of rocks of the Taezhny massif according to ISP MS, g/t

	И19-24/2	И19-24/4	И19-30/3	И19-27/5	И19-27/6	И19-27/7
фаза	1			2		
Элемент						
Rb	66	70	94	123	125	107
Sr	1110	1150	1080	894	759	828
Y	16,2	17,0	22	9,3	8,3	10,5
Zr	130	142	164	119	125	124
Nb	7,0	7,0	8,9	6,5	6,3	6,2
Cs	0,85	0,40	0,88	1,25	0,96	0,89
Ba	1910	2060	2220	1830	1660	1590
La	22	23	33	12,7	13,4	14,6
Ce	43	45	64	24	23	28
Pr	5,3	5,7	7,9	2,9	2,9	3,3
Nd	21	22	30	11,5	10,8	12,9
Sm	4,3	4,5	5,6	2,4	2,3	2,5
Eu	1,11	1,19	1,61	0,66	0,57	0,73
Gd	3,3	3,7	5,2	2,1	1,79	2,2
Tb	0,45	0,52	0,65	0,27	0,24	0,30
Dy	2,7	2,7	3,7	1,44	1,23	1,68
Ho	0,52	0,58	0,70	0,29	0,26	0,33
Er	1,53	1,61	2,1	0,89	0,78	0,98
Tm	0,23	0,24	0,30	0,14	0,12	0,15
Yb	1,50	1,58	1,92	0,94	0,78	1,00
Lu	0,23	0,23	0,28	0,14	0,12	0,15
Hf	3,3	3,4	4,0	3,3	3,3	3,5
Ta	0,34	0,34	0,40	0,28	0,27	0,28
Th	5,5	6,2	8,9	7,1	5,5	8,6
U	2,2	2,8	3,3	1,65	1,50	1,84
La/Yb	14,42	14,84	16,93	13,50	17,14	14,58

	И19-24/2	И19-24/4	И19-30/3	И19-27/5	И19-27/6	И19-27/7
фаза	1			2		
Элемент						
Ce/Yb	28,90	28,71	33,21	25,83	29,67	28,48
Nb/La	0,32	0,30	0,27	0,51	0,47	0,42
Y/Nb	2,31	2,43	2,43	1,43	1,33	1,70
Th/U	2,46	2,19	2,66	4,29	3,66	4,69
Eu/Eu*	0,90	0,88	0,91	0,89	0,85	0,95
ΣPЗЭ	123,65	130,25	177,95	69,97	66,89	79,69

Примечание. 1 – сиенит-порфиры; 2 – лейкократовые сиениты.

Note. 1 – syenite-porphury; 2 – leucocratic syenites.



**Рис. 5.** Дискриминационные диаграммы для магматических образований массива Таежный: а – соотношение K/Rb–Rb в магматических породах [24]. Поля: I – мантийные, III – мантийно-коровые. б – соотношение Sr–Rb/Sr в магматических породах [24]. Поля: I – мантийные, II – коровые, III – мантийно-коровые. в – нормирование к хондриту [26] магматических пород массива Таежный. Построения диаграмм по данным ISP MS. Усл. обоз. пород – см. на рис. 4.

**Fig. 5.** Discrimination diagrams for magmatic formations of the Tahezny massif: а – K/Rb–Rb ratio in magmatic rocks [24]. Fields: I – mantle, III – mantle-crustal. б – Sr–Rb/Sr ratio in igneous rocks [24]. Fields: I – mantle, II – crustal, III – mantle-crustal. в – normalization to khondrit [26] of magmatic rocks of the Tahezny massif. Plotting diagrams from ISP MS data. See the rock symbols in fig. 4.

в массиве отвечает породам мантийной природы, а по низкому значению отношения Ba/Rb (до 23) наиболее близки коровым образованиям [23].

Характер распределения РЗЭ в лейкократовых сиенитах близок таковому в сиенит-порфирах, но при пониженных концентрациях всех элементов (см. табл. 3, рис. 5, в). Величины отношений  $La/Yb=13,50-17,14$ ,  $Ce/Yb = 25,83-29,67$  отвечают производным латитового ряда [23]. Значения  $Nb/La = 0,42-0,51$  и  $Th/U = 3,66-4,69$  могут свидетельствовать о контаминации первичных мантийных магм коровым веществом [27–29]. Заметное большее относительное содержание европия ( $Eu/Eu^* = 0,85-0,95$ ), по сравнению с породами предыдущей фазы, ближе к мантийному [25], а также может говорить о формировании расплавов в ходе фракционной кристаллизации только темноцветных породообразующих минералов и свидетельствовать о глубинной дифференциации [25].

*Бостониты даек* отличаются от пород массива более низкими содержаниями халькофильных элементов, кроме Cu – 39 г/т (см. табл. 3), повышенными содержаниями литофильных элементов – Sr до 1100 г/т, Ba до 3200 г/т, Zr до 210 г/т, Co 21–23 г/т, V до 170 г/т и относительно низким Rb до 117 г/т (см. табл. 3). Бостониты даек по содержаниям Rb (86–117 г/т), Ba (2300–3200 г/т), Sr (750–1100 г/т), Zr (180–210 г/т), Nb (5,32–10,80 г/т), Co (21–23 г/т) близки производным латитового ряда [22, 23]. Отношения  $K/Rb = 413-473$ ,  $Rb/Sr$  (до 0,16) в них отвечают мантийной природе, а по низкому значению Ba/Rb (до 23,81) они близки коровым образованиям [22, 23].

Породы дайки *вогезитов* геохимически специализированы на Rb, Ba, Sr, Cr, V, Sc Ni, Co (см. табл. 3), т. е. на литофильные и сидерофильные элементы. Содержания в них халькофильных элементов значительно ниже. Породы дайки по высокому содержанию Rb (86–136 г/т), Ba (1200–2900 г/т), Sr (490–890 г/т), а также по концентрациям Zr (120–210 г/т), Co (12–21 г/т) отвечают производным латитового ряда [22, 23]. Отношения  $K/Rb = 362,84-509,73$ ,  $Rb/Sr = 0,10-0,28$  [22] характерны для пород, образовавшихся из мантийного или в меньшей степени мантийно-корового источника.

### Заключение

По нашим полевым и петрографическим наблюдениям впервые было установлено, что массив Таежный имеет двухфазовое строение.

Первая фаза сложена сиенит-порфирами, вторая – лейкократовыми сиенитами. Последние несут многочисленные ксенолиты сиенит-порфира, т. е. являются более поздними образованиями.

В ходе исследований петро- и геохимических составов мезозойских магматических образований массива Таежный выявлены следующие особенности:

1. По различным классификационным данным, в массиве Таежный выделяются следующие группы пород: кварцевые сиениты (I фаза) с неоднозначными петрохимическими характеристиками, по которым они близки как к высококальциевой известково-щелочной, так и к шошонитовой петрохимической серии; лейкократовые сиениты (II фаза) шошонитовой петрохимической серии; бостониты дайки близки сиенитам и отвечают породам только шошонитовой петрохимической серии; вогезиты дайки (сиенит-монзонитовый лампрофир) отвечают породам шошонитовой петрохимической серии.

2. Для всех пород характерны высокие содержания  $Al_2O_3$ , в сиенитах массива 13,88–16,38 % и 14,43–15,90 % в породах даек, а также низкое содержание  $TiO_2$  (максимум до 0,80 % в дайках бостонитов). По суммарному содержанию щелочей и породы массива, и породы даек характеризуются калиевым типом щелочности.

3. Повышение значений глиноземистости в породах массива Таежный от сиенитов  $al' = 1,14-4,13$  к лейкократовым сиенитам  $al' = 2,51-5,70$  с последующим понижением этого показателя в породах даек бостонитов  $al' = 1,10-3,92$ ,  $al' = 1,18-1,47$  и вновь с ростом этого параметра в дайке вогезитов  $al' = 1,31-5,27$ . При этом значение коэффициента  $AG$  пород заметно снижается в этом ряду от 0,79–1,13 до 0,86–1,12 в породах массива и от 0,79–1,17, 0,76–0,93 в дайках бостонитов до 0,81–0,83 в дайке вогезитов, что, наряду с петрографическими наблюдениями, скорее всего, может отражать последовательность развития магматизма.

4. Все породы геохимически специализированы на Rb, Ba, Sr, B, Cr, V, Nb, Sc (см. табл. 2), т. е. на литофильные элементы. Содержания в них как халькофильных Cu, Sn, Zn Pb, Ge, так и сидерофильных Ni, Co элементов значительно ниже. Высокие содержания во всех породах Rb, Ba, Sr, Rb, Zr, Nb, Co отвечают таковым латитовой серии.

5. По отношениям  $K/Rb$ ,  $Rb/Sr$  и соотношениям  $K/Rb-Rb$ ,  $Sr-Rb/Sr$  элементов, все породы массива близки мантийным образованиям.

6. Распределения РЗЭ в породах массива имеют плавный отрицательный наклон, т. е. они обогащены цериевыми (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены иттриевыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами. Величины отношений La/Yb, Ce/Yb во всех породах массива близки производным латитовой серии.

7. Отношения Nb/La < 1 (характерно для всех пород массива), означающие отрицательную нибиевую (танталовую) аномалию, и низкие значения Th/U < 3 можно рассматривать как признак контаминации континентальной корой [27–29].

8. Высокое отношение Y/Nb > 1,2 (в целом, для всех пород массива) может иметь различное происхождение, отражающее вклад как коровых, так и мантийных источников [25].

9. Относительное содержание европия Eu/Eu\* ≈ 1 в породах массива Таежный близко к мантийному, а также может говорить о формировании расплавов в ходе фракционной кристаллизации только темноцветных породообразующих минералов. Стоит отметить наибольшую концентрацию РЗЭ в сиенит-порфирах  $\sum \text{РЗЭ } 177,95_{\text{max}}$ , которая снижается к лейкократовым сиенитам  $\sum \text{РЗЭ } 79,69_{\text{max}}$ . В совокупности со значениями коэффициента AG это может свидетельствовать о ходе нормальной дифференциации.

В целом все изученные магматические образования по петро-геохимическим характеристикам близки породам производных латитовой и шошонитовой серий и могут рассматриваться в составе монцонит-сиенитового формационного типа.

### Список литературы / References

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

[Belyaev G.M., Rudnik V.A. *Formation-genetic types of granitoids*. Leningrad: Nedra; 1978. 168 p. (In Russ.)]

2. Кузнецов В.А. *Проблемы рудно-формационного анализа и металлогении*. Новосибирск: Наука; 1988. 244 с.

[Kuznetsov V.A. *Problems of ore formation analysis and metallogeny*. Novosibirsk: Nauka; 1988. 244 p. (In Russ.)]

3. Орлов Ю.С., Трунилина В.А. Критерии связи эндогенного оруденения с магматизмом (на примере оловорудных узлов Восточной Якутии). *Вопросы магматизма и оруденения Якутии*. Якутск; 1992:43–57.

[Orlov Yu.S., Trunilina V.A. Criteria for the relationship between endogenous mineralization and magmatism (on the example of tin ore clusters in Eastern Yakutia). *Questions of magmatism and mineralization of Yakutia*. Yakutsk; 1992:43–57. (In Russ.)]

4. Трунилина В.А. и др. *Магматизм различных геодинамических обстановок (зона сочленения Верхоянской окраины Сибирского континента и Колымо-Омолонского микроконтинента)*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1999. 168 с.

[Trunilina V.A. et al. *Magmatism of different geodynamic settings (junction zone of the Verkhoyansk margin of the Siberian continent and the Kolyma-Omolon microcontinent)*. Yakutsk: YaNC SB RAS; 1999. (In Russ.)]

5. Гоневчук В.Г. *Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез*. Владивосток: Дальнаука; 2002. 274 с.

[Gonevchuk V.G. *Tin-bearing systems of the Far East: magmatism and ore genesis*. Vladivostok: Dalnauka; 2002. (In Russ.)]

6. Степнова Ю.А. *Генезис и флюидный режим формирования рудно-магматической системы Шибановского рудного узла*. Владивосток: Дальнаука; 2013. 30 с.

[Stepnova Yu.A. *Genesis and fluid regime of formation of the ore-magmatic system of the Shibanovsky ore cluster*. Vladivostok: Dalnauka; 2013. (In Russ.)]

7. Билибин Ю.А. Послеюрские интрузии Алданского района. *Петрография СССР. Сер. 1: Региональная петрография. Вып. 10. Петрография Алдана*. М.;Л.: Изд-во Акад. наук СССР; 1941. 119 с.

[Bilibin Yu.A. Jurassic intrusions of the Aldan region. *Petrography of the USSR. Ser. 1: Regional petrography. Issue 10. Petrography of Aldan*. M.;L.; Akad. nauk SSSR; 1941. (In Russ.)]

8. Билибин Ю.А. *Избранные труды*. М.: АН СССР; 1958. 1. 432 с.

[Bilibin Yu.A. *Selected works*. Moscow: Akad. nauk SSSR; 1958. 1. (In Russ.)]

9. Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центральнo-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия). *Тихоокеанская геология*. 2010;2(29):3–26.

[Maksimov E.P., Uyutov V.I., Nikitin V.M. Central Aldan gold-uranium ore magmatogenic system (Aldan-Stanovoy shield, Russia). *Russian journal of Pacific Geology*. 2010;2(29);3–26. (In Russ.)]

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

[Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic Sakha (Yakutiya)*. Moscow: "Nauka/Interperiodika"; 2001. (In Russ.)]

11. Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я. Золоторудные месторождения Центрального Алдана. *Геология рудных месторождений*. 2002;6(44): 467–499.

[Vetluzhskikh V.G., Kazanskiy V.I., Kochetkov A.Ya. Gold deposits of the Central Aldan. *Geology of ore deposits*. 2002;6(44):467–499. (In Russ.)]

12. Кочетков А.Я. Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана. *Геология и геофизика*. 2006;(47):850–864.

[Kochetkov A.Ya. Mesozoic gold-bearing ore-magmatic systems of the Central Aldan. *Geology and Geophysics*. 2006;7(47):850–864. (In Russ.)]

13. Дворник Г.П. Золоторудные метасоматические формации Центрально-Алданского района. *Литосфера*. 2012;2:90–105.

[Dvornik G.P. Gold ore metasomatic formations of the Central Aldan region. *Lithosphere*. 2012;2:90–105. (In Russ.)]

14. Терехов А.В. Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Эльконского золото-уранового узла (Южная Якутия). Дис. на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ; 2012. 220 с.

[Terekhov A.V. *Ore potential of hydrothermal-metasomatic formations of the Elkon gold-uranium cluster (South Yakutia)*. Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences. St. Petersburg: VSEGEI; 2012. (In Russ.)]

15. Шатова Н.В. Рудоносность гидротермально-метасоматических образований Рябиного рудного поля (Южная Якутия). Дис. на соискание ученой степени канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ; 2016. 171 с.

[Shatova N.V. *Ore potential of hydrothermal-metasomatic formations of the Rowan ore field (South Yakutia)*. Dissertation for the degree of candidate of geological and mineralogical sciences. St. Petersburg: VSEGEI; 2016. (In Russ.)]

16. Киселев Г.Н. и др. Отчет о геологическом доизучении площади Южно-Алданского железорудного района в масштабе 1:50000 на листах О-51-83-В,Г; О-51-84-В,Г; О-51-93-В,Г; О-51-94-А,Б,В,Г; О-51-95-А,Б,В,Г; О-51-96-А,Б,В,Г. Отчет по результатам работ Эвотинской партии за 1978–1988. Чульман. 1988.

[Kiselev G.N. et al. *Report on the geological additional study of the area of the South Aldan iron ore region on a scale of 1: 50000 on sheets O-51-83-V.G; O-51-84-V.G; O-51-93-B.G; O-51-94-A.B.V.G; O-51-95-A.B.V.G; O-51-96-A.B.V.G. Report on the results of the work of the Evo-tinskaya party for 1978–1988*. Chulman. 1988. (In Russ.)]

17. Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral*. 2010;95(1): 185–187. doi:10.2138/am.2010.3371

18. *Петрографический кодекс России*. СПб.: ВСЕГЕИ. 2008. 200 с.

[*Petrographic code of Russia*. St. Petersburg: VSEGEI; 2008. (In Russ.)]

19. Wilson M. Review of igneous petrogenesis: a global tectonic approach. *Terra Nov*. 1989;1(2):218–222.

20. De la Roche H. et al. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature. *Chem. Geol*. 1980;29(1–4):183–210.

21. Whitford D.J., Nicholls I.A., Taylor S.R. Spatial variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contrib. to Mineral. Petrol.* Springer-Verlag. 1979;70(3):341–356.

22. Склярков Е.В., Гладкочук Д.П. *Интерпретация геохимических данных*. М.: Интернет инжиниринг; 2001. 288 с.

[Sklyarov E.V., Gladkochub D.P. *Interpretation of geochemical data*. Moscow: Internet engineering; 2001. (In Russ.)]

23. Таусон Л.В., Гундобин Г.М., Зорина Л.Д. *Геохимические поля рудно-магматических систем*. Новосибирск: Наука; 1987. 202 с.

[Tauson L.V., Gundobin G.M., Zorina L.D. *Geochemical fields of ore-magmatic systems*. Novosibirsk: Nauka; 1987. (In Russ.)]

24. Руб М.Г. и др. Щелочные элементы и стронций в рудоносных (Sn, W, Ta) дифференцированных магматических ассоциациях. *Докл. АН СССР*. 1984;6(268): 1463–1466.

[Rub M.G. and others. Alkaline elements and strontium in ore-bearing (Sn, W, Ta) differentiated igneous associations. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1984;6(268):1463–1466. (In Russ.)]

25. Балашов Ю.А. *Геохимия редкоземельных элементов*. М.: Наука; 1976. 267 с.

[Balashov Yu.A. *Geochemistry of rare earth elements*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)]

26. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ. Geological Society of London*. 1989;42(1):313–345.

27. Lightfoot P.C. et al. Remobilisation of the continental lithosphere by a mantle plume: major trace element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 1993; 114:171–188.

28. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier Inc. 2003;3–9:1–64.

29. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора, ее состав и эволюция*. М.: Мир; 1988. 380 с.

[Teylor S.R., Mak-Lennan S.M. *Continental crust, its composition and evolution*. Moscow: Mir; 1988. (In Russ.)]

#### Об авторах

ИВАНОВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4216-8421>, e-mail: [aiivanov@diamond.ysn.ru](mailto:aiivanov@diamond.ysn.ru)

ИВАНОВ Мичил Спартакевич, инженер 1 категории, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, e-mail: [ivanov.michil@bk.ru](mailto:ivanov.michil@bk.ru)

*А. И. Иванов и др. ♦ Петро- и геохимический состав мезозойских магматических пород...*

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>,  
e-mail: [ai.zhuravlevgeo@gmail.com](mailto:ai.zhuravlevgeo@gmail.com)

*Аффилиация*

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

*About the authors*

IVANOV, Alexei Ivanovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4216-8421>, e-mail: [aiivanov@diamond.ysn.ru](mailto:aiivanov@diamond.ysn.ru)

IVANOV, Michil Spartakovich, Engineer (1st category), <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, e-mail: [ivanov.michil@bk.ru](mailto:ivanov.michil@bk.ru)

ZHURAVLEV, Anatolii Ivanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, e-mail: [ai.zhuravlevgeo@gmail.com](mailto:ai.zhuravlevgeo@gmail.com)

*Affiliation*

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

*Поступила в редакцию / Submitted 16.02/2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 20.04.2022*

*Принята к публикации / Accepted 03.06.2022*

## О необходимости разработки Программы комплексного освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия)

В. Л. Яковлев

*Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

✉ [\\*yakovlev@igduran.ru](mailto:*yakovlev@igduran.ru)

### Аннотация

Рассмотрены проблемы комплексного освоения недр Республики Саха (Якутия) и предложены пути их решения. Приведена оценка минерально-сырьевого потенциала месторождений республики. Обоснована необходимость своевременной корректировки стратегии развития минерально-сырьевой базы России и методологии обоснования комплексного освоения месторождений твердых полезных ископаемых с учетом изменения требований мирового рынка и внутренних потребностей. Аргументирована целесообразность разработки Программы комплексного освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия) на период до 2030–2050 гг.

**Ключевые слова:** минерально-сырьевые ресурсы, технологическое развитие, комплексное освоение, Арктическая зона, стратегия развития, минерально-сырьевая база, минерально-сырьевой потенциал

**Для цитирования:** Яковлев В.Л. О необходимости разработки Программы комплексного освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022; 27(3):363–369. [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-363–369](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-363-369)

## Integrated development program for mineral resource base in the Republic of Sakha (Yakutia)

V. L. Yakovlev

*The Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation*

✉ [\\*yakovlev@igduran.ru](mailto:*yakovlev@igduran.ru)

### Abstract

In this article we investigate the problems of the mineral deposits development in the Republic of Sakha (Yakutia). Moreover, the relevance of the strategy revision for the development of mineral resources in Russia is discussed. We justify the methodology for the integrated development of the solid mineral deposits, taking into account the changing requirements of the world market and domestic needs. The demand for the program development of the mineral resources in the Republic of Sakha (Yakutia) for the period 2030–2050 is validated.

**Keywords:** mineral resources, technological development, complex development, Arctic zone, development strategy, mineral resource base, mineral resource potential

**For citation:** Yakovlev V.L. Integrated development program for mineral resource base in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):363–369. (In Russ.) [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-363–369](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-363-369)

Оценка минерально-сырьевого потенциала регионов Дальневосточной и Арктической зоны России, в том числе Республики Саха (Якутия), имеет весьма важное значение для обоснования перспектив расширения развития минерально-сырьевой базы и соответствующего развития горнодобывающих отраслей промышленности, в решающей степени определяющих будущее

распределение производственных мощностей регионов, имея в виду в первую очередь мощности по переработке минерально-сырьевых ресурсов, и в конечном счете, доходную часть бюджета.

Известно, что в Республике Саха (Якутия) находится 100 % запасов алмазов, значительная доля запасов сурьмы, железных руд, цветных и

**Современное состояние минерально-сырьевой базы  
месторождений Республики Саха (Якутия) на 01.01.2021 [5]**

Table 1

**The current state of the mineral deposits base in the Republic of Sakha (Yakutia) (dt. 01.01.2021) [5]**

Минеральное сырье / Mineral resource	Балансовые запасы / Balance reserves	Добыча / Mining	Прогнозные ресурсы P <sub>1</sub> / Forecast resources R <sub>1</sub>
Уголь	14,3 млрд т	18,0 млн т	44,1 млрд т
Алмазы	838,9 млн кар	33,3 млн кар	346,8 млн кар
Железные руды	7,3 млрд т	–	1,7 млрд т
Олово	764,4 тыс. т	–	359,1 тыс. т
Вольфрам (WO <sub>3</sub> )	132,4 тыс. т	–	4,4 тыс. т
Молибден	41,6 тыс. т	–	12,8 тыс. т
Золото	1796,8 т	51,7 т	743,8 т
Серебро	19,5 тыс. т	154,4 т	21,5 тыс. т
Фосфатные руды P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	85,6 млн т	–	42 млн т
Редкоземельные металлы	39 млн т, (в т.ч. Томтор – 30,5 млн т)	–	0,5 млн т
Уран	382,8 тыс. т	34 т	–
Нефть	600 млн т	16 млн т	2,1 млрд т (прогнозируемые ресурсы D <sub>1</sub> +D <sub>2</sub> )
Газ	3104,7 млрд м <sup>3</sup>	6,9 млрд м <sup>3</sup>	10,5 трлн м <sup>3</sup> (прогнозируемые ресурсы D <sub>1</sub> +D <sub>2</sub> )

благородных металлов, гелия, нефти и газа Дальневосточного федерального округа РФ [1].

В соответствии с данными Государственного доклада «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» [5] Республика Саха (Якутия) располагает значительными балансовыми запасами угля, алмазов, железных руд, олова, вольфрама, молибдена, золота, серебра, фосфатных руд, урана, нефти и газа, однако многие из видов минерального сырья (вольфрам, молибден, фосфатные руды, редкоземельные металлы) не добываются (табл. 1).

Анализ существующей минерально-сырьевой базы по некоторым видам полезных ископаемых показывает, что Якутия является крупнейшей оловоносной провинцией страны, где сосредоточены крупные рудные и россыпные месторождения. Кондиционные запасы угля в Южно-Якутском бассейне (24 млрд т) и Ленского бассейна бурых углей по количеству запасов не имеют равных в мире (1640 млрд т). Наиболее привлекательны железорудные месторождения. В лучших из железорудных месторождений Якутии среднее содержание валового железа ниже 45 % (Таежное, Пионерское, Десовское) и 30 % (Та-

рынахское, Горкитское, Ималыкское). В конце 2022 г. Якутская рудная компания ПАО «Мечел» планирует начать добывать железную руду на Сиваглинском месторождении. Ожидается рост интереса в мире к железорудным проектам. В последнее время устойчиво растет потребность к освоению редких и редкоземельных месторождений, типа Томтор. Список наиболее перспективных видов минерального сырья можно продолжить.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в долгосрочной перспективе, учитывая, что для всех субъектов ДФО, в том числе Якутии, характерно наибольшее разнообразие металлических полезных ископаемых, дальнейшая разведка, оценка и освоение запасов месторождений является одним из важнейших направлений стратегии социально-экономического развития Республики Саха (Якутия), минерально-сырьевой потенциал которой составляет три четверти потенциала Дальневосточного федерального округа.

В целом, если говорить о качестве запасов месторождений полезных ископаемых Якутии, то экспертами отмечается, что оно сопоставимо со средним качеством запасов в мире, однако сложность природно-климатических условий,

отсутствие развитой инфраструктуры, удаленность перерабатывающих производств делают большинство месторождений неконкурентоспособными, а переход на мировые цены может привести к сокращению балансовых запасов на 30–70 % [2, 3].

Особо это относится к качеству каменных углей, в большинстве они пригодны для коксования, но по горно-геологическим и физико-географическим условиям уступают месторождениям других продуцентов каменного угля. По бурым углям, качественные характеристики их существенно уступают мировым аналогам: зольность 13–20 %, влажность до 30 % и более; угли переизмельчиваются при транспортировке, подвержены окислению и самовозгоранию, а калорийность в 1,5–1,7 раза ниже калорийности каменных.

В целом, общемировая тенденция по ухудшению качества минерального сырья по мере наращивания темпов их освоения характерна и для территории Якутии. Особенно характерна острая проблема по наращиванию минерально-сырьевой базы алмазов. Если кардинально не решить эту проблему в ближайшее время, то же коснется «традиционных» месторождений благородных металлов, где в последнее время наиболее активно проявляются последствия их интенсивного освоения.

Если говорить о перспективах расширения минерально-сырьевой базы республики, то безусловно, они есть – с учетом относительной геологической недоизученности огромных территорий, при наличии наработанных геологами методов определения перспективности территорий по тем или иным видам полезных ископаемых. Для этого потребуются кардинальная корректировка деятельности и значительное усиление геологоразведочных работ.

Тем не менее, существующие сырьевые ресурсы арктической зоны РФ достаточно велики: газ и нефть – 60 %, никель – 98, платиновые металлы – 87, редкоземельные металлы – 66, олово – 49, хром – 31 %, поэтому освоение их минерально-сырьевого потенциала является важнейшим условием стратегического обеспечения экономической и геополитической безопасности России.

Республика Саха (Якутия) относится к числу регионов с доминирующим в структуре экономики природоэксплуатирующим сектором, в том числе, минерально-сырьевым, что позволяет отнести ее к регионам ресурсного типа. Основная

роль придается добывающей промышленности, но и здесь немало проблем, в том числе накопленных за последнее время. В свое время горнодобывающая промышленность довольно синхронно развивалась с темпами наращивания минерально-сырьевой базы.

Здесь уместно отметить, что в работе «Перспективы освоения месторождений в Арктической зоне Республики Саха (Якутия)» [6] автор приводит весьма важные сведения об истории развития исследований и развития горнодобывающей промышленности.

В 1943 г. на Северо-Востоке Якутии были открыты богатые россыпи олова бассейнов рек Куйгинка, Уянди, Иргичан, а позднее — крупные залежи олова месторождения Депутатское. В 1951 г. были добыты первые 132 т россыпного олова. С тех пор добыча этого стратегического металла быстро росла. Вначале были созданы три прииска, которые затем объединились в Депутатский ГОК. С тех пор Якутия стала самой крупной сырьевой базой олова в стране. В конце 1989 г. был введен в строй Депутатский рудник на базе одноименного гигантского месторождения, с освоением которого страна перестала импортировать олово. В этот период на территории Арктической зоны республики в год добывалось более 5 тыс. т олова и попутно 350 т вольфрама.

В 1960-х годах были открыты богатейшие Куларские промышленные россыпи золота. В 1963 г. для разработки этих россыпей организован самый северный прииск страны — Кулар (позднее ГОК «Куларзолото»).

Проблемы у горной промышленности региона обострились в 1990-х годах, когда сократилось до минимума государственное бюджетное финансирование. В 1994 г. ГОК «Куларзолото» был признан банкротом и ликвидирован. Депутатский ГОК работал до 2009 г.

В 1990-е годы при переходе от плановой к рыночной экономике не было разработано научное обоснование мероприятий переходных процессов в развитии методологии комплексного освоения недр, в особенности твердых полезных ископаемых. Министерство геологии, отраслевые министерства угольной промышленности, черной и цветной металлургии были ликвидированы, сырьевая направленность экономики не попала в разряд приоритетной.

В сожалению в последние годы мы не научились эффективно управлять важнейшими направлениями развития, к числу которых относится

горнодобывающая промышленность. Свидетельством чего является красноречивый факт, что Россией сегодня импортируется более 1/3 видов стратегического сырья (марганец, хром, литий, бериллий, рений – 100 %, цирконий – 98, титан – 95, олово – 70, бокситы – 64, молибден – 45 %).

Даже по этим видам Якутия могла бы существенно удовлетворить потребности страны. Но имеющиеся запасы либо имеют низкое качество, либо расположены в недоступных территориях, прежде всего в Дальневосточной Арктической зоне России, где отсутствует или недостаточно развита инфраструктура, удалены главные потребители сырья, имеются проблемы с технологиями добычи и переработки.

Успешное решение проблем технологического обеспечения стабилизации и развития горнодобывающей промышленности республики требует больших инвестиций по каждому принципиально перспективному объекту.

В настоящее время необходима разработка и реализация политики полного обеспечения России собственным минеральным сырьем.

При этом одной из основных задач ресурсной экономики является глубокое и детальное изучение роли природных ресурсов в экономике на современном этапе развития страны. При оценке состояния и исследовании особенностей, проблем и перспектив освоения минерально-сырьевых ресурсов России и ее «сырьевых регионов», к числу которых относится Республика Саха (Якутия), требуется изменение методического подхода, затрагивающего пять основных аспектов: социально-политический, социально-экономический, сырьевой, технологический и экологический [2].

Нужно подчеркнуть, что одним из условий рационального развития всего горнодобывающего комплекса является активное, деятельное и заинтересованное участие регионов.

В начале 90-х годов в Республике добывалось почти 100 % алмазов России, около 100 % сурьмы и 30 % олова, более 25 % золота от общероссийских, около 15 млн т угля, развивалась добыча газа и нефти, но население республики не знало ни объемов, ни стоимости добываемого минерального сырья [3, 4]. А самое главное, это не сказалось на развитии территории и на формировании необходимой инфраструктуры, о котором много говорится в качестве одной из причин ненадлежащего освоения месторождений. Настало время научиться управлять в направле-

нии, обеспечивающем, в том числе, их лучшее использование (в интересах как ныне живущих, так и будущих поколений).

Если говорить о человеческом ракурсе вопроса, то основная часть коренного населения Якутии живет и трудится в сельской местности, где условия и качество жизни значительно ниже, чем в промышленных поселках и городах, так как жизнеобеспечение фактически зависит от доходов, получаемых от горнодобывающей промышленности. Это также является следствием нерационального и неэффективного использования природных ресурсов региона, аспектов методического подхода к социально-экономической стороне вопроса.

Распоряжением Правительства Российской Федерации № 2914-р от 22 декабря 2018 г. утверждена Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Минприроды России было поручено разработать и утвердить в трехмесячный срок со дня вступления в силу данного распоряжения план мероприятий по реализации Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года и обеспечить его выполнение. С методологической точки зрения у утвержденной (но не реализуемой) «стратегии» есть два недостатка:

- в ней нет механизма (методики) реализации в принципе правильно сформулированных идеи, целей и задач выбора стратегии освоения минерально-сырьевых ресурсов;

- основное внимание уделено геологическому изучению недр и оценке современного состояния с обеспеченностью разведанными запасами различных видов минерального сырья, без учета геолого-технологического, природного и социально-экономических условий комплексного освоения месторождений сырьевых регионов России.

Учитывая, что в пункте 3 Распоряжения № 2914-р органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации рекомендовано в пределах своей компетенции руководствоваться положениями Стратегии при разработке и реализации программ социально-экономического развития субъектов Российской Федерации, целесообразно:

- разработать Программу освоения и развития минерально-сырьевой базы Республики Саха (Якутия) на период до 2030–2050 гг.;

- провести комплексную геолого-экономическую оценку месторождений, находящихся в

эксплуатации, проектируемых и подлежащих доразведке и последующему освоению с учетом запасов по категориям А, В и С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>;

– выделить объекты первоочередного освоения по основным видам минерального сырья с учетом состояния и перспектив развития инфраструктуры, отдавая предпочтение комплексному освоению территорий путем создания минерально-сырьевых центров.

Многолетний опыт участия ИГД УрО РАН в выполнении фундаментальных и прикладных ис-

следований по программам Президиума РАН, Отделения наук о Земле РАН, междисциплинарным и интеграционным проектам с институтами Уральского, Сибирского и Дальневосточного отделений РАН позволяет утверждать о необходимости коренного пересмотра стратегии развития минерально-сырьевой базы России и методологии обоснования комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых.

На основе анализа исторического опыта развития научных идей и методологических подходов

Таблица 2

**Основы, цели и задачи выбора стратегии освоения минерально-сырьевых ресурсов**

Table 2

**Background, purpose and objectives for choosing a strategy for mineral resources development**

Основы / Background	Уровень / Level	Цели и задачи / Purpose and objectives
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ мировые тенденции развития экономики, производства и потребления минерального сырья;</li> <li>■ ресурсный потенциал (природный, в том числе недровый, материальный, энергетический, человеческий, финансовый и др.);</li> <li>■ долгосрочная программа социально-экономического развития страны</li> </ul>	Государство	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ разработка законодательной базы (Закон о недрах);</li> <li>■ разработка стратегии сырьевого обеспечения страны с учетом основных тенденций развития мировой экономики</li> <li>■ выработка долгосрочной политики развития регионов, отраслей</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ роль и место округа в долгосрочной программе социально-экономического развития страны;</li> <li>■ существующие и перспективные хозяйственные связи между субъектами Федерации</li> </ul>	Федеральный округ	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ концепции развития горно-металлургического и топливно-энергетического комплексов;</li> <li>■ схемы размещения и развития производительных сил на средне- и долгосрочную перспективу;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ природный потенциал;</li> <li>■ географические и социально-экономические особенности региона;</li> <li>■ наличие утвержденных и прогнозных запасов полезных ископаемых;</li> <li>■ сложившаяся структура развития субъектов региона и межсубъектных связей</li> </ul>	Регион	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ подзаконные акты о недропользовании</li> <li>■ целевые программы кооперации</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ долгосрочная программа социально-экономического развития;</li> <li>■ сложившаяся структура производства;</li> <li>■ ресурсный потенциал;</li> <li>■ состояние и перспективы развития основных отраслей производства</li> </ul>	Субъект	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ программа развития и поддержания сырьевой базы;</li> <li>■ наличие лицензий на право разработки месторождений;</li> <li>■ финансовые возможности;</li> <li>■ нормативно-законодательные акты о недропользовании</li> </ul>	Недропользователь	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ эффективная разработка месторождений (бизнес-планы, проекты, планы развития)</li> </ul>

к обоснованию технологий и параметров горных работ, результатов фундаментальных и прикладных исследований сформулировано определение инновационного базиса – как научно-технологической основы стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья, включающего обоснование необходимости нового методологического подхода к решению проблем комплексного освоения недр, основанного на принципах системности, комплексности, междисциплинарности и инновационной направленности с учетом особенностей проектирования освоения новых месторождений, планировании и управлении технологическими процессами на действующих горнодобывающих предприятиях [7, 9].

В качестве основ, целей и задач при выборе стратегии освоения могут быть учтены сведения, приведенные в табл. 2.

В статье предложены новые подходы к освоению минерально-сырьевых ресурсов северных и северо-восточных регионов России, соответствующие условиям Республики Саха (Якутия):

- разработка стратегии ускоренного поэтапного освоения недр региона: комплексное изучение и разведка выявленных месторождений, создание системы геоинформационного обеспечения с целью моделирования месторождений и программных комплексов для решения проблем создания горнотехнических систем;
- обеспечение принципа комплексного освоения территорий;
- организация минерально-сырьевых центров и налаживание открытой инфраструктуры эксплуатирующих предприятий;
- применение техники большой единичной мощности с целью снижения численности производственного персонала и, как следствие, повышения производительности труда;
- широкое применение покупных услуг (аутсорсинг) и арендных предприятий при выполнении вспомогательных процессов, напрямую не связанных с основным производством.

В процессе исследований теоретические изыскания сопровождались апробацией сформулированных подходов и методик. В качестве новых источников минерального сырья для промышленного освоения выделен ряд перспективных месторождений, для которых разработаны технико-экономические обоснования (ТЭО) кондиций, технико-экономические предложения (ТЭП) по освоению, технологические регламенты и проекты их разработки (Эльгинское каменноуголь-

ное, Тарыннахское, Горкитское, Гаринское железорудные месторождения).

Представленные рекомендации по подходу и освоению минерально-сырьевых ресурсов северных и северо-восточных регионов России обосновывают необходимость их учета при разработке Программы комплексного социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) на период до 2030–2050 гг.

### Список литературы / References

1. Яковлев В.Л., Яковлев В.А. Особенности методологического подхода к оценке минерально-сырьевого потенциала регионов Арктической зоны. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018.24(2):49–57. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-24-2-49-57.

[Yakovlev V.L., Yakovlev V.A. Features of methodological approach to assessment of mineral and raw material potential of Arctic regions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018.24(2):49–57. (In Russ.) DOI: 10.31242/2618-9712-2018-24-2-49-57]

2. Батугин С.А., Яковлев В.Л. *Закономерности развития горного дела*. Отв. ред. Чемезов Е.Н. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1992. 116 с.

[Batugin S.A., Yakovlev V.L. *Patterns of mining development*. Ed. Chemezov Ye.N. Yakutsk. YaNTs SO RAN; 1992.116 p. (In Russ.)]

3. Яковлев В.Л., Батугин С.А. Особенности освоения минерально-сырьевых ресурсов Якутии на современном этапе. *Горное дело: проблемы и перспективы: сборник статей*. Якутск: Сахаполиграфиздат. 1994:24–39.

[Yakovlev V.L., Batugin S.A. Features of mineral resources development in Yakutia at the present stage. *Gornoe delo: problemy i perspektivy: sbornik statey*. Yakutsk: Sakhapoligrafizdat. 1994:24–39. (In Russ.)]

4. Батугин С.А., Зубков В.П., Новопашин М.Д., Ткач С.М. Минерально-сырьевой комплекс Якутии на пути адаптации к условиям кардинальных перемен. *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр*. 2004;2(92):71–86.

[Batugin S.A., Zubkov V.P., Novopashin M.D., Tkach S.M. Yakutia mineral resource complex to its way to cardinal changes adaptation. *Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya neдр*. 2004; 2(92):71–86.]

5. *Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году»*. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. М.; 2021. 572 с.

[*National report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020*. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Moscow; 2021. 572 p. (In Russ.)]

6. Волков А.В. Перспективы освоения месторождений стратегических металлов в Арктической зоне

Республики Саха (Якутия). *Золото и технологии*. 2020;(1):50–69.

[Volkov V.A. Prospects for the development of deposits of strategic metals in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia). *Zoloto i tekhnologii* 2020;(1):50–69. (In Russ.)]

7. Яковлев В.Л., Корнилков С.В., Соколов И.В. *Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья*. Ред. член-корр. РАН Яковлев В.Л. Екатеринбург: УрО РАН; 2018. 360 с. DOI: 10.25635/IM.2018.18.37360

[Yakovlev V.L., Kornilkov S.V., Sokolov I.V. *The innovative basis of the integrated development strategy of the mineral resources*. Ed. by Yakovlev V.L., Corresponding member, RAS. Yekaterinburg: UrO RAN; 2018. 360 p. (In Russ.) DOI: 10.25635/IM.2018.18.37360]

8. Яковлев В.Л. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии ком-*

*плексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН; 2019. 284 с. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311

[Yakovlev V.L. *The study of transients as a new direction in the methodology of geo-resources integrated development*. Yekaterinburg: UrO RAN; 2019; 284 p. DOI: 10.25635/IM.2020.54.57311]

9. Яковлев В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых. *Горная промышленность*. 2022 (1S):34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

[Yakovlev V.L. Key stages and results of research to formulate methodological basis for the strategy to develop mining systems for deep-seated deposits of solid minerals. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):34–45. (In Russ.)] DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

#### *Об авторе*

ЯКОВЛЕВ Виктор Леонтьевич, член-корр. РАН, академик АН РС(Я), доктор технических наук, профессор, <http://orcid.org/0000-0001-5860-9626>, e-mail: [yakovlev@igduran.ru](mailto:yakovlev@igduran.ru)

#### *Аффилиация*

Институт горного дела УрО РАН, 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58

#### *About the author*

YAKOVLEV, Victor Leontyevich, Corresponding member of RAS, Professor, <http://orcid.org/0000-0001-5860-9626>, e-mail: [yakovlev@igduran.ru](mailto:yakovlev@igduran.ru)

#### *Affiliation*

Institute of Mining of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 58 Mamina-Sibiryaka str., Yekaterinburg 620075, Russian Federation

*Поступила в редакцию / Submitted 09.06.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 06.07.2022*

*Принята к публикации / Accepted 28.07.2022*

## *Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение*

УДК 551.345.2

[https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370–380](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380)

### **Формирование и распространение многолетней мерзлоты и таликов под руслами протоков в дельте р. Лена**

**Г. Т. Максимов<sup>1</sup>, М. Н. Григорьев<sup>1</sup>, Д. Ю. Большианов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

✉ [maximov@mpi.ysn.ru](mailto:maximov@mpi.ysn.ru)

#### **Аннотация**

Дельты арктических рек являются ареной активного новообразования многолетнемерзлых пород и, в то же время, местом формирования таликовых зон. В связи с широким распространением в арктических дельтах мелководий под промерзающими зимой до дна руслами, площадь распространения новообразованной подводной мерзлоты значительно превышает площадь талых подрусовых массивов. В ходе полевых исследований в дельте р. Лена выявлены особенности и закономерности формирования как новообразованной мерзлоты в пределах протоков, так и подрусовых таликов. На основании буровых, геофизических и батиметрических данных, полученных в ходе экспедиционных исследований в 2014–2020 гг., выяснено, что многолетняя мерзлота под руслами протоков практически всегда формируется при меженных глубинах менее 2–2,5 м, но может встречаться и на глубинах 3–5 м. Глубина протаивания подводной мерзлоты на мелководьях в летний период составляет от 1 до 3 м. Подрусовые талики повсеместно развиваются под протоками глубиной более 3 м. Установлено, что площадь участков многолетнего промерзания подрусовых грунтов в дельте преобладает над площадью участков, где формируются таликовые зоны. Полученные результаты могут быть использованы специалистами речного флота для уточнения изменений положения речных фарватеров в арктических дельтах.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, подрусовые талики, кровля подводной мерзлоты, новообразованные мерзлые породы, арктические дельты

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках базового проекта ИМЗ СО РАН «Деградация мерзлоты и трансформация рельефа в береговой зоне и на шельфе арктических морей восточного сектора РФ: динамика, прогноз и риски» (АААА-А20-120111690012-6).

**Благодарности.** Коллектив авторов благодарит за помощь и техническую поддержку состав научной исследовательской станции «Остров Самойловский».

**Для цитирования:** Максимов Г.Т., Григорьев М.Н., Большианов Д.Ю. Формирование и распространение многолетней мерзлоты и таликов под руслами протоков в дельте р. Лена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):370–380. [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370–380](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380)

### **Formation and distribution of permafrost and taliks under channels of the Lena River Delta**

**G. T. Maksimov<sup>1</sup>, M. N. Grigoriev<sup>1</sup>, D. Yu. Bolshiyonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation*

✉ [maximov@mpi.ysn.ru](mailto:maximov@mpi.ysn.ru)

#### **Abstract**

The Arctic deltas represent the scene for active permafrost formation and, at the same time, the place for talik zones development. Due to the wide distribution of shallow waters in the Arctic deltas under channels freezing to the bottom in winter, the area of newly formed underwater permafrost significantly exceeds the area of thawed under-channel massifs. During the field research in the Lena River Delta we have revealed features and patterns of formation of both

newly formed permafrost within the channels and under-channel taliks. On the basis of drilling, geophysical and bathymetric data obtained in the course of expedition research in 2014–2020, we have found that permafrost under the channels almost always forms at low water depths of less than 2–2.5 m, but can also occur at depths of 3–5 m. The depth of thawing of underwater permafrost in shallow waters in summer reaches from 1 to 3 m. Under-channel taliks develop under channels with a depth of more than 3 m, where talik zones are formed. The results obtained can be used by river fleet specialists to clarify changes in the position of river fairways in the Arctic deltas

**Keywords:** permafrost, subaquatic taliks, subchannel permafrost table, permafrost aggradation, Arctic delta

**Funding.** This study was carried out within the Basic Project of Melnikov Permafrost Institute SB RAS (number AAAA-A20-120111690012-6).

**Acknowledgements.** The authors are grateful for the help and technical support to the staff of the scientific research station «Samoilovsky Island».

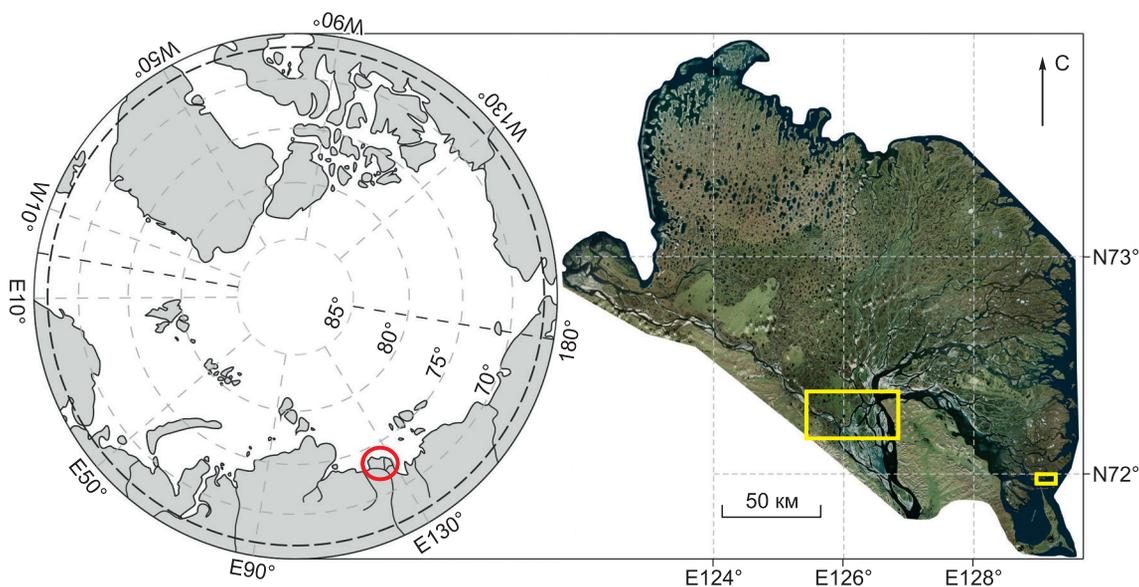
**For citation:** Maksimov G.T., Grigoriev M.N., Bolshiyarov D.Yu. Formation and distribution of permafrost and taliks under channels of the Lena River Delta. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):370–380. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380>

### Введение

В устьевых областях рек, впадающих в арктический бассейн, под относительно мелководными водными артериями формируются как многолетнемерзлые породы, так и таликовые зоны. Особенно широко распространены такие формирования в дельтах Восточного сектора Российской Арктики, где глубины проток при прогрессирующих бифуркациях русел по большей части не превышают первых метров. Характер распространения многолетнемерзлых пород и особенности развития таликовых зон под протоками русел в арктических дельтах почти не изучены. Прежде такие исследования проводились лишь на отдельных участках вблизи мор-

ского края дельт рек Яна, Колыма и Маккензи, где влияние морского засоления на формирование подводных многолетнемерзлых пород чрезвычайно велико [1–4].

Работы по изучению субаквальных многолетнемерзлых пород, а также особенностей формирования таликов в дельте р. Лена проводятся Институтом мерзлотоведения СО РАН с 2014 г. Изучение субаквальных мерзлых пород и таликов под руслами проток проводились в центральной части дельты р. Лена преимущественно на Большой Туматской и Оленекской протоках, в приустьевой зоне Быковской протоки, а также в других мелких протоках (рис. 1). Эти участки соответствует типичным для арктической дельты природным условиям.



**Рис. 1.** Расположение района исследований на карте-схеме Арктики. Красный круг – дельта р. Лена; желтые рамки – участки работ.

**Fig. 1.** Location of the study area on the Arctic circle map. Red circle – Lena River Delta; yellow frames – worksites.

Основная цель настоящих исследований – изучить особенности формирования многолетнемерзлых пород и развития таликовых зон под руслами проток и выявить основные закономерности эволюции субаквальной мерзлоты и подрусловых таликов в пределах дельты Лены.

#### Район и методика исследований

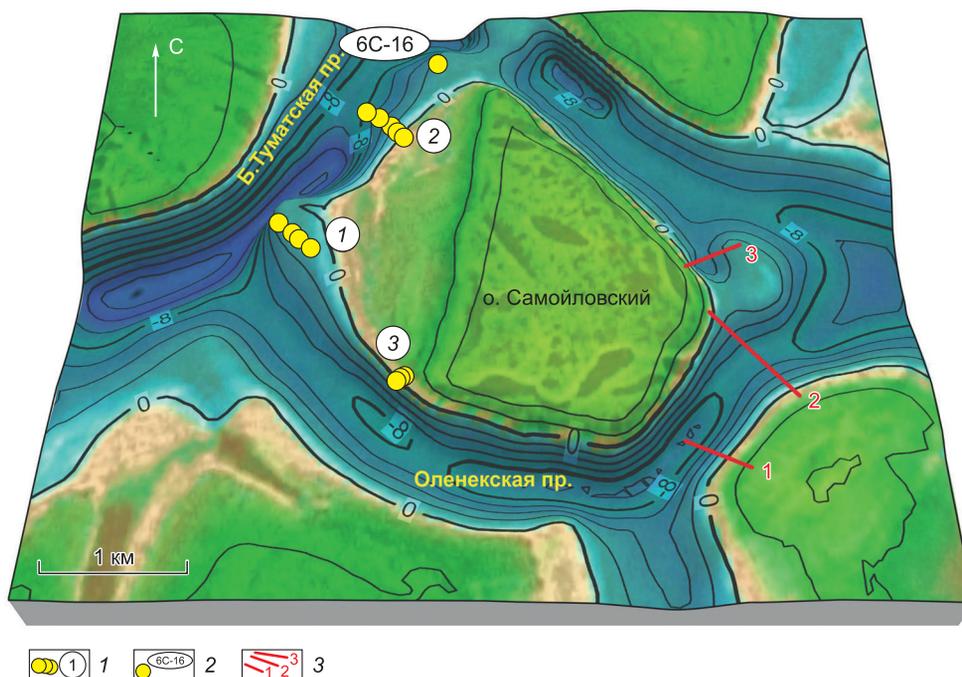
**Характеристика района работ.** Дельта р. Лена является крупнейшей дельтой в Арктике и представляет собой в основном аккумулятивное формирование, выступающее в море и состоящее из многочисленных островов, сложенных аллювиально-дельтовыми отложениями, а также останцов позднеплейстоценовой равнины и немногочисленных скальных выступов. Площадь дельты составляет около 30 тыс. км<sup>2</sup>. Климат дельты – арктический континентальный. Среднегодовая температура воздуха –12,5 °С, а годовое количество осадков составляет 230 мм [5].

Река в вершине дельты разделяется на пять основных рукавов, а затем на десятки средних и сотни мелких проток, общая протяженность которых составляет более 6200 км. 70 % стока приходится на Трофимовскую протоку, 15 – на Быковскую, 10 – на Оленекскую и 5 % – на Ту-

матскую протоки [6, 7]. Объем годового стока р. Лена, по данным гидропоста «Кюсюр», составляет около 542 км<sup>3</sup> в год, основной объем воды (более 70 %) сбрасывается в летние месяцы, а за зимний период (ноябрь–май) лишь 9 %. Средняя многолетняя мутность воды составляет около 36,5 г/м<sup>3</sup> [8]. Сток взвешенных наносов составляет 20,71 млн т в год. Доля влекомых наносов, поступающих в дельту, оценивается примерно в 15 млн т в год [9, 10].

**Методика работ.** Исследования субаквальных многолетнемерзлых толщ проводились с помощью бурения, выполнявшегося в весеннее время с речного льда колонковым способом с продувкой и без нее. Использовались буровые установки УРБ-4Т, КМБ-3М и УКБ 12/25.

В 2014–2019 гг. были пробурены буровые профили на Большой Туматской и Оленекской протоках (рис. 2). Керновый материал документировался и затем транспортировался в г. Якутск с сохранением талого или мерзлого состояния. Лабораторные определения физических свойств пород и гранулометрический состав выполнялись в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН [11, 12].



**Рис. 2.** Результаты батиметрической съемки, интервал между горизонталями 2 м. 1 – буровой профиль; 2 – отдельная скважина; 3 – профили съемки донным щупом.

**Fig. 2.** Results of bathymetric survey, interval between horizontals 2 m. 1 – drilling profile; 2 – single borehole; 3 – survey profiles with a bottom permafrost probe.

Температурные измерения выполнялись в обсаженных пластиковыми трубами скважинах при помощи логгерной системы ИРС-1 (ОАО «Фундаментпроект», Россия). Пределы допускаемой абсолютной погрешности логгера  $\pm 0,1$  °C в диапазоне температур от 0 до  $-20$  °C. Датчики температур устанавливались с шагом 1 м и с интервалом записи 2 ч.

В летние сезоны на протоках дельты с помощью GPS-эхолота (Garmin Echo 550) проводилась батиметрическая съемка, по результатам которой была построена схема глубин в центральном секторе дельты Лены. Также проводилась съемка положения кровли подводной мерзлоты на относительно мелководных протоках. Для ее фиксации на выбранных типовых профилях использовался специальный разборный донный щуп, длиной 10 метров. Такой щуп надежно фиксирует поверхность многолетней подводной мерзлоты под толщей талых донных осадков, в связи с особенностью конструкции нижнего наконечника щупа, представляющей собой лишь слегка заостренный выступ, который при входе в мерзлую толщу на 1–0,5 см передает по донному щупу специфичный «хруст». Это ощущение коренным образом отличается, например, от соприкосновения щупа с каменным или другим очень плотным препятствием в донном грунте.

### Результаты работ

Батиметрическая съемка, проведенная на протоках в центральной части дельты Лены, показывает достаточно пестрое чередование глубоких и отмельных участков протоков (см. рис. 2). Наиболее детально исследованы участки вблизи о. Самойловский. Максимальные глубины на фарватерах этого района изменяются от 7 до 12 м. На северном, восточном и на западном мысах о. Самойловский наблюдаются растущие отмели. Площадь мелководий на исследуемом участке сравнительно невелика, так как он расположен в узле разветвления дельты на крупные рукава. В летнее время расход воды в них варьирует в пределах  $1700$ – $5000$  м<sup>3</sup>/с. [13].

Литологический состав и температура пород представлена на разрезах по данным бурения трех профилей (рис. 3–5). Скважины бурового профиля 1 вскрывают русловые отложения, представленные чередованием песков различной зернистости и алевроитов, а также слоями древесного детрита, мощностью до 1,8 м. В скважине 1с-14 отмечаются серые пески горизон-

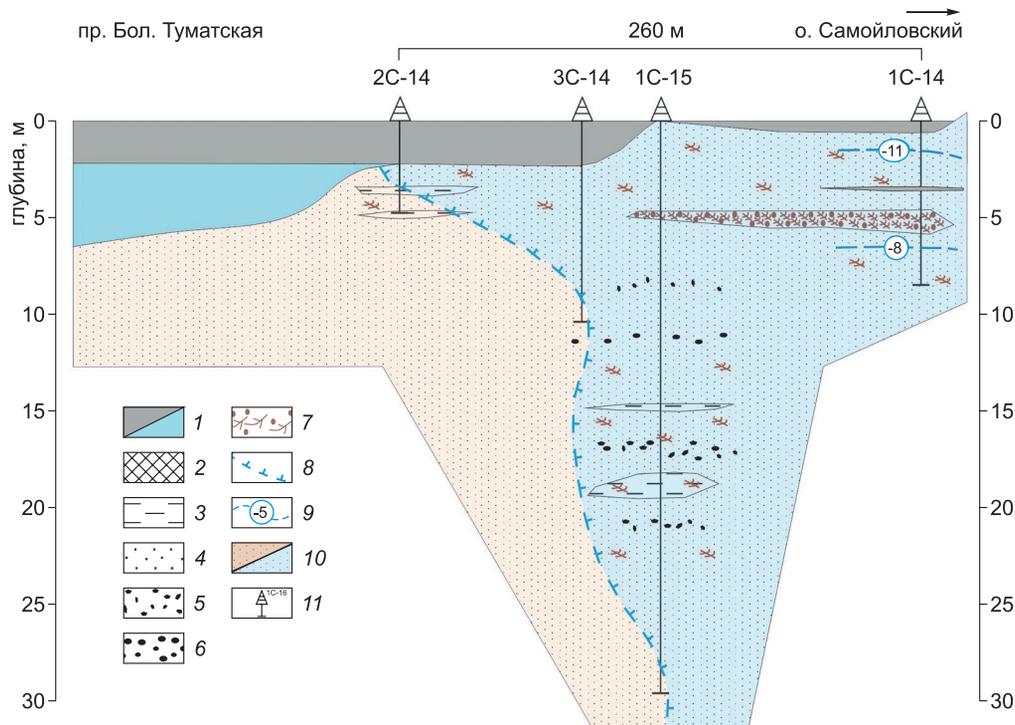
тально- и косослоистые с включениями органических остатков в виде нитевидных корешков, фрагментов древесины и отдельных гнезд гумусированного органического вещества. Подрусловые толщи в большинстве сложены песками, для которых характерна массивная криотекстура. Среднее значение в них весовой влажности составляет 23,5 %. В песках отмечаются тонкие прослой суглинков с тонкошлировой криотекстурой и весовой влажностью 70–100 %. В интервале глубин 5,0–6,5 м в скважине 1с-14, а также в интервале глубин 4,5–5,3 м в скважине 1с-15 отмечается прослой древесного детрита, сцементированный льдом и мелкозернистым песком.

Буровой профиль 2 выполнен в пределах приглубой части протоки Большая Туматская. Скважины 1с-16, 2с-16 и 3с-16 пробурены по талым донным отложениям, а скважины 4с-16 и SAM 2 вскрывают боковой контакт подруслового талика с многолетнемерзлыми породами. По всей толще наблюдаются горизонты древесного детрита мощностью от 2–3 мм до 40–60 см. По завершении бурения скважины 1с-16 после подъема бурового снаряда был зафиксирован длительный (около 30 мин) выброс метана в виде огненного факела из устья скважины (рис. 6). Это явление, по-видимому, связано с бактериальным разложением больших объемов органического материала, выявленного в подруслового таликовой зоне. При вскрытии бурением придонных илистых горизонтов, препятствующих свободной эмиссии газа в водную среду и атмосферу, метан получает способность к высвобождению. Такие выбросы газа довольно часто встречаются в исследуемом регионе при бурении не только подруслевых толщ, но также подозерных, подлагунных и прибрежно-шельфовых.

Буровой профиль 3 выполнен на юго-западной окраине о. Самойловский, вблизи глубоководной части Оленекской протоки. Отложения представлены пестрым чередованием песка разной зернистости и суглинков, а также отмечаются небольшие прослой торфа. В песках криотекстура массивная, а в прослоях суглинков шлировая.

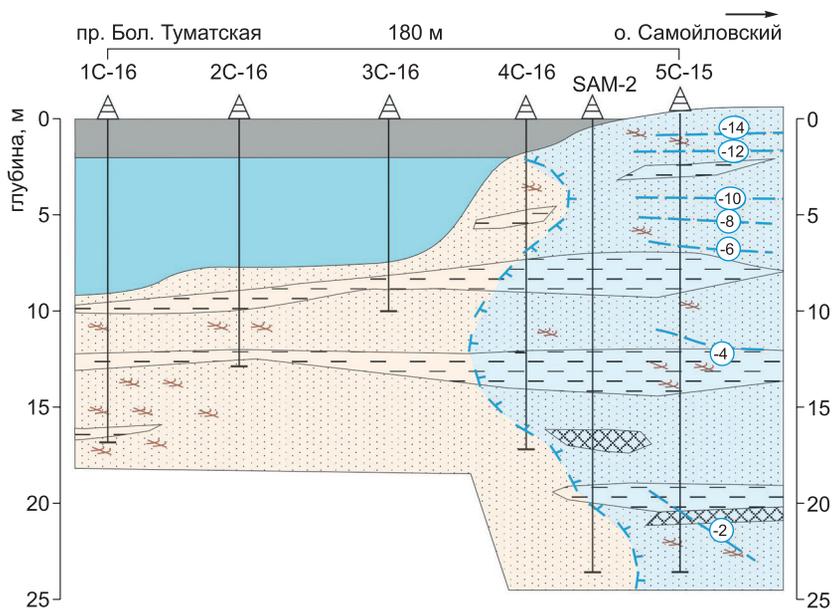
Анализ результатов бурения всех профилей показал наличие характерных таликовых «карманов», выгнутых в сторону берега, расположенных на глубине 2–10 м ниже уровня протока, а также существование таких карманов на глубине 15–30 м.

Согласно результатам геофизических работ [14], выполненных вдоль буровых профилей



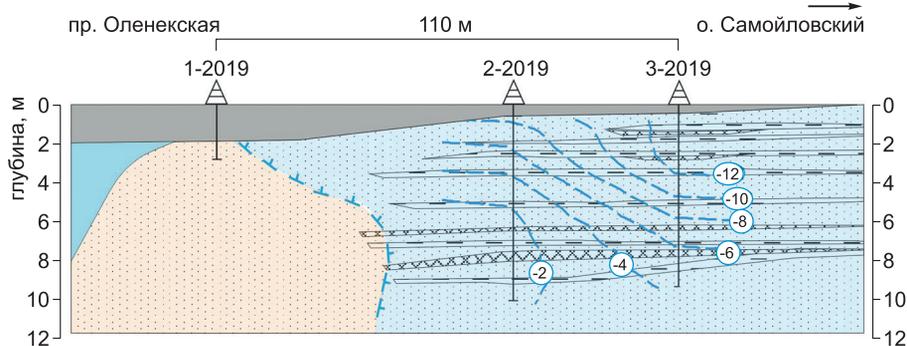
**Рис. 3.** Схема разреза по буровому профилю 1, мелководная часть протоки Бол. Туматская. 1 – вода/лед; 2 – торф; 3 – алеврит; 4 – песок; 5 – дресва; 6 – галька; 7 – древесный детрит; 8 – граница мерзлых пород; 9 – изотерма; 10 – талые/мерзлые породы; 11 – скважина.

**Fig. 3.** Schematic section of the drilling profile 1, shallow part of Bolshaya Tumatskaya channel. 1 – water/ice; 2 – peat; 3 – aleurite; 4 – sand; 5 – grass; 6 – pebbles; 7 – tree detritus; 8 – border of frozen rocks; 9 – isotherm; 10 – thawed/frozen rocks; 11 – well.



**Рис. 4.** Схема разреза по буровому профилю 2, приглубая часть протоки Бол. Туматская, условные обозначения приведены на рис. 3.

**Fig. 4.** Schematic section of the drilling profile 2, the deep part of Bolshaya Tumatskaya channel. Legend is shown in fig. 3.



**Рис. 5.** Схема разреза по буровому профилю 3, мелководная часть Оленекской протоки, условные обозначения приведены на рис. 3.

**Fig. 5.** Schematic section of the drilling profile 3, shallow part of Olenekskaya channel. Legend is shown in fig. 3.

на Большой Туматской протоке, подрусловой талик под ней несквозной и замыкается на глубине 40–60 м от дна протоки.

Температура многолетнемерзлых пород на прирусловых отмелях варьирует в широком диапазоне в зависимости от мощности речного льда, толщины снежного покрова и теплового влияния реки. В скважине 1с-14 (профиль 1) температура пород на глубине 1,5 м составила  $-11^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 6,5 м  $-8^{\circ}\text{C}$ . В скважине 2-2019 (профиль 3) температура пород сравнительно выше, чем в других скважинах. Это можно объяснить наличием на этом участке плотного снежного покрова толщиной 0,5 м и близким расположением скважины к подрусловому талику. Температура пород в скважине 1с-14 (профиль 1) и 3-2019 (профиль 3) на глубине 6 м варьирует от  $-6,5$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ . Скважина 5с-16, пробуренная на песчаной отмели в 10 м от края ледового покрова русла, несмотря на ее близость к реке, характеризуется весьма низкой температурой от  $-16,2$  до  $-11,2^{\circ}\text{C}$  в верхней части ее разреза. Это объясняется полным отсутствием здесь снежного покрова из-за ветрового раздува в течение зимнего периода. С глубины 10 м до 25 м температура пород повышается почти линейно от  $-5,8$  до  $-1,6^{\circ}\text{C}$  по мере приближения к границе подруслового талика, вскрытого скважиной Sam2 (профиль 2) на глубине 20 м. Согласно распределению температур пород на мелководьях, подрусловой талик начинает формироваться только в пределах относительно глубокой части протоки, с глубинами более 2–2,5 м.

Для выявления положения кровли подрусловой многолетней мерзлоты или глубин сезонно-



**Рис. 6.** Выброс природного газа из скважины 1с-16, поднимающегося из пробуренных талых подрусловых грунтов через толщу речной воды.

**Fig. 6.** The release of natural gas from the borehole 1с-16 rising from thawed subchannel soils through the river water column.

го протаивания донных отложений под протоками были выполнены измерения толщины талых донных грунтов с помощью ручного донного шупа, которые проводились в период максимального для арктического региона протаивания таких толщ в сентябре. Исследовались участки (рис. 7) протоки Ысы-Хая-Тебюлеге, соединяющейся с крупной Оленекской протокой, небольшая протока Систях-Ары-Уэся, профиль от северного мыса о. Сордох Ары до о. Сасыл-Ары, между о. Систях-Арыта и песками Соболя, несколько профилей у о. Самойловский и профиль на приустьевой части Быковской протоки. По результатам съемки было выявлено, что при глубинах воды 0,5–1,0 м, мощность сезонноталого



**Рис. 7.** Профили съемки донным щупом, спутниковый снимок Sentinel-2.; а – центральная часть дельты Лены; б – выход Быковской протоки в море Лаптевых.

**Fig. 7.** Bottom probe survey profiles, satellite image Sentinel-2. а – central part of the Lena Delta; б – exit of the Bykovskaya channel to the Laptev Sea.

слоя варьирует от 1,0 до 2,0 м (рис. 8). При глубине воды от 1,5 до 3 м кровля мерзлых пород залегает на 1,0–2,5 м метра ниже дна. В краевых зонах подруслового талика, при глубине воды более 3 м, кровля мерзлых пород фиксируется до глубины 1–5 м ниже дна. Наиболее глубокое залегание кровли многолетней мерзлоты зафиксировано на профиле 5 в середине протоки на донном валу на глубине 4–7 м, при толще воды 3 м. По-видимому, на относительно приглубших участках русел, при глубинах более 3 м, промерзание донного грунта через лед может происходить и на таких глубинах, поскольку уровень воды в протоках центральной части дельты к концу весны падает на 1,5–2 м.

### Дискуссия

Промерзание русловых отложений зависит от гидрологической обстановки (уровенный режим и толщина ледяного покрова), поскольку охлаждение донных осадков происходит через слой льда при зимней межени. На исследуемом участке дельты за зимний период (2008–2018 гг.) уровень воды в сравнении со среднелетним падает почти на 2,5 м, а толщина ледового покрова достигает более 2 м. Это обуславливает почти полное промерзание мелких и частичное глубоких протоков (рис. 9), чем объясняется формирование под протоками мерзлых пород до 3–5 м. Мерзлые осередки не успевают деградировать за лет-

ний сезон в связи с тем, что темп оттаивания под водой в арктических условиях невелик и в среднем составляет около 0.2–0.4 м/год [15].

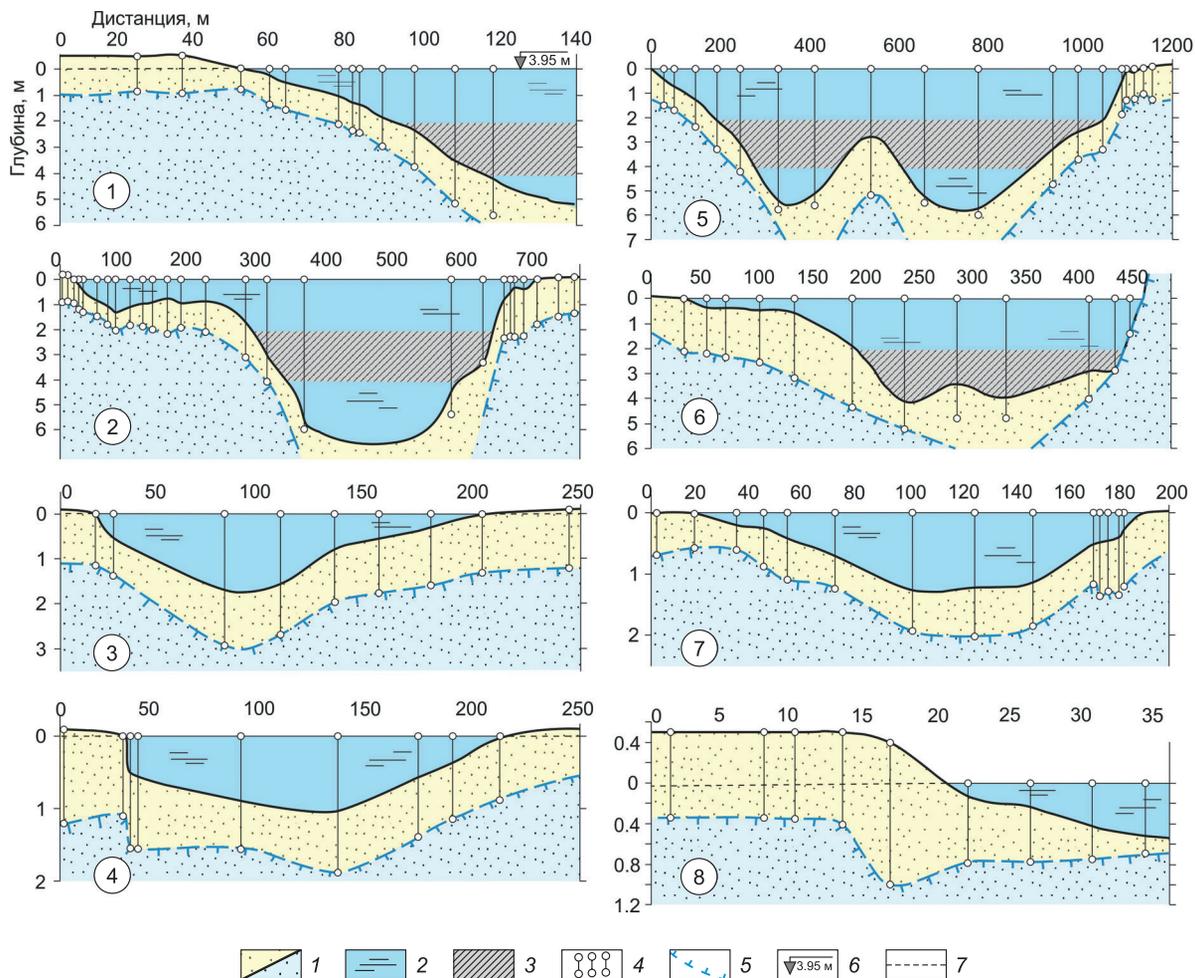
Подрусловой талик на исследуемом участке Большой Туматской протоки является замкнутым, глубиной 40–60 м. Его боковые границы осложнены выгнутыми в сторону берега «карманами», связанными с миграцией русла и последующим смещением таликовой зоны в сторону глубоководной части русла.

Площадь проток дельты Лены составляет около 7500 км<sup>2</sup>, т. е. примерно 25 % ее общей площади. Анализ батиметрических характеристик судоводных протоков в дельте р. Лена, согласно данным лоции [16], показывает, что даже крупные протоки характеризуются большим числом мелководий, со среднелетними глубинами до 2 м, под которыми донные грунты гарантированно промерзают в зимне-весеннее время (см. таблицу).

В целом площадь мелководных участков, под которыми происходит формирование подрусловых таликовых зон, значительно превышает площадь относительно глубоких речных акваторий.

### Заключение

Результаты исследований подрусловых многолетнемерзлых и талых пород показывают, что многолетняя мерзлота под протоками распространена чрезвычайно широко, занимая большую

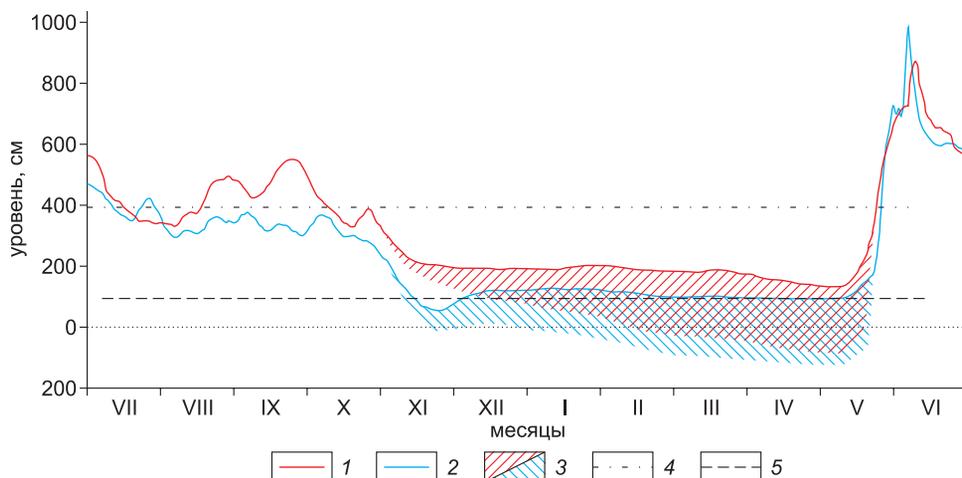


**Рис. 8.** Результаты съемки мерзлотным шупом на протоках до кровли мерзлых пород. 1 – талые/мерзлые породы; 2 – вода; 3 – мощность речного льда при средней многолетней зимней межени; 4 – место измерения шупом; 5 – кровля ММП; 6 – уровень реки на момент выполнения работ (август–сентябрь); 7 – уровень надмерзлотных вод. Профили: 1 – расположен на берегу безымянного песчаного острова на юго-восток от о. Самойловский; 2 – проложен от восточного мыса о. Самойловский через Оленекскую протоку; 3 – расположен от восточного мыса о. Самойловский до песков Эбе-Кумага; 4 – проложен на небольшой протоке, выходящей в протоку Систях-Ары-Уэся, рядом с островами Сордох-Ары; 5 – проложен между островами Сасыл-Ары и Сордох-Ары; 6 – проложен от южного мыса о. Систях-Арыта до песков Соболь; 7 – проложен на выходе протоки Ысы-Хая-Тебюлеге в Оленекскую протоку, участок Чай-Тумус; 8 – расположен на выходе Быковской протоки, на южном мысе о. Зимовьялах.

**Fig. 8.** Results of surveying with a permafrost probe on channels till permafrost table. 1 – thawed/frozen sediments; 2 – river water; 3 – thickness of river ice at an average long-term winter low water; 4 – place of measurement with a probe; 5 – permafrost boundary; 6 – river level at the time of work (August–September); 7 – level of groundwater. Profiles: 1 – the profile is located on the shore of a nameless sandy island to the southeast of Samoilovsky Island; 2 – the profile is laid from the eastern cape of Samoilovsky Island through the Olenek channel; 3 – the profile is located from the eastern cape of Samoilovsky Island to the sands of Ebe-Kumaga; 4 – the profile is laid on a small channel that goes into the Sistakh-Ary-Uesya channel, next to the Sordokh-Ary Islands; 5 – The profile is laid between the islands of Sasyk-Ary and Sordokh-Ary; 6 – the profile is laid from the southern cape of the Sistakh-Aryta Island to the Sobol sands; 7 – the profile was laid at the exit of the Ysy-Khaya-Tebyulege channel into the Olenek channel, the Chai-Tumus section; Profile 8 is located at the exit of the Bykovskaya channel, on the southern cape of Zimoviakh Island.

часть профиля как глубоких, так и почти целиком мелких проток. Всесезонный подрусовой талик формируется лишь в пределах относительно глубокого фарватера с глубиной более 2,5–3 м. Талик обычно имеет сложную боковую границу с выступами в сторону берега, связанную с те-

пловым боковым потоком, а также со смещением берегов. Распределение температур по исследуемым профилям показывает, что донные отложения на мелководных частях русел устойчиво промерзают на значительные глубины, а температура на глубине 8 м достигает  $-8 \div -6$  °C.



**Рис. 9.** График изменения среднего уровня воды в течении года и речного льда в зимний период. 1 – уровень воды в период 07.2008–06.2009 г.; 2 – уровень воды в период 07.2014–06.2015 г.; 3 – речной лед; 4 – среднелетний уровень воды; 5 – зимний минимальный уровень воды. (по данным метеостанции им. Хабарово).

**Fig. 9.** Graph of changes in the average water level throughout the year and river ice in winter. 1 – water level in the period 07.2008–06.2009; 2 – water level in the period 07.2014–06.2015; 3 – river ice; 4 – average annual water level; 5 – winter minimum water level. (according to the Met.st. Khabarovo).

### Площадные параметры проток

#### Areal parameters of the channels

Водоток/ Channel	Общая площадь/ Total area		Площадь фарватера/ Fairway area		Площадь мелководий/ Shallow area	
	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
Протока Быковская	311,7	41	127,3	59	184,4	59
Протока Оленекская	640,2	44,5	285,2	55,5	355	55,5

### Список литературы / References

1. Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы приморской зоны Якутии. М.: Наука; 1966. 181 с. [Grigorev N.F. *Permafrost rocks of the primorsky zone of Yakutia*. Moskva: Nauka; 1966. (In Russ.)]
2. Hollingshead G.W., Skjolingstad L., Rundquist L.A. Permafrost beneath channels in the Mackenzie Delta, N.W.T., Canada. *Proceedings of the Third International Conference on Permafrost*. 1978;1:406–412.
3. Коняхин М.А., Карташова Г.Г., Шубина Л.А., Недешева Г.Н. Криолитологическое строение субаквальных дельтовых отложений р. Колымы (по результатам колонкового бурения). *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 1989;(3):48–53. [Konyakhin M.A., Kartashova G.G., Shubina L.A., Nedesheva G.N. Cryolithological structure of subaqueous delta deposits of the Kolyma River (based on the results of core drilling). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 1989;(3):48–53 (In Russ.)]

4. Solomon S.M., Taylor A.E., Stevens C.W. Near-shore ground temperatures, seasonal ice bonding, and permafrost formation within the bottom- Fast Ice Zone, Mackenzie Delta, NWT. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost*. 2008; 2:1675–1680.

5. Архив метеоданных на о-ве Столб (21721), Булунский район, Якутия. *Справочно-информационный портал «Расписание погоды»*; 2022. URL: [http://gr5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_о\\_Столб](http://gr5.ru/Архив_погоды_на_о_Столб) (дата обращения: 30 марта 2022)

[Archive of meteorological data on Stolb Island (21721), Bulunsky district, Yakutia. *Reference and information portal «Расписание погоды»*; 2022. URL: [http://gr5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_о\\_Столб](http://gr5.ru/Архив_погоды_на_о_Столб) (accessed: March 30, 2022)]

6. Антонов В.С. Дельта реки Лены (краткий гидрологический очерк). *Изучение устьев рек*. М.: АН СССР; 1960;VI:25–34.

[Antonov V.S. Lena River Delta (a brief hydrological sketch). *Study of river mouths*. Moskva: AN SSSR; 1960; Vol.VI:25–34. (In Russ.)]

7. Залогин Б.С., Родионов Н.А. Устьевые области рек СССР. М.: Мысль; 1969. 312 с.

[Zalogin B.S., Rodionov N.A. *Estuaries of the rivers in the USSR*. Moskva: Mysl'; 1969. (In Russ.)]

8. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Айбулатов Д.Н. Особенности и оценки пространственно-временной изменчивости речного стока в многоуровневой дельте р. Лены. *Меняющийся климат и социально-экономический потенциал Российской Арктики*. М.: Лига-Вент; 2016;2:65–95.

[Alekseevskiy N.I., Magritskiy D.V., Aybulatov D.N. Features and estimates of the spatial-temporal variability of river flow in the multi-arm delta of the Lena River. *Changing climate and socio-economic potential of the Russian Arctic*. Moskva: Liga-Vent; 2016;2:65–95. (In Russ.)]

9. Тананаев Н.И., Анисимова Л.А. Оценка годового стока влекомых наносов рек севера Сибири и Дальнего Востока. *География и природные ресурсы*. 2013;(1):148–156.

[Tananaev N.I., Anisimova L.A. Evaluating the Annual Runoff of Traction Load on the Rivers in the North of Siberia and the Far East. *Geography and Natural Resources*. 2013;(1):148–156. (In Russ.)]

10. Тананаев Н. И. Оценка годового стока взвешенных наносов рек севера Сибири и Дальнего Востока. *Океанология*. 2014;54(5):694–703.

[Tananaev N.I. Estimation of the Annual Discharge of Suspended Matter by the Rivers of North Siberia and the Far East. *Oceanology*. 2014;54(5):694–703. (In Russ.)]

11. *Межгосударственный стандарт*. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ; 2019. 19 с.

[*Interstate Standard*. GOST 12536-2014 Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standartinform; 2019. 19 p. (In Russ.)]

12. *Межгосударственный стандарт*. ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ; 2019. 19 с.

[*Interstate standard*. GOST 5180-2015 Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform; 2019. 19 p. (In Russ.)]

13. Большиянов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В., Штоф Г. *Происхождение дельты реки Лены*. СПб.: РЕНОВА; 2013. 268 с.

[Bolshiyarov D.Yu., Makarov A.S., Shnayder V., Shtof G. *The origin of the Lena River Delta*. Sankt-Peterburg: RENOVA; 2013. (In Russ.)]

14. Bobrov N., Titov A., Krekhov A. Delineation of underbed talik in the Lena River delta with the use of geophysics — results of GPR, TEM and ERT measurements. *Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics*. St. Petersburg; 2018:6068.

15. *Водные пути бассейна Лены*. М.: МИКИС; 1995. 600 с.

[*Waterways of the Lena basin*. Moskva: MIKIS; 1995. (In Russ.)]

16. *Лоцманская карта реки Лена. От селения Жиганск до устья*. Якутск: ГлавВодПуть; 1975. 47 л.

[*Pilot map of the Lena River. From the village of Zhigansk to the mouth*. Yakutsk: GlavVodPut; 1975. (In Russ.)]

#### Об авторах

<sup>1</sup>МАКСИМОВ Георгий Тимофеевич, младший научный сотрудник, лаборатория общей геокриологии, Author ID: 57189391401, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, e-mail: [maximov@mpi.ysn.ru](mailto:maximov@mpi.ysn.ru)

<sup>1</sup>ГРИГОРЬЕВ Михаил Николаевич, доктор географических наук, главный научный сотрудник, лаборатория общей геокриологии, Researcher ID: J-7655-2016? <https://orcid.org/0000-0003-1997-9506>, e-mail: [grigoriev@mpi.ysn.ru](mailto:grigoriev@mpi.ysn.ru)

<sup>2</sup>БОЛЬШИЯНОВ Дмитрий Юрьевич, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, отдел географии полярных стран, <https://orcid.org/0000-0001-6974-3150>, e-mail: [bolshiyarov@aari.ru](mailto:bolshiyarov@aari.ru)

#### Аффилиация

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Российская Федерация.

<sup>2</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Российская Федерация.

#### About the authors

<sup>1</sup>MAKSIMOV, Georgii Timofeevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, Author ID: 57189391401, e-mail: [maximov@mpi.ysn.ru](mailto:maximov@mpi.ysn.ru)

<sup>1</sup>GRIGORIEV, Mikhail Nikolaevich, Dr. Sci. (Geography), Principal Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1997-9506>, Researcher ID: J-7655-2016, e-mail: [grigoriev@mpi.ysn.ru](mailto:grigoriev@mpi.ysn.ru)

<sup>2</sup>BOLSHIYANOV, Dmitriy Yurievich, Dr. Sci. (Geography), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6974-3150>, e-mail: [bolshiyarov@aari.ru](mailto:bolshiyarov@aari.ru)

*Affiliation*

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russian Federation

<sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, Beringov str., 38, Saint-Petersburg 199397, Russian Federation.

*Поступила в редакцию / Submitted 27.05.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 23.06.2022*

*Принята к публикации / Accepted 27.07.2022*

## Донные отложения озер г. Якутск как динамичная геокриолого-геохимическая система

В. Н. Макаров, А. Л. Седельникова

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

✉ [vnmakarov@mpi.ysn.ru](mailto:vnmakarov@mpi.ysn.ru)

### Аннотация

Рассматриваются результаты геохимического изучения донных отложений озер г. Якутск в 1998–2021 гг. На протяжении периода мониторинга химический состав донных озерных отложений остается постоянным – сульфатным смешанным по составу катионов с преобладанием кальция, но наблюдаются существенные изменения их солености. На фоне общей тенденции понижения солености этих отложений с трендом около 0,018 %/год происходит формирование кратковременных положительных аномалий солености и продолжительные периоды опреснения. Последнее определяется снижением плотности атмосферных выпадений. При относительно постоянной величине техногенных выбросов в атмосферу города резкие изменения объемов атмосферных выпадений связаны с климатическими факторами, влияющими на динамику колебания солености донных отложений городских озер. Криогенная метаморфизация донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер: в глубокой части они мало минерализованные преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные, в мелководной более засоленные сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные.

**Ключевые слова:** геохимия, город, озера, донные отложения, соленость, атмосферные выпадения, криогенная метаморфизация

**Финансирование.** Исследования выполнены при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (Проект СО РАН АААА-А20-120111690008-9).

**Для цитирования:** Макаров В.Н., Седельникова А.Л. Донные отложения озер г. Якутск как динамичная геокриолого-геохимическая система. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):381–392. [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381–392](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381-392)

## Bottom sediments of the city lakes as a dynamic geocryological and geochemical system

V. N. Makarov, A. L. Sedelnikova

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

✉ [vnmakarov@mpi.ysn.ru](mailto:vnmakarov@mpi.ysn.ru)

### Abstract

We studied the bottom sediments of the lakes in Yakutsk in the period of 1998–2021. During the monitoring period, we observed that the chemical composition of the bottom lake sediments remained constant. The analyses showed their sulfate composition, with mixed cations, where calcium predominated, and significant changes in their salinity. Against the general background of salinity decrease in these deposits (0.018 % per year), we have noted a formation of short-term positive anomalies of salinity and long periods of desalination. The latter is determined by a decrease in the density of atmospheric fallout. Though the atmosphere in the city was under a relatively constant value of technogenic emissions, sharp changes in the volume of atmospheric precipitation were associated with the climatic factors. They affected the dynamics of salinity fluctuations in the bottom sediments of the lakes under study. Cryogenic metamorphization of the bottom sediments occurred unevenly in different parts of the lakes. In the deep parts they were poorly mineralized. Their composition was predominantly sulfate-hydrocarbonate. In the shallow parts of the lakes, they were more of saline sulfate or hydrocarbonate-sulfate composition.

**Keywords:** geochemistry, city, lakes, bottom sediments, salinity, atmospheric fallout, cryogenic metamorphization

**Funding.** This study was supported by the Complex Program of Foundation Scientific Research SB RAS (project no SB RAS AAAA-A20-120111690008-9).

**For citation:** Makarov V.N., Sedelnikova A.L. Bottom sediments of city lakes as a dynamic geocryological and geochemical system. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):381–392. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-381-392>

### Введение

Донные отложения (ДО) – донные наносы и твердые частицы, образовавшиеся и осевшие на дно водного объекта в результате внешних (атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток) и внутриводоемных физико-химических и биохимических процессов, происходящих с веществами как естественного, так и техногенного происхождения, и находящиеся во взаимодействии с водными массами [1]. Состав донных отложений отражает совокупность биологических, химических и физических процессов, происходящих в водоеме. Донные озерные отложения ярко отражают химические особенности вод и являются индикаторами их состава, интенсивности и масштаба техногенного загрязнения. Концентрируя значительные запасы различных веществ, они способны поставлять их обратно в воду и быть вторичным источником ее загрязнения.

Донные отложения в селитебных зонах формируются под воздействием сложной совокупности техногенных и природных процессов: климатических, гидрологических, гидрогеологических, геокриологических, физических, химических, биологических и других, протекающих как в самом озере, так и на его водосборной площади [2]. Донные отложения являются неотъемлемой составляющей озерной системы и считаются более инертной средой по сравнению с водой, обладающими свойством «запоминать» как природные, так и антропогенные воздействия, оказываемые на водоем.

В донных отложениях содержится информация об изменении озерных экосистем под влиянием природно-климатических и антропогенных факторов на протяжении всей истории водоема. Озерный ил формируется в озерах в течение сотен и даже тысяч лет, однако возраст донных отложений большинства крупных стоячих водоемов в районе Якутска не превышает 100 лет, так как они были проточными еще 60–70 лет назад.

Изучение донных отложений – одно из важных направлений в геохимии [3–5; и др.]. Геохимия донных отложений (ДО) малых озерных систем рассматривалась в работах российских и зарубежных ученых [4–13; и др.]. Проблемы фор-

мирования химического состава озерных систем в криолитозоне и их экологическое значение привлекали внимание якутских ученых [14–19; и др.].

Авторами впервые осуществлено комплексное геохимическое исследование системы атмосферные осадки–вода и донные отложения городских озер. Объектами исследования послужили 40 озер, занимающих около 12 % территории г. Якутск [19]. Особое внимание уделено крупным озерам города, обладающим собственными названиями, имеющим многолетнюю историю, важное культурное и рекреационное значение. Показана геохимическая неоднородность формирования химического состава ДО озер под влиянием климатических (атмосферные осадки) и мерзлотных условий.

### Методы и материалы исследования

Геохимическое изучение ДО озер г. Якутск поведено авторами в 1998–2021 гг. Донные отложения отбирались в зонах аккумуляции озер, где создаются условия седиментации мелкодисперсного материала с хорошими сорбционными способностями. В пробу поступала тонкая илистоглинистая или песчаная фракция озерных отложений. Расположение точек отбора донных проб соответствовало пунктам отбора проб озерных вод.

Пробы ДО отбирались при помощи лопатки и специального пробоотборника ТГ-5 на глубине 0,5–0,6 м из всех озер на расстоянии 0,5–1,5 м от берега в доступных (прибрежных) местах озер и из керна буровых скважин, пройденных со льда озер при создании в 2009–2011 гг. системы геокриологического мониторинга [19]. Масса отбираемой пробы обеспечивала получение из нее при последующей обработке выхода заданной фракции в объеме не менее 200 г.

Для оценки величины поступления вещества из атмосферы на акваторию озер использовались результаты круглогодичного мониторинга химического состава атмосферных осадков на комплексном геокриологическом стационаре Туймаада ИМЗ СО РАН. В течение всего периода наблюдений рассчитывался годовой объем атмосферных выпадений на единицу площади – плотность выпадений в г/м<sup>2</sup> или кг/км<sup>2</sup> [20].

Аналитическая обработка геохимических проб ДО и атмосферных осадков проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова, Р.М. Петухова, О.В. Шепелева) и в лаборатории Республиканского информационно-аналитического центра экологического мониторинга (РИАЦЭМ) министерства экологии РС(Я).

В озерных водах, донных отложениях и атмосферных осадках определялось содержание макрокомпонентов:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ; микроэлементов – Cs, Li, Sr, Ba, F, P; электропроводность, показатели pH и Eh.

Камеральные методы включали статистическую и графическую обработку данных в различных программах (Excel, статистика, Corel, SASPlanet, Surfer и другие), их интерпретацию и сравнение с актуальной литературой.

### Результаты исследования

Донные отложения городских водоемов Якутска в большинстве случаев имеют песчаный со-

став с остатками детрита. Отложения, отобранные глубинными пробоотборниками и вскрытые буровыми скважинами, представлены илистым суглинком с прослоями песка мощностью 0,8–1,5 м (озера Сергелях, Теплое, Ытык-Кюель) или торфом, суглинками, пескам мощностью 1,7 м (оз. Сайсары).

Практически невозможно говорить о геохимии донных отложений, не учитывая химического состава озерных вод. Поэтому состав воды озер будет обсуждаться по мере необходимости для выяснения различных аспектов геохимии озерных отложений. Химический состав воды городских озер в начальный период наблюдений 1998–2013 гг. оставался постоянным гидрокарбонатно-хлоридным смешанным по катионам с преобладанием натрия. В последующий почти десятилетний период до 2021 г. происходило опреснение озерных вод, химический состав которых становится хлоридно-гидрокарбонатным, при сохранении соотношения катионов (табл. 1).

Химический состав донных отложений существенно отличается от озерных вод и не претерпел заметных изменений в период наблюдений.

Таблица 1

### Химический состав воды и ДО городских озер в период мониторинга

Table 1

#### Chemical composition of water and BS in urban lakes during the monitoring period

Проба / Sample	1998	2004	2009	2013
Вода / Water	<u>C1 49 C 41 S 10</u> Na61 Mg20 Ca13 K5	<u>C1 55 C 32 S 13</u> Na62 Mg23 Ca12 K3	<u>C 49 Cl 45 S 6</u> Na59 Mg23 Ca15 K3	<u>C1 47 C 45 S 8</u> Na52 Mg24 Ca18 K4
Донные / Bottom sediments	<u>S 40 C 34 Cl 11</u> Na+K38 Mg 32 Ca 21	<u>S 72 C 15 Cl 13</u> Ca 37Na30Mg 27 K3	<u>S 68 Cl 16 C 15</u> Ca38 Na36 Mg22K3	<u>S 72 Cl 13 C 12</u> Ca 44 Na 30Mg 23 K2
Минерализация, мг/л/соленость, % / Water mineraliz., mg/l / salinity, %	909/0,079	799/0,158	775/0,096	601/0,108
	2015	2016	2019	2020
Вода / Water	<u>C 58 Cl 34 S 8</u> Na54 Ca22 Mg16 K8	<u>C 59 Cl 34 S 7</u> Na59 Ca18 Mg16 K7	<u>C 59 Cl 34 S 6</u> Na58 Mg19 Ca16 K7	<u>C 72 Cl 23 S 5</u> Na51 Ca22 Mg21 K7
Донные / Bottom sediments	<u>S 80 Cl 14 C 5</u> Mg38 Ca37 Na25 K1	<u>S 73 Cl 15 C 12</u> Na48 Ca 32 Mg 19 K1	<u>S 68 Cl 16 C 15</u> Ca38 Na36 Mg22K3	<u>S 76 Cl 12 C 12</u> Ca 44 Mg 33 Na21 K2
Минерализация, мг/л/соленость, % / Water mineraliz., mg/l / salinity, %	515/0,148	773/0,128	656/0,099	551/0,027

Примечание. В формуле Курлова C –  $\text{HCO}_3^-$ , S –  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Note. In the Kurlov formula C –  $\text{HCO}_3^-$ , S –  $\text{SO}_4^{2-}$ .

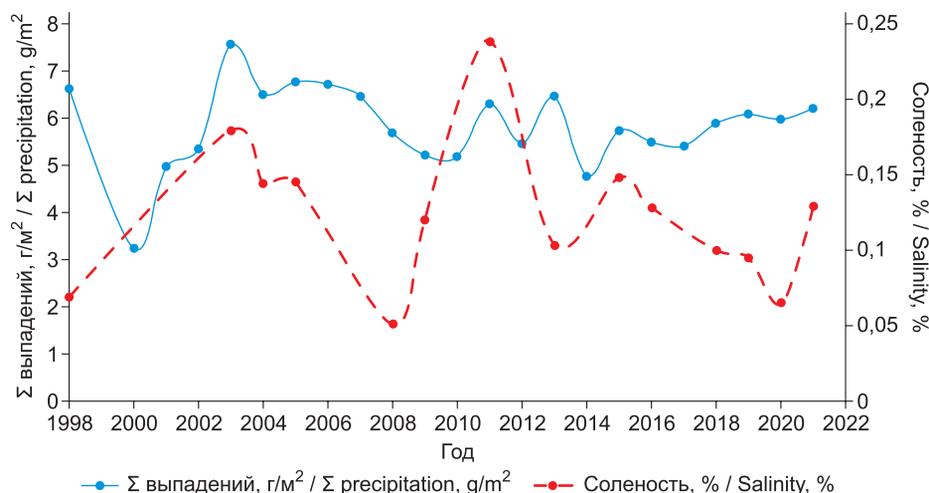


Рис. 1. Зависимость изменения солености ДО от плотности атмосферных выпадений.

Fig. 1. Dependence of BS salinity change on atmospheric fallout density.

Водорастворимая их фаза остается постоянно сульфатной смешанной по составу катионов с незначительным преобладанием кальция (см. табл. 1).

По величине рН донные осадки на протяжении почти всего мониторинга нейтральные-слабощелочные, но в последние пять лет наблюдений становятся слабокислыми (рН = 6,34–6,91), как и атмосферные осадки района [20].

Для ДО характерен следующий порядок распределения главных ионов по уменьшению концентрации:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$  и  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  [19].

Наибольший размах изменения среднегодовых значений концентрации (мг-экв/100 г) – в 2–3 раза характерен для ионов:  $\text{Mg}^{2+}$  (0,301–0,932),  $\text{Na}^+$  (0,203–0,488) и  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,347–0,752). Стабильностью содержания в донных отложениях характеризуются гидрокарбонаты ( $\text{HCO}_3^- = 0,366–0,372$  мг-экв/100г).

Донные отложения отличаются значительным диапазоном колебания среднегодовой величины солености, которая изменяется в пределах 0,042–0,236 %, при среднем значении на протяжении мониторинга 0,127 %. Примером такой контрастности являются данные за 2013 и 2020 гг., когда величина солености изменялась почти в два раза при постоянстве химического состава (табл. 2).

Несмотря на относительную стабильность химического состава и солености донных отложений (диапазон среднегодовых колебаний Dsal составляет 50–60 %), можно выделить продолжительные периоды понижения солености ДО в

озерах: семилетний (2002–2008 гг.) и десятилетний (2012–2021 гг.), которые последовали после контрастных положительных аномалий солености в 2003 и 2011 гг. Величина солености донных отложений в первый период понизилась с 0,236 до 0,042 %, их опреснение происходило постоянно, с трендом около 0,03 %/год. Во второй период соленость донных отложений понизилась на 0,175 % (с 0,24 до 0,07 %) с трендом около 0,016 %/год, т. е. примерно в два раза умереннее, чем в 2002–2008 гг.

В эти же периоды синхронно с понижением солености донных отложений снижался объем атмосферных выпадений. Особенно тесное совпадение между этими параметрами наблюдалось в 2002–2008 гг., когда за семь лет объем атмосферных выпадений уменьшился с 7,55 до 5,56 г/м<sup>2</sup> – на 26 %, с интенсивностью 0,27 г/м<sup>2</sup> год. В период 2012–2021 гг. поступление из атмосферы на поверхность оставалось практически на одном уровне в пределах 4,76–6,45 г/м<sup>2</sup>, в среднем 6,06 г/м<sup>2</sup> (2011–2013 гг.) и, в отличие от первого периода, наблюдалось очень слабое понижение величины атмосферных выпадений с трендом около 0,01 г/м<sup>2</sup> (рис. 1).

Судя по изменению соотношения плотности атмосферных выпадений и величины солености ДО в озерах в 1998–2021 гг., можно полагать, что поступление осадков на поверхность акватории озер 0,05–0,09 г/м<sup>2</sup>·год приводит к засолению ДО на 0,02–0,03 %.

Изменение солености ДО озер на территории города в периоды с максимальной контрастностью

## Химический состав ДО в периоды высокой контрастности солености

## Chemical composition of BS during periods of high salinity contrast

Компонент / Component	2013 г.			2020 г.			Среднее / Average 2013/2020
	Среднее / Average	Мин. / Min.	Максим. / Max	Среднее / Average	Мин. / Min	Максим. / Max	
pH	7,45	6,93	8,00	6,75	6,49	7,28	1,10
Eh, мВ	349	307	368	516	494	560	0,67
Соленость, % 100 г / salinity, % 100g	0,101	0,021	2,058	0,065	0,014	0,483	1,55
мг-экв/100 г							
Ca <sup>2+</sup>	0,751	0,145	12,594	0,513	0,064	3,391	1,46
Mg <sup>2+</sup>	0,932	0,014	9,301	0,301	0,060	3,109	3,10
Na <sup>+</sup>	0,488	0,074	8,196	0,203	0,052	2,826	2,40
K <sup>+</sup>	0,041	0,006	0,639	0,024	0,006	0,081	1,71
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,013	0,003	0,183	0,009	0,003	0,028	1,44
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,366	0,106	1,371	0,372	0,156	1,340	0,98
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,752	0,027	26,771	0,347	0,026	4,896	2,17
Cl <sup>-</sup>	0,280	0,085	4,225	0,211	0,073	1,829	1,33
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,003	0,0002	0,082	0,001	0,0002	0,014	3,00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,039	0,003	0,794	0,014	0,003	0,087	2,79
мг/л							
F <sup>-</sup>	0,075	0,000	1,074	0,229	0,061	0,948	0,33
Si <sup>2+</sup>	0,005	0,000	4,389	0,129	0,021	1,71	0,04
Li <sup>+</sup>	0,003	0,000	0,045	0,000	<0,001	0,028	0,003
Ba <sup>2+</sup>	0,000	0,000	0,000	0,048	0,003	0,185	–
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,222	0,000	2,824	0,093	0,00	0,276	2,39
Атм. осадки, мм / atmospheric precipitation, mm	302			216			1,4
АВ, т/км <sup>2</sup>	6,45			5,97			1,1
Химический состав / chemical composition	S 72 Cl 13 C 12 Ca 44 Na 30Mg 23 K2			S 76 Cl 12 C 12 Ca 44 Mg 33 Na21 K2			

накопления солей: высокая соленость – 2013 г., минимальная – 2020 г., показано на рис. 2.

Опреснение ДО в 2020 г. затронуло практически все городские озера. Особенно заметно уменьшение солености ДО в центральной и южной частях Якутска: озера Сергелях, Хомустах, Ытык-Кюель.

Изменение плотности атмосферных выпадений оказывает определяющее влияние не только на химический состав воды озер, как было отмечено авторами ранее [18], но и на минерализа-

цию ДО, с характерными контрастными межгодовыми флуктуациями.

По данным ЯУГМС, выбросы в атмосферу стационарными источниками загрязнения воздуха, расположенными на территории города, в период 1998–2020 гг. равномерно снижались (рис. 3) с трендом около 0,1 тыс. т в год: от 12,6 тыс. т (среднее в 1998–2002 гг.) до 10,3 (среднее в 2016–2020 гг.).

При равномерном уровне техногенных выбросов в атмосферу наблюдаемые в ходе мо-

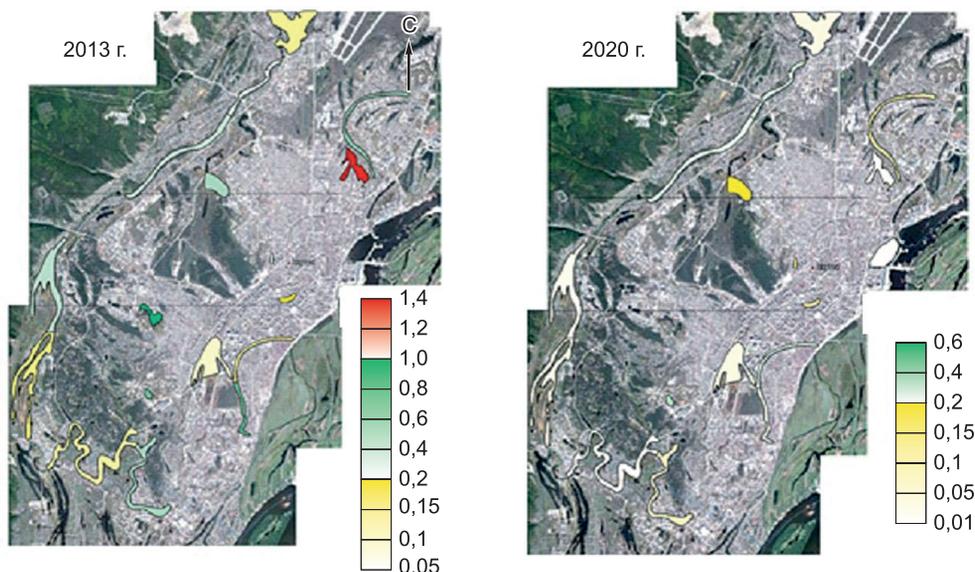


Рис. 2. Изменение солености ДО городских озер, % (г/100 г).

Fig. 2. Change in salinity of BS in urban lakes, % (g/100 g).

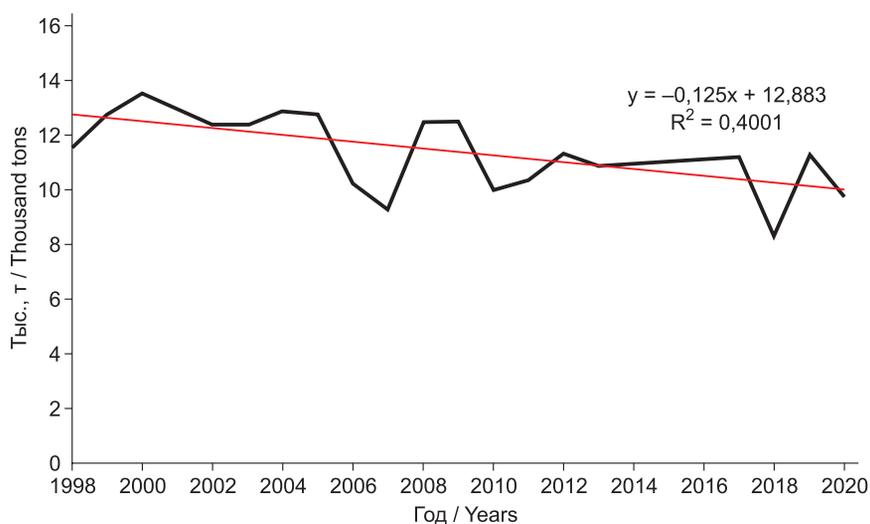


Рис. 3. Выбросы в атмосферу Якутска стационарными источниками загрязнения воздуха.

Fig. 3. Emissions into the atmosphere of Yakutsk from stationary sources of air pollution.

ниторинга периодические резкие колебания величины солености донных озерных отложений Якутска могут быть обусловлены климатическими факторами – региональным переносом воздушных масс.

Опреснение донных отложений озер города сопровождается понижением концентрации ионов хлора, натрия и магния. Между соленостью донных отложений и содержанием этих ионов наблюдается высокая значимость корреляционных связей.

Донные отложения водоемов формируются главным образом из материала, поступающего с территории водосбора с атмосферными осадками и образующегося в самом водоеме, следовательно, химический состав донных отложений является характеристикой этих показателей.

По химическому составу дождевые воды мало минерализованные, слабокислые, гидрокарбонатно-кальциевые с относительно высоким содержанием азотистых соединений. Для большинства компонентов диапазон колебаний

концентрации в период май–сентябрь изменяется в пределах от 2–3 единиц (основные катионы и анионы) до одного порядка – для соединений азота и даже двух – для стронция и фосфатов.

По химическому составу снежный покров хлоридно-гидрокарбонатный преимущественно кальциевый, слабощелочной pH = 7,30 (табл. 3).

Расчеты плотности атмосферных выпадений (Pn) в холодное и теплое время года показали, что объем «теплых» выпадений на два порядка выше, чем «холодных». Поэтому химический состав озерных вод на территории города определяется главным образом поступлением слабоминерализованных гидрокарбонатно-кальциевых дождевых вод. Плотность выпадений

сульфатов составляет от 6 до 10 % от общего объема поступления из атмосферы.

На химический состав растворимой части донных осадков большое влияние оказывают мерзлотные условия, существующие на дне озер. Криогенная метаморфизация ДО протекает наиболее интенсивно в береговой мелководной зоне с высокой динамикой температуры (от –2,6 в марте до 2,2 °С в октябре) в отличие от более глубокой части озер. В зимний период температура воды в более глубоководной части городских озер от +0,6 до +1,9 °С, а температура ДО озер не опускается ниже +2,1 °С (табл. 4).

На состав ДО и воды влияют криогенные физико-химические процессы, действующие в

Таблица 3

**Химический состав атмосферных осадков на территории Якутска**

Table 3

**The chemical composition of atmospheric precipitation on the territory of Yakutsk**

Вид осадков / Precipitation	Минерализация, г/л / Mineralization, g/l	Химический состав / Chemical composition	pH	Pn, мг/(м <sup>2</sup> ·сут) / mg/(m <sup>2</sup> /day)
Дождь / Rain	0,025	C 73 Cl 12 S 9 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 4 NO <sub>2</sub> 2	6,13	10,80
		Ca 49 K 18 Na 13Mg 11 NH <sub>4</sub> 9		
Снег / Snow	0,041	C 67 Cl 20 S 9 NO <sub>3</sub> 3 NO <sub>2</sub> 1	7,30	0,173
		Ca 52 Mg 19 Na 16 NH <sub>4</sub> 12 K 1		

Таблица 4

**Температура придонной воды и ДО озер**

Table 4

**Bottom water temperature and BS lakes**

Озеро / Lake	Вода, донные отложения / Water, bottom sediments	Глубина, м / Depth, m	t, °C	Источник / Source
Бтык-Кюель / Ytyk-Kyuel	Вода	2,0	1,9	по данным В.В. Куницкого, И.В. Дорофеева, И.И. Сыромятникова
	Ил (илистый суглинок) темно-серый, с горизонтальной и волнистой слоистостью за счет прослоев песка, озерный, талый	3,0	3,2	
		4,0	3,8	
Теплое / Teploe	Вода	3,0	1,6	
	Суглинок (ил) черный, с тонкими прослоями песка и сильным гнилостным запахом, талый	4,0	2,1	
	Супесь темно-серая, тяжелая, с тонкими прослоями мелкого песка, талая	5,0	2,4	
Сергелях / Sergelyakh	Вода	2,0	0,6	
	Суглинок коричневый, пластичный, талый	3,0	2,5	
	Супесь темно-серая, легкая, слабо заиленная, с небольшими прослоями коричневого суглинка, талая	4,0	3,3	
Сайсары / Saisar	Вода (ноябрь–март)	5,0	2,2–3,2	[21]

## Химический состав ДО в глубоководной и береговой зонах городских озер

Table 5

## The chemical composition of BS in the deep and coastal zones of city lakes

Скважина глубина, м / Well depth, m)	pH	Eh, mv	Ед. изм. / un rev	Содержание катионов / Content of cations					Содержание анионов / Content of anions				Соленость / Salinity)
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Белое													
скв. 25 (well 25) 0,4	8,00	399	МГ-ЭКВ	2,345	3,389	10,435	0,336	0,161	1,240	8,998	5,527	0,273	32,704
			%	14	20	63	2	1	8	56	34	2	<b>1,006</b>
Берег (Shore) 0,2	6,91	431	МГ-ЭКВ	0,214	0,191	0,150	0,018	0,003	0,215	0,208	0,100	0,037	1,136
			%	37	33	26	3	0	38	37	18	7	<b>0,031</b>
Сергелях													
скв. 62 (well 62) 2,2	6,27	490	МГ-ЭКВ	0,146	0,092	0,148	0,008	0,014	0,210	0,171	0,124	0,003	0,916
			%	36	23	36	2	3	39	32	<b>23</b>	5	<b>0,027</b>
Берег (Shore) 0,2	7,18	422	МГ-ЭКВ	1,233	0,793	0,307	0,023	0,011	0,385	1,875	0,058	0,040	4,725
			%	52	34	13	1	1	16	79	2	2	<b>0,146</b>
Теплое													
скв. 61 (well 61) 4,5	6,73	443	МГ-ЭКВ	0,409	0,294	0,833	0,084	0,064	0,316	0,686	0,779	0,055	3,520
			%	24	18	<b>50</b>	5	3	17	<b>37</b>	<b>42</b>	3	<b>0,105</b>
Берег (Shore) 0,2	7,01	414	МГ-ЭКВ	0,532	0,298	0,087	0,033	0,008	0,304	0,563	0,053	0,048	1,926
			%	56	31	9	3	1	31	58	6	5	<b>0,056</b>
Ытык-Кюель													
Скв. 1 (well 1) 0,5	6,80	427	МГ-ЭКВ	0,145	0,109	0,274	0,048	0,107	0,244	0,171	0,115	0,005	1.218
			%	21	16	40	7	16	46	32	22	0,2	<b>0,034</b>
Берег (Shore) 0,2	6,51	466	МГ-ЭКВ	0,509	0,347	0,087	0,011	0,003	0,154	0,781	0,025	0,060	1,977
			%	53	36	9	1	0	15	76	2	6	<b>0,060</b>

озерном режиме. Криогенная метаморфизация растворимой фазы ДО озер детально рассмотрена [14, 17].

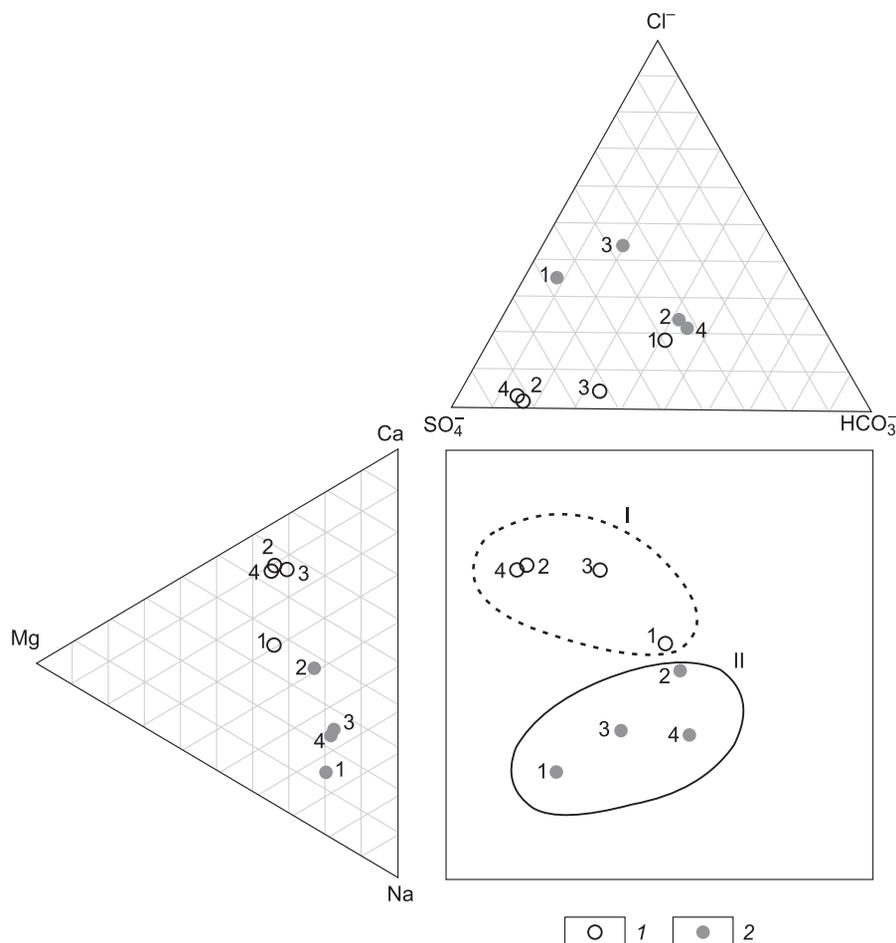
Криогенная метаморфизация растворимой фазы донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер: более интенсивна в береговой зоне, подверженной значительным температурным колебаниям, и менее заметна в глубоководной части озер, где температурные флуктуации значительно меньше. Различия процессов криогенной метаморфизации отражаются на изменении химического состава ДО в различных частях озер (табл. 5).

По расположению точек химического состава донных осадков на диаграмме (рис. 4) можно по-

лучить представление об источниках и характере изменения их солевого состава.

Основная масса донных отложений глубокой части озер, на глубине от 2 до 3,6 м, слабощелочные (pH = 6,27–6,80), мало минерализованные (Dsal от 0,027 до 0,105 %), преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные с содержанием соединений азота (в среднем мг-экв.): NO<sub>3</sub><sup>-</sup> – 0,021, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> – 0,062 (табл. 6).

Значительная часть донных осадков мелководной прибрежной части озер смешанные по химическому составу, но тяготеют к гипсовому типу. Они более засолены (Dsal 0,253 %) и отличаются значительным диапазоном колебания величины солености, которая изменяется в пределах



**Рис. 4.** Изменение химического состава донных отложений. Береговая (I) и глубоководная (2) зоны озер: 1 – Белое, 2 – Сергелях, 3 – Теплое, 4 – Ытык-Кюель.

**Fig. 4.** Changes in the chemical composition of BS. Coastal (I) and deep-water (2) zones of lakes: 1 – Beloe, 2 – Sergelakh, 3 – Teploe, 4 – Ytyk-Kyuel.

двух математических порядков – 0,021–2,058 %. По химическому составу сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные смешанные по составу катионов с преобладанием кальция, слабощелочные (в среднем  $pH = 7,45$ ), с высоким содержанием соединений азота, особенно нитратов (в среднем мг-экв.):  $NO_3^- = 0,116$ ,  $NH_4^+ = 0,034$ . Повышенные содержания  $NO_3^-$  в донных отложениях прибрежной части озер указывают на их давнее загрязнение, так как они представляют собой конечную ступень в цепи бактериальных процессов окисления аммония до нитратов (нитрификации в аэробных условиях).

Наблюдается накопление сульфатов в ДО городских озер на общем фоне преимущественно бессульфатных озер Центральной Якутии. Высокие концентрации сульфатов особенно характерны для береговых мелководных частей озер, где

зимой промерзают ДО и вода. Присутствие сульфатов в иловых растворах озерных осадков может указывать на мелководность или повышенную минерализацию озера в период седиментации осадков [17], т. е. после ликвидации проточности городских водоемов в середине XX в.

### Заклучение

На протяжении геохимического мониторинга (1998–2021 гг.) химический состав донных отложений остается постоянным – сульфатным смешанным по составу катионов с преобладанием кальция. Установлена общая тенденция понижения их солёности с трендом около 0,018 %/год. На фоне общей направленности к понижению солёности наблюдается формирование кратковременных положительных аномалий последней с продолжительными периодами опреснения дон-

## Химический состав ДО глубоководной и береговой зон городских озер

Table 6

## Chemical composition of BS in the deep-water and coastal zones of city lakes

Озера / Lakes	Химические параметры / Chemical parameters	Сергелях / Sergelyakh	Теплое / Теплое	Ытык-Кюель / Ytyk-Kyuel
Глубокие, малокриогенные / Deep, low cryogenic	Химический состав / Chemical composition	C 39 S 32 Cl 23 Na36 Ca36 Mg23 K2	Cl 42 S 39 C 17 Na50Ca24 Mg18 K3	C 46 S 32 Cl 22 Na40 Ca21Mg16 K7
	Соленость, % / Salinity, %	0,027	0,105	0,034
Береговые, криогенные / Coastal, cryogenic	Химический состав / Chemical composition	S 79 C 16 Cl 2 Ca 52Mg 34 Na13K1	S 58 C 31 Cl 6N3 Ca56Na31 Mg 9 K3	S 76 C 15 Cl 2 Ca 53 Mg 36 Na 9 K1
	Соленость, % / Salinity, %	0,146	0,056	0,060

ных осадков, которые сопровождаются уменьшением плотности атмосферных выпадений. При относительно постоянной величине техногенных выбросов в атмосферу города резкие изменения объемов атмосферных выпадений определяются климатическими факторами, влияющими на динамику колебания солености донных отложений.

Основной источник питания городских озер – слабоминерализованные гидрокарбонатно-кальциевые дождевые воды, плотность атмосферных выпадений которых на два порядка выше, чем в холодное время года. Плотность выпадений сульфатов составляет от 6 до 10 % от общего объема поступления макрокомпонентов в летний период.

Криогенная метаморфизация донных отложений происходит неравномерно в различных частях акватории озер. Она более интенсивна в береговой зоне, подверженной значительным температурным колебаниям, и менее заметна в глубоководной части озер, где температурные флуктуации значительно меньше. Различия процессов криогенной метаморфизации отражаются на изменении химического состава донных отложений в различных частях озер: в глубокой части они мало минерализованные (Dsal от 0,027 до 0,105 %), преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные, слабокислые (pH = 6,27–6,80), в

мелководной прибрежной части более засолены (Dsal 0,253 %) сульфатные или гидрокарбонатно-сульфатные, слабощелочные.

## Список литературы / References

- ГОСТ 57567-2017. Качество воды. Определение гидроморфологических показателей состояния рек. М.: Стандартинформ; 2017. 20 с.  
[GOST 57567-2017. Water quality. Determination of hydromorphological indicators of the state of rivers. Moscow: Standartinform, 2017. 20 p. (In Russ.)]
- Субетто Д.А. Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции. СПб.: Изд-во РГПУ им А. И. Герцена; 2009. 339 с.  
[Subetto D.A. Bottom sediments of lakes: Paleolimnological reconstructions. St. Petersburg: Izd-vo RGPU im A. I. Gertsena; 2009. 339 p. (In Russ.)]
- Перельман А. И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра; 1972. 288 с.  
[Perelman A. I. Geochemistry of elements in the zone of hypergenesis. Moscow: Nedra; 1972. 288 p. (In Russ.)]
- Canfield T.J., Dyer F.J., Fairchild J.F. et al. Assessing Contamination in Great lakes Sediments Using Benthic Invertebrate Communities and the Sediment Quality Triad Approach. *J. Great Lakes Res.* 1996;22(3): 565–583.
- Frey D.G. *Limnology in North America*. Univ of Wisconsin Press; 1963, 734 p.
- Freeze R.A. Theoretical analysis of regional groundwater flow. *Canada Inland Waters. Sci., Ser. 3;* 1969:147 p.

7. Hansen K. The general limnology of arctic lakes as illustrated by examples from Greenland. *Medd. om Gronland*. 1967;178(3):1–77.
8. Поликарпочкин В.В. *Вторичные ореолы и потоки рассеяния*. Новосибирск: Наука;1976. 407 с.  
[Polikarpochkin V.V. *Secondary halos and scattering fluxes*. Novosibirsk: Nauka;1976. 407 p. (In Russ.)]
9. Тарновский А.А. *Геохимия донных отложений современных озер*. Л.: Изд-во ЛГУ;1980. 172 с.  
[Tarnovsky A.A. *Geochemistry of bottom sediments of modern lakes*. Leningrad: Izd-vo LGU;1980. 172 p.]
10. Hakanson L., Jansson M. *Principles of lake sedimentology*. Berlin: Springer-Verlag;1983. 316 p.
11. Мизандронцев И.В. *Химические процессы в донных отложениях водоемов*. Новосибирск: Наука;1990. 176 с.  
[Mizandrntsev I.V. *Chemical processes in bottom sediments of water bodies*. Novosibirsk: Nauka, 1990. 176 p. (In Russ.)]
12. Линник П.Н. Донные отложения водоемов как потенциальный источник вторичного загрязнения водной среды соединениями тяжелых металлов. *Гидробиол. журн.* 1999;35(2):97–109. (In Russ.)]  
[Linnik P.N. Bottom sediments of water bodies as a potential source of secondary pollution of the aquatic environment with heavy compounds metals. *Gidrobiologicheskii Zhurnal*. 1999;35(2):97–109. (In Russ.)]
13. Даувальтер В. А. *Геоэкология донных отложений озер*. Мурманск: Изд-во МГТУ;2012.242 с.  
[Dauvalter V. A. *Geoecology of bottom sediments of lakes*. Murmansk: Izd-vo MGTU;2012.242 p. (In Russ.)]
14. Анисимова Н.П. *Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии)*. М.: Наука; 1971. 195 с.  
[Anisimova N.P. *Formation of the chemical composition of underground waters of taliks (on the example of Central Yakutia)*. Moscow: Nauka; 1971. 195 p. (In Russ.)]
15. Макаров В.Н. *Геохимический атлас Якутска*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1985. 65 с.  
[Makarov V.N. *Geochemical atlas of Yakutsk*. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR; 1985. 65 p.]
16. Руфова А.А. *Гидрохимический состав городских озер. Прикладная экология г. Якутска: сборник научных трудов*. Новосибирск: Наука;2017. С. 64–70.  
[Rufova A.A. *Hydrochemical composition of urban lakes. Applied Ecology of Yakutsk*. Novosibirsk: Nauka; 2017:64–70. (In Russ.)]
17. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. *Криогидрогеохимические исследования в Центральной Якутии*. Новосибирск: ГЕО; 2014. 185 с.  
[Anisimova N.P., Pavlova N.A. *Cryohydrogeochemical research in Central Yakutia*. Novosibirsk: GEO; 2014. 185 p. (In Russ.)]
18. Макаров В.Н., Седельникова А.Л. *Экогеохимия городских озер Якутска*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2016. 210 с.  
[Makarov V.N., Sedelnikova A.L. *Ecogeochemistry of urban lakes of Yakutsk*. Yakutsk: IMZ SO RAN; 2016. 210 p. (In Russ.)]
19. Сыромятников И.И., Куницкий В.В. Строение озерных отложений культурного слоя на территории города Якутска. *Криосфера Земли*. 2019;13(4):16–25. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(16-25).  
[Syromyatnikov I.I., Kunitsky V.V. The structure of lacustrine deposits of the cultural layer on the territory of the city of Yakutsk. *Earth's Cryosphere*. 2019;13(4):16–25. (In Russ.). DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-4(16-25)]
20. Макаров В. Н. *Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН; 2007. 88 с.  
[Makarov V.N. *Geochemical monitoring of atmospheric precipitation in Central Yakutia*. Yakutsk: Izd-vo In-ta merzlotovedeniya SO RAN; 2007. 88 p.]
21. Пестрякова Л. А. *Диатомовые комплексы озер Якутии*. Якутск: Изд-во ЯГУ; 2008. 197 с.  
[Pestryakova L.A. *Diatom complexes of lakes of Yakutia*. Yakutsk: Izd-vo YGU; 2008. 197 p. (In Russ.)]

#### Об авторах

МАКАРОВ Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, e-mail: [vnmakarov@mpi.ysn.ru](mailto:vnmakarov@mpi.ysn.ru)

СЕДЕЛЬНИКОВА Алена Леонидовна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-5241-844X>, e-mail: [chizuk82@mail.ru](mailto:chizuk82@mail.ru)

#### Аффилиация

Институт мерзлотоведения СО РАН, 677007, г. Якутск, ул. Мерзлотная 36, Российская Федерация.

#### About the authors

MAKAROV, Vladimir Nikolaevich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6086-886X>, e-mail: [vnmakarov@mpi.ysn.ru](mailto:vnmakarov@mpi.ysn.ru)

*В. Н. Макаров, А. Л. Седельникова ♦ Донные отложения озер г. Якутск...*

SEDELNIKOVA, Alena Leonidovna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-5241-844X>, e-mail: [chizuk82@mail.ru](mailto:chizuk82@mail.ru)

*Affiliation*

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677007, Russian Federation.

*Поступила в редакцию / Submitted 27.05.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 23.06.2022*

*Принята к публикации / Accepted 05.07.2022*

## ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

### Биологические ресурсы

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>

## Млекопитающие Якутии: изменения представлений о составе териофауны за последние 50 лет и аннотированный список

### Ч. 1. Насекомоядные, Рукокрылые, Зайцеобразные, Грызуны

Я. Л. Вольперт, Е. Г. Шадрина, И. М. Охлопков

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

✉ [ylv52@mail.ru](mailto:ylv52@mail.ru), [e-shadrina@yandex.ru](mailto:e-shadrina@yandex.ru)

#### Аннотация

Ранее опубликованные списки териофауны региона относятся к 30–70-м годам XX века, в них приведены сведения о 59–63 видах (по разным источникам). За прошедшие 50 лет произошли существенные изменения, как благодаря повышению изученности териофауны, так и из-за интродукционной деятельности человека. На современном уровне изученности фаунистический список рассмотренных в данной статье отрядов включает в совокупности 42 вида: Насекомоядные Eulipotyphla (2 семейства, 3 рода, 10 видов), Рукокрылые Chiroptera (1 семейство, 3 рода, 5 видов), Зайцеобразные Lagomorpha (2 семейства, 2 рода, 3 вида), Грызуны Rodentia (3 семейства, 19 родов, 24 вида). В 1970-х годах фаунистический список тех же отрядов включал 36–37 видов. Расширение фаунистического списка произошло за счет повышения изученности (находки четырех новых для фауны Якутии видов, из них два вида рукокрылых и по одному виду насекомоядных и грызунов) и изменения таксономического статуса видов и подвидов, относящихся к родам *Ochotona*, *Urocitellus*, *Alexandromys* (*Microtus*). Изменения фаунистического состава (без изменения числа видов) связаны с пересмотром видовых названий 13 видов. Основу населения рассматриваемых отрядов на территории Якутии составляют аборигенные виды (около 93 %), один вид – *Ondatra zibethicus* – появился в результате направленных интродукционных мероприятий 1940-х годов, два вида – *Mus musculus* и *Rattus norvegicus* – являются инвазивными эусинантропами, широко расселившимися во второй половине XX века.

**Ключевые слова:** млекопитающие, териофауна, Якутия, насекомоядные, рукокрылые, зайцеобразные, грызуны  
**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. 1. Насекомоядные, Рукокрылые, Зайцеобразные, Грызуны. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):393–404. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>

## 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, and Rodents

Ya. L. Volpert, E. G. Shadrina, I. M. Okhlopkov

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

✉ [ylv52@mail.ru](mailto:ylv52@mail.ru), [e-shadrina@yandex.ru](mailto:e-shadrina@yandex.ru)

#### Abstract

Previously published lists of the mammal fauna of the region date back to the 1930s to 1970s; they present information on 59–63 species (by different sources). Over the past 50 years, significant changes have taken place, both due to

additional research of the mammal fauna and due to the introduction of several species by man. According to the current studies, the faunistic list of the orders covered in this article embraces a total of 42 species: Insectivores (Eulipotyphla; 2 families, 3 genera, 10 species), Chiropterans (Chiroptera, 1 family, 3 genera, 5 species), Lagomorphs (Lagomorpha, 2 families, 2 genera, 3 species), and Rodents (Rodentia, 3 families, 19 genera, 24 species). In the 1970s, the faunistic list of the same orders included 36–37 species. The reasons for the expansion of the list are a better current knowledge of the regional fauna (four species new for the fauna of Yakutia have been found: two chiropterans and one species of insectivores and rodents each) and changes in the taxonomic rank of species and subspecies belonging to the genera of *Ochotona*, *Urocitellus*, and *Alexandromys* (*Microtus*). Some changes in the fauna composition (with no changes in the amount of species) are associated with the revision of 13 species names. The major part of the population of the discussed orders on the territory of Yakutia is composed of indigenous species (approximately 93 %); one species, *Ondatra zibethicus*, has appeared as a result of intentional introduction measures in the 1940s; and two species, *Mus musculus* and *Rattus norvegicus* are invasive eusynanthropes that expanded widely in the second half of the 20th century.

**Keywords:** mammals, mammalian fauna, Yakutia, Eulipotyphla, Chiroptera, Lagomorpha, Rodentia

**Funding.** This study was carried out within the framework of the state Assignment of the FITC YANC 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» (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 1. Insectivores, Chiropterans, Lagomorphs, and Rodents. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):393–404. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-393-404>

## Введение

Первый полный список фауны млекопитающих Якутии был опубликован в 1934 г. [1], в нем фигурирует 59 видов млекопитающих. Необходимо учесть, что на тот момент изученность территории была очень слабая, особенно населения мелких млекопитающих; кроме того, взгляды на систематику группы начала XX века значительно отличались от современных, в списках по различным регионам одни и те же виды имели разные названия, и реальное число видов, приведенных в данной сводке, значительно меньше. В то же время необходимо отметить, что эта работа имеет большое научное значение, так как в ней впервые был приведен полный на тот момент список охотничьих видов, обитающих на территории Якутии. Следующая версия териофауны региона появилась только в 1971 г. [2], в ней список млекопитающих расширился до 60 видов. Указанная монография является значительным этапом в изучении териофауны Якутии и получила высокую оценку среди зоологов СССР. Позже был издан «Определитель млекопитающих Якутии» [3], в котором список видов включал 63 вида. Увеличение числа видов произошло за счет разделения ранее единого вида длиннотелого суслика на два: восточный длиннотелый суслик *Urocitellus (undulatus) undulatus* Pallas, 1779 и берингийский суслик *Urocitellus parryi* Richardson, 1825. Кроме того, произошло добавление в фауну Якутии *Sorex cinereus*

Kerr 1792 и *Lemmus amurensis* Vinogradov 1924, последний фигурировал в первом списке [1]. Если увеличение числа видов сусликов и добавление амурского лемминга не вызывает сомнений до настоящего времени, то включение в териофауну Якутии *Sorex cinereus*, по-видимому, надо признать ошибкой. В своем определителе М.В. Попов ссылается на мнение Б.С. Юдина, в то же время последний указывает, что этот вид встречается в бассейнах рек Анадырь, Омолон и на Камчатке [4–6], такое же распространение этого вида он приводит и позже [7]. Трансарктическая бурузубка не обнаружена нами в долине р. Колыма [8, 9]. В современном понимании это бурузубка *Sorex camtshatica* Yudin 1972, которая встречается в Камчатском крае и Магаданской обл. [10].

В изданном несколько позже аннотированном списке млекопитающих Якутии [11], в отличие от «Млекопитающих Якутии», [2] и определителя [3], объединены в один вид *Microtus middendorffi* Poljakov 1881 и *Microtus hyperboreus* Vinogradov 1933, что соответствует современной точке зрения [12], и фауна млекопитающих в данном варианте включала 62 вида.

Позднее появилось несколько работ, где приводятся сведения о населении млекопитающих отдельных регионов: Предверхоаянья [13], Южной Якутии [14], Западной Якутии [15] или отдельных групп – мелких млекопитающих, рукокрылых [9, 16], но попыток издать полный спи-

сок млекопитающих Якутии, обширного региона, который занимает более 1/5 территории России, не предпринималось, хотя за прошедший период произошли значительные изменения фауны, как благодаря повышению изученности, так и из-за направленной интродукционной деятельности [17], в результате указанных процессов в настоящее время число видов составляет, как минимум, 70 представителей этого класса. В представленном ниже списке названия и систематическая принадлежность приведены по сводке «Млекопитающие России: систематико-географический справочник» [18].

### Фауна млекопитающих Якутии

Язык: Русский/ Английский / Латинский  
Language, Russian / English / Latin

**Класс** МЛЕКОПИТАЮЩИЕ / MAMMALS /  
MAMMALIA Linnaeus 1758

**Отряд** НАСЕКОМОЯДНЫЕ / INSECTIVORES /  
EULIPOTYPHILA (INSECTIVORA) Wad-  
dell, Okada et Hasegawa, 1999

**Подотряд** КРОТООБРАЗНЫЕ / TALPO-  
MORPHS / TALPOMORPHA Bugge 1974

**Семейство** Кротовые / Moles / Talpidae Fis-  
cher 1814

**Род** Кроты / Moles / *Talpa* Linnaeus 1758

**1. Сибирский (алтайский) крот** / Altai Mole /  
*Talpa altaica* Nikolsky, 1883

В настоящее время на территории Якутии достоверно известно обитание сибирского крота на территории Юго-Западной Якутии, самой северной точкой находки вида является п. Таас-Юрях (61°47'16" с.ш., 113°01'02" в.д.) [19, 20]. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**Подотряд** ЗЕМЛЕРОЙКООБРАЗНЫЕ / SORI-  
COMORPHS / SORICOMORPHA Gregory, 1910

**Семейство** Землеройковые / Shrews / SORI-  
CIDAE Fischer, 1814

**Род** Куторы / Water Shrews / *Neomys* Kaup, 1829

**2. Обыкновенная кутора** / Eurasian Water  
Shrew / *Neomys fodiens* Pennant, 1771

На территории Якутии известны находки этого вида в бассейне р. Токко, в бассейне р. Унгра [14], в окрестностях г. Алдан [22] и в долине р. Хамра (левый приток р. Лена, Ленский район) [20]. Внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**Род** Бурозубки / Brown-toothed Shrews / *Sorex*  
Linnaeus, 1758

**3. Обыкновенная бурозубка** / Common Shrew /  
*Sorex araneus* Linnaeus, 1758

До начала XXI века считалось, что на территории Якутии отсутствует. Нами отловлена в долине р. Лена и ее притоков Витим, Пилка и Хамра, а также в окрестностях г. Ленск [23]; последний пункт, 60°43' с.ш., 114°54' в.д., является самой северо-восточной точкой отлова вида. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**4. Тундрная (тундровая) бурозубка** / Tundra Shrew / *Sorex tundrensis* Merriam, 1900

Один из самых распространенных видов бурозубок; заселяет всю таежную зону Якутии и по долинам рек проникает далеко в тундру до арктических пустынь [2, 9].

**5. Крупнозубая бурозубка** / Siberian Large-toothed Shrew / *Sorex daphaenodon* Thomas, 1907

Заселяет большую часть таежной зоны Якутии, но далеко на север не проникает. В Западной Якутии этот вид не был обнаружен в среднем течении р. Анабар в районе притока р. Биллях и Эбелях [24] на Оленек-Анабарском медуручье (71°02' с.ш., 116°33' в.д.), в верхнем течении р. Удя [25] и в низовьях р. Анабар [26]. Таким образом, вопрос о присутствии этого вида в бассейне рек Оленек и Анабар до настоящего времени является открытым. Не был обнаружен этот вид и в верхнем течении р. Муна [27, 28]. В то же время этот вид был обычен в лесотундровой зоне в долинах рек Индигирка и Лена, причем в долине последней отмечен ниже устья р. Муна [9], а также в среднетаежной подзоне в долине р. Колыма.

**6. Средняя бурозубка** / Laxmann's Shrew / *Sorex caecutiens* Laxmann, 1785 (1788)

Вид распространен по всей таежной зоне Якутии, по долинам рек проникает в кустарниковую тундру, но в тундровых ландшафтах отсутствует [2, 9]. Периодически средняя бурозубка является доминантом в сообществе мелких млекопитающих в таежной зоне, достигая очень высоких показателей численности.

**7. Равнозубая бурозубка** / Taiga Shrew / *Sorex isodon* Turov, 1924

На территории Якутии имеет ограниченный ареал. В Южной Якутии отмечена в бассейне р. Олекма и ее притока Чара, в бассейне верхнего Алдана и его притоков [14], в юго-западной Якутии в долинах рек Витим, Пилка и Хамра. Восточнее Верхоянского хребта вид отсутствует [2, 9]. Самая северная находка вида в Якутии зарегистрирована на правом берегу в долине р. Лена в районе устья р. Лепписке [8,13].

**8. Плоскочерепная (бурая) бурозубка** / Flat-skulled Shrew / *Sorex roboratus* Hollister, 1913

Широко распространенная на территории Якутии бурозубка встречается по всей таежной зоне, проникает в тундру вплоть до побережья Северного Ледовитого океана [2]. На северо-востоке распространение спорадическое, немногочисленна: отмечена в нескольких пунктах в долине р. Колыма, но не обнаружена в лесотундре в долинах рек Индигирка и Яна. В долине р. Лена заходит на север до устья р. Бесюке. Отлавливалась в среднем течении р. Анабар в районе притоков р. Биллях и Эбелях [24], но не отловлена на Оленек-Анабарском междуречье (71°02' с.ш., 116°33' в.д.), в верхнем течении р. Удя [25] и в низовьях р. Анабар [26]. Для Западной Якутии характерны более высокие уровни численности вида, чем для Северо-Восточной.

**9. Крошечная бурозубка** / Eurasian Least Shrew / *Sorex minutissimus* Zimmermann, 1780

Встречается по всей таежной зоне Якутии, причем, хотя и широко распространена, но повсеместно малочисленна и, как правило, избегает пойменных местообитаний, тогда как в пределах таежных ландшафтов весьма эвритопна. Самой северной точкой отлова вида является лесотундра в долине р. Индигирка [9].

**10. Малая бурозубка** / Eurasian Pygmy Shrew / *Sorex minutus* Linnaeus, 1766

Этот вид на территории РС (Я) ранее был отмечен только в Юго-Западной Якутии [2]. Вопрос об обитании вида в Южной Якутии, в бассейне верхнего течения р. Алдан, по р. Унгра и в долине р. Мая достаточно сложный из-за спорного систематического статуса отловленных здесь малых бурозубок. По мнению Ю.В. Ревина [14], здесь обитает малая бурозубка, тогда как некоторые авторы считают, что в бассейне р. Алдан, обитает тонконосая бурозубка *S. gracillimus* Thomas, 1907 [10]. В настоящее время получены новые данные по распространению вида в Юго-Западной Якутии, малая бурозубка отловлена в долине рек Витим, Пилька, Хамра, Пеледуй [20]. На Нюя-Пеледуйском междуречье вид очень редок, а на левобережье р. Нюя малая бурозубка не отловлена. Таким образом, северная граница ареала этого вида на юго-западе Якутии проходит по р. Нюя [27]. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**ОТРЯД Рукокрылые** / Chiropterans (Bats) / CHIROPTERA Blumenbach, 1779

**Семейство** Гладконосые (Кожановые) / Common Bats / VESPERTILIONIDAE Gray, 1821

**Род** Ночницы / Mouse-eared Bats / *Myotis* Каур, 1829

**11. Водяная ночница** / Daubenton's Bat / *Myotis daubentonii* Kuhl, 1817

Вид распространен в Центральной и Южной Якутии [2]. Отмечен в устье р. Синяя, в верхнем течении р. Буотама [29], по р. Токко и в верхнем течении р. Алдан [2], в низовьях р. Амга, а также в районе г. Нюрба (63°30' с.ш.) [15], что является самой северной точкой распространения в Якутии.

**12. Ночница Иконникова** / Ikonnikov's Bat / *Myotis ikonnikovi* Ognev, 1912

В пределах Якутии узкоареальный вид с крупными разрывами в ареале. Известно несколько пунктов находок на территории Южной Якутии: в долине р. Алдан, близ п. Томмот [30], в среднем течении р. Унгра [14]. Еще четыре экземпляра в разные годы отмечены на зимовке в пещерах и штольнях гипсового рудника «Олекминский», г. Олекминск [16]. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**13. Сибирская ночница** / Siberian Bat / *Myotis (Aeorestes) sibirica* Kaschenko, 1905

Вид близок к *M. brandtii*, ранее рассматривался в его составе [31, 32]. В пределах Якутии узкоареальный вид. В 2006 г. один экземпляр вида отловлен в долине левого притока р. Лена – р. Хамра [20], в 2007 г. – на правом берегу р. Лена напротив г. Олекминск, на зимовке в гипсовом руднике «Олекминский» встречено три зимующих особи [16]. В 2015 г. двенадцать экземпляров встречено в устье р. Буотама [33]. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**Род** Ушаны Старого Света / Old World Long-eared Bats / *Plecotus* Geoffroy, 1818

**14. Сибирский ушан (Огнева)** / Siberian Long-eared Bat / *Plecotus ognevi* Kishida, 1927

Ранее для Якутии указывался как *P. auritus* Linnaeus 1758. В пределах Якутии узкоареальный вид или с крупными разрывами в ареале. Известен ряд находок на территории Якутии: две в среднем течении р. Токко близ с. Тяня на расстоянии 50 км друг от друга [14], а также одиночные находки в долине р. Лена близ г. Олекминск [34], на Лено-Амгинском междуречье в районе с. Чурапча [2], в устье р. Буотама [33]. Самая северная находка – в окрестностях г. Якутск [16, 35]. Вид внесен в Красную книгу РС (Я) [21].

**Род** Кожаны / Serotines / *Eptesicus* Rafinesque, 1820

**15. Кожанок северный / Northern Bat / *Eptesicus nilssonii* Keyserling et Blasius, 1839**

В Якутии заселяет всю южную часть – в окрестностях г. Олекминск, на р. Унгра [2], в низовьях р. Мая [16]. В Центральной Якутии отмечен в низовьях р. Буотама, а также в окрестностях г. Якутск, где в заброшенной штольне была обнаружена зимовка вида [36]; восточнее р. Лена обнаружен по всей долине р. Вилюй и в верховьях р. Тамма [15].

**ОТРЯД ЗАЙЦЕОБРАЗНЫЕ / LAGOMORPHS / LAGOMORPHA Brandt, 1855**

**Семейство Пищуховые / Pikas / OCHOTONIDAE Thomas, 1897**

**Род Пищухи / Pikas / *Ochotona* Link, 1795**

**16. Туруханская пищуха / Turuchan Pika / *Ochotona (Pika) (gr. «alpina») turuchanensis* Naumov, 1934**

Ранее рассматривали в составе *O. hyperborea* [31], ввиду сходства внешнего облика и биотопических предпочтений. Исследования двух последних десятилетий позволили обнаружить наличие морфологических отличий, специфики акустического репертуара [37] и генетической близости к *O. alpina* [38]. В настоящее время рассматривают как самостоятельный вид группы «alpina» [37]. По мнению Н.А. Формозова с соавторами [39], видовой статус нуждается в уточнении. В Якутии вид описан по материалам, собранным на левобережье в долине Средней Лены, и предположительно охватывает долину р. Вилюй, левобережье Средней Лены и Верхнюю Лену; границы ареала на севере Якутии и соотношение их с ареалом *O. hyperborea* нуждаются в уточнении.

**17. Северная пищуха / Northern Pika / *Ochotona hyperborea* Pallas, 1811**

Ранее для Якутии указывалось обитание *O. alpina* Pallas (1773), с ареалом, охватывающим всю таежную зону Якутии и проникновением в тундровую зону по долинам рек почти до побережья Северного Ледовитого океана [2]. В настоящее время полагают, что эта область поделена между двумя видами рода *Ochotona*: *O. hyperborea* распространена по всей территории Северо-Восточной Якутии, на севере Западной Якутии; в Южной и Центральной Якутии западная граница распространения проходит по р. Лена [38]; на Лено-Вилюйском водоразделе в равнинной тайге отсутствует. Повсеместно распространена спорадически, что связано с биотопическими предпочтениями: наиболее охотно

заселяет горные ландшафты, в первую очередь крупноблочные каменистые россыпи. В долинах рек способна заселять завалы плавника, а в тундре и лесотундре северо-востока и северо-запада Якутии встречается также в равнинных, нередко заболоченных захламленных биотопах [2; наши данные].

**Семейство Зайцевые / Hares; Rabbits / LEPORIDAE Fischer, 1817**

**Род Зайцы / Hares / *Lepus* Linnaeus, 1758**

**18. Заяц-беляк / Mountain Hare / *Lepus timidus* Linnaeus, 1758**

Вид заселяет всю территорию материковой части Якутии и часть полярных островов (Новосибирские, Бегичева), но плотность населения крайне неравномерна [2]. Распределение по территории и численность в последнее время претерпели существенные изменения под воздействием антропогенного фактора [40].

**ОТРЯД ГРЫЗУНЫ / RODENTS / RODENTIA Bowdich, 1821**

**Семейство Беличьи / Sciurids / SCIURIDAE Fischer, 1817**

**Род Сибирские (азиатские) летяги / Siberian Flying Squirrels / *Pteromys* G. Cuvier, 1800**

**19. Летяга обыкновенная / Siberian Flying Squirrel / *Pteromys volans* Linnaeus, 1758**

Обитает в таежной зоне, но до северных границ лесной растительности не доходит, не проникая далее 69° с.ш. Распространение ограничено биотопическими предпочтениями – тяготением к перестоянным древостоям, преимущественно лиственничным или темнохвойно-лиственничным [2].

**Подсемейство Белки / Tree Squirrels / Subfamily Sciurinae s. str.**

**Род Белки / Tree Squirrels / *Sciurus* Linnaeus, 1758**

**20. Белка обыкновенная / Red Squirrel / *Sciurus vulgaris* Linnaeus 1776**

Заселяет всю таежную зону, вплоть до границы лесной растительности, известны очень редкие заходы в тундру [2].

**Подсемейство Голарктические наземные беличьи / Holarctic Ground Squirrels / MARMOTINAE Poccock, 1923 (1820)**

**Род Бурундуки / Chipmunks / *Tamias* Illiger, 1811**

**21. Азиатский бурундук / Siberian Chipmunk / *Tamias (Eutamias) sibiricus* Laxmann, 1769**

Обитает в таежной зоне, но до северных границ лесной растительности не доходит [2]. По долине р. Оленек не фиксировался севернее

68°30' с.ш., по р. Лена 71° с.ш., по рекам Яна и Индигирка 69° с.ш., по р. Колыме 67°30' с.ш. [2].

**Род Трансберингийские суслики** / Trans-Berignian Ground Squirrels / *Urocitellus* Obolensky, 1927

**22. Восточный длиннохвостый суслик** / Eastern Long-tailed Ground Squirrel / *Urocitellus (undulatus) undulatus* Pallas, 1779

Распространен в долине Средней Лены и на Лено-Вилуйском междуречье, где заселяет остепненные участки (палеостепи) и опушки леса, охотно селится по окраинам поселков и сельхозугодий [41]. На правом берегу р. Лена отсутствует.

**23. Берингийский суслик** / Arctic Ground Squirrel / *Urocitellus parryi* Richardson, 1825

Обычен в бассейне р. Яна, хотя встречается на западном макросклоне Верхоянского хребта [42] и в верхнем течении р. Индигирка. Ранее заселял среднее и верхнее течения р. Колыма [2]. Предполагается сокращение этой части ареала или снижение численности. В начале 80-х гг. XX века этот вид не обнаружен нами в долине р. Колыма от устья р. Поповка до устья протоки Ружникова, хотя старые (нежилые) норы отмечались; колония суслика в окрестностях п. Лобуя (Лабуя) исчезла, нами обнаружены только нежилые норы. По наблюдениям к.б.н. М.Ю. Чепрасова, вид сохранился только в низовьях р. Колыма.

**Род Сурки** / Marmots / *Marmota* Blumenbach, 1779

**24. Камчатский (черношапочный) сурок** / Kamchatka (Black-capped) Marmot / *Marmota camtschatica* Pallas, 1811

Для вида выделяют три четко обособленных подвида [43], два из которых встречается в пределах Якутии. Северозабайкальский подвид распространен от оз. Байкал до верховий р. Алдан. В Якутии имеет ограниченное распространение в пределах ее южной части (западных окраинах Станового хребта — кряж Зверева и хр. Удокан) и не соприкасается с ареалом якутского подвида, обитающего между р. Лена и р. Колыма от моря Лаптевых до Охотского и на юг до верховий р. Мая [43]. Северозабайкальский подвид внесен в региональную Красную книгу [21] как вид, численность которого сокращается в результате сочетания изменения условий существования и чрезмерного антропогенного воздействия. Эндемик России.

**Семейство Хомяковые** / Cricetids / CRICETIDAE Fischer, 1817

**Подсемейство Полевочки** / Voles and Lemmings / ARVICOLINAE Gray, 1821

**Род Лесные лемминги** / Wood lemmings / *Myopus* Miller, 1910

**25. Лесной лемминг** / Wood Lemming / *Myopus schisticolor* Lilljeborg, 1844

Заселяет всю таежную зону, проникая по долинам рек в тундру [2]. В отдельные годы доминирует в сообществах мелких млекопитающих, в эти периоды наблюдаются массовые миграции вида [9].

**Род Настоящие лемминги** / True Lemmings / *Lemmus* Link, 1795

**26. Сибирский лемминг** / Siberian Brown Lemming / *Lemmus sibiricus* Kerr, 1792

Заселяет всю тундровую зону, включая полярные острова. На материке заселяет также лесотундру, проникая в таежную зону. Самые южные находки на территории Якутии: в долинах рек Лена 69° с.ш., Индигирка 69°87' с.ш., Колыма 67°25' с.ш. [2,9].

**27. Амурский лемминг** / Amur Brown Lemming / *Lemmus amurensis* Vinogradov, 1924

Крайне ограниченно распространённый вид, в Якутии известно обитание в долине р. Чульман, в долине р. Унгра и в верховьях р. Тимптон [14].

**Род Ондатры** / Common Muskrats / *Ondatra* Link, 1795

**28. Ондатра** / Common Muskrat / *Ondatra zibethicus* Linnaeus, 1766

В настоящее время этот вид в результате акклиматизационных усилий и естественного расселения заселил всю таежную зону Якутии, за исключением лесотундры [2, 44, 45].

**Род Копытные лемминги** / Collared Lemmings / *Dicrostonyx* Gloger, 1841

**29. Копытный лемминг** / Palearctic Collared Lemming / *Dicrostonyx (Misothermus) torquatus* Pallas, 1778

Распространение этого вида тесно связано с тундровыми ландшафтами, в таежную зону не проникает [2]; также не был обнаружен на Новосибирских островах [46].

**Род Красно-серые полевки** / Gray Red-backed Voles / *Craseomys* Miller, 1900

**30. Красно-серая полевка** / Gray Red-backed Vole / *Craseomys rufocanus* Sundevall, 1846

Заселяет всю таежную зону Якутии, проникая в тундровую с элементами таежной растительности [2]. Имеются разрывы в ареале, в частности, отсутствует на левобережье долины р. Лена от Олекминска до устья р. Алдан [2, 47].

**Род Лесные полевки** / Red-backed Voles / *Myodes* Pallas, 1779

**31. Красная полевка / Northern Red-backed Vole / *Myodes rutilus* Pallas, 1779**

Заселяет всю таежную зону Якутии, проникающая в тундровую с элементами таежной растительности по долинам рек [2]. На большей части территории Якутии доминирует в сообществах мелких млекопитающих [9].

**Род Скальные полевки / Mountain Voles / *Alticola* Blanford, 1881**

**32. Лемминговидная полевка / Lemming Mountain Vole / *Alticola (Aschizomys) lemminus* Miller, 1899**

Ранее на территории Якутии указывалось обитание большеухой полевки *Alticola (Aschizomys) macrotis* Radde, 1861 [2]. Исследования последних лет показали, что на территории Якутии обитает лемминговидная полевка [12,48], и, несмотря на имеющиеся различия между северными и южноякутскими популяциями, их следует отнести к одному виду. Отлавливалась в горных тундрах Хараулахского хребта (Нижняя Лена), в Верхоянье, хребтах Черского, Момском и на территории Южной Якутии [2, 48, 49].

**Род Водяные полевки / Eurasian Water Voles / *Arvicola* Lacedepede, 1799**

**33. Водяная полевка / Eurasian Water Vole / *Arvicola amphibius* Linnaeus, 1758**

Вид широко распространен в Западной и Центральной Якутии, далеко на север и восточнее Верхоянского хребта не проникает [2].

**Род Брандтовы полевки / Brandt's Voles / *Lasiopodomys* Lataste, 1887**

**34. Узкочерепная полевка / Narrow-headed Vole / *Lasiopodomys (Stenocranius) gregalis* Pallas, 1779. Ранее *Microtus gregalis* Pallas 1778.**

На территории Якутии этот вид распространен двумя очагами: первый привязан к Центральной и Юго-Западной Якутии, другой – к тундровой зоне [2, 8].

**Род Восточноазиатские полевки / East Asian Voles / *Alexandromys* Ognev, 1914**

**35. Полевка-экономка / Root Vole / *Alexandromys (gr. «oeconomus») oeconomus* Pallas, 1776.**

Заселяет практически всю таежную зону за исключением среднего течения р. Яна и ее притока р. Адыча, далеко проникая в тундровую зону по долинам рек [2, 9].

**36. Полевка Максимовича / Maximowicz's Vole / *Alexandromys (gr. «maximowiczii») maximowiczii* Schrank, 1859**

Известна находка этого вида в окрестностях оз. Токко [50]. По нашим данным, возможно обитание в Юго-Западной Якутии.

**37. Полевка Миддендорфа / Middendorf's Vole / *Alexandromys (gr. «mongolicus») middendorffii* Poljakov, 1881**

В настоящее время включает в качестве одного из подвидов *A. hyperboreus* [12,51]. Заселяет тундру, встречается в пределах северного редколесья, в частности в среднем течении рек Яна, Колыма и Индигирка [9]. В Западной Якутии проникает в таежную зону вплоть до широты г. Мирный, 62,3° с.ш. [27].

**Род Серые полевки / Gray Voles / *Microtus* Schrank, 1798**

**38. Темная полевка / Field Vole / *Microtus (Agricola) agrestis* Linnaeus 1761**

Вид встречается в Западной Якутии, заходя на север до широты г. Мирный [27], по р. Лена до устья р. Алдан [2], повсеместно малочислен.

**Семейство Мышиные / Old World Mice and Rats / MURIDAE, Illiger, 1811**

**Род Мыши-малютки / Harvest Mice / *Micromys* Dehne, 1841**

**39. Мышь-малютка / Harvest Mouse / *Micromys minutus* Pallas, 1771**

В Якутии вид малоизучен, и, по-видимому, распространен спорадически. На территории Южной Якутии отловлен в долинах рек Олекма и Чара. Встречается в нижнем течении р. Алдан, но отсутствует в бассейне его притоков верхнего течения [14]. По долине р. Лена отмечен до устья р. Лепписке [13]. На территории Западной Якутии продвигается далеко на север: самая северная находка в Якутии – верхнее течение р. Муна, 67,15° с.ш. [28], известна также в окрестностях с. Эйк [15], при этом в более южных пунктах в окрестностях городов Мирный и Удачный не отловлена [27]. Восточнее Верхоянского хребта вид отсутствует [2,9].

**Род Полевые мыши / Wood Mice / *Apodemus* Kaup, 1829**

**40. Восточноазиатская мышь / Korean Field Mouse / *Apodemus (Alsomys) peninsulae* Thomas, 1907**

Отмечена в Южной, Юго-Западной и Центральной Якутии в долинах рек Лена, Олекма, Токко, Алдан. В Западной Якутии не проникает севернее долины р. Виллой [27]. Самая северная точка отлова по р. Лена – на широте пос. Жиганск [2], далее на север в районе устья р. Бесюке нами уже не отловлена [9]. Восточнее Верхоянского хребта вид отсутствует [2, 9].

Род Домовые мыши / House mice / *Mus* Linnaeus, 1758

**41. Домовая мышь** / House Mouse / *Mus (Mus) musculus* Linnaeus, 1758

Инвазивный синантроп; в настоящее время встречается практически во всех крупных населенных пунктах Якутии, в природные местообитания не проникает, придерживаясь жилых и хозяйственных построек.

Род Крысы / Rats / *Rattus* Fischer, 1803

**42. Серая крыса (пасюк)** / Brown (Common, Norway) Rat / *Rattus norvegicus* Berkenhout, 1769

На территории Якутии сравнительно недавний инвайдер: основное расселение пришлось на вторую половину XX века. В настоящее время встречается во многих крупных поселках и городах РС (Я), в природные местообитания не проникает.

### Заключение

Таким образом, в настоящее время на территории Якутии установлено обитание 42 видов млекопитающих, относящихся к отрядам Eulipotyphla, Chiroptera, Lagomorpha, Rodentia. Распределение по отрядам следующее: 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). Расширение фаунистического списка млекопитающих относительно представления о составе териофауны в 30–70-х годах XX века [1–3] произошло, в первую очередь, из-за повышения териологической изученности территории (четыре новых вида), в частности, проведения исследований на территории Юго-Западной Якутии, которая вплоть до конца XX века была крайне слабо изучена в этом отношении. Кроме того, изменение фаунистического состава произошло за счет изменения таксономического статуса видов и подвидов, в частности, для рода *Ochotona* – вместо *O. alpina* в настоящее время указывают два вида – *O. alpina* и *O. hyperborea*, в пределах рода *Urocitellus* – выделено два вида, тогда как ранее имевшая видовой статус *Microtus hyperboreus* в настоящее время входит на уровне подвида *Alexandromys middendorffii*. Кроме того, надо отметить изменения фаунистического состава, не затрагивающие число видов, что связано с пересмотром видовых названий 13 видов, входящих в отряды Eulipotyphla, Chiroptera, Lagomorpha, Rodentia. Основу населения рассматриваемых отрядов на

территории Якутии составляют аборигенные виды (около 93 %). Чужеродные виды составляют в совокупности менее 7 %, входят в состав териофауны уже с середины XX века, из них 1 вид – *Ondatra zibethicus* – появился в результате направленных интродукционных мероприятий 1940-х годов, а *Mus musculus* и *Rattus norvegicus* являются инвазивными эусинантропами, широко расселившимися во второй половине XX века.

### Список литературы / References

1. Тугаринов А.Я., Смирнов Н.А., Иванов А.И. *Птицы и млекопитающие Якутии. К десятилетию ЯАССР. Тр. СОИС*. Л.: Изд-во АН СССР. Ленингр. отд-ние, 1934. 134 с.

[Tugarinov A.Ya., Smirnov N.A., Ivanov A.I. *Birds and mammals of Yakutia. By the tenth 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., Лабутин Ю.В. *Млекопитающие Якутии* / Отв. ред. В.А. Тавровский. М.: Наука, 1971. 660 с.

[Tavrovskij V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., Popov M.V., Labutin Yu.V. *Mammals of Yakutia*. Ed. V.A. Tavrovskij. Moscow: Nauka, 1971. (In Russ.)].

3. Попов М.В. *Определитель млекопитающих Якутии*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. 424 с.

[Popov M.V. *The identification guide of the mammals of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1977. (In Russ.)].

4. Юдин Б.С. *Насекомоядные млекопитающие Сибири (определитель)*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1971. 168 с.

[Yudin B.S. *Insectivorous mammals of Siberia (The identification guide)*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1971. (In Russ.)].

5. Юдин Б.С. К систематике трансарктической бурозубки (*S. cinereus* Kerr., 1792). *Териология*. Новосибирск, 1972.1:4–50.

[Yudin B.S. On the taxonomy of the Transarctic brown-toothed shrew (*S. cinereus* Kerr., 1792). *Teriologiya*. Novosibirsk, 1972.1:4–50. (In Russ.)].

6. Юдин Б.С. К характеристике трансарктической бурозубки (*S. cinereus* Kerr., 1792) северо-востока Сибири и Камчатки. *Фауна Сибири*. Ч. 2. Новосибирск, 1973:269–279.

[Yudin B.S. On the characteristics of the transarctic brown-tooth (*S. cinereus* Kerr., 1792) of the North-East of Siberia and Kamchatka). *Fauna Sibiri*. 2. Novosibirsk, 1973:269–279. (In Russ.)].

7. Юдин Б.С. *Насекомоядные млекопитающие Сибири*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 360 с.

[Yudin B.S. *Insectivorous mammals of Siberia*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. (In Russ.)]

8. Вольперт Я.Л., Юдин Б.С. Пространственные изменения фаунистических комплексов мелких млекопитающих Якутии. *Охотничье-промысловые ре-*

сурсь Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1986:198–202.

[Vol'pert Ya.L., Yudin B.S. Spatial Changes in Faunistic Complexes of Small Mammals of Yakutia. *Ohotnich'e-promyslovye resursy Sibiri*. B.S. Yudin (ed.). Novosibirsk: Nauka, 1986:198–202. (In Russ.)].

9. Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г. *Мелкие млекопитающие северо-востока Сибири*. Новосибирск: Наука, 2002. 246 с.

[Vol'pert Ya.L., Shadrina E.G. 2002. *Small Mammals of the North-East Siberia*. Novosibirsk, Nauka. (In Russ.)].

10. Зайцев М.В., Войта Л.Л., Шефтель Б.И. *Млекопитающие. Фауна России и сопредельных территорий. Насекомоядные*. СПб.: Наука, 2014. 391 с.

[Zaicev M.V., Voita L.L., Sheftel' B.I. *Mammals. Fauna of Russia and adjacent territories. Insectivores*. SPb: Nauka, 2014. (In Russ.)].

11. Попов М.В. Аннотированный список млекопитающих Якутии. *Бюл. НТИ ЯФ СО АН СССР*. Якутск, 1978:10–24.

[Popov M.V. Annotirovannyj spisok mlekopitayushchih Yakutii (Annotated list of mammals of Yakutia). *Byulleten NTI YaF SO AN SSSR*. Yakutsk, 1978:10–24. (In Russ.)].

12. Абрамсон Н.И., Лисовский А.А. Подсемейство Arvicolinae. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник* (Сб. тр. Зоологического музея МГУ. Т. 52). М.: Т-во научн. изданий КМК, 2012:220–276.

[Abramson N.I., Lisovsky A.A. Subfamily Arvicolinae. Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. (Eds). *Mammals of Russia: A Taxonomic and Geographic Reference* (Archive of the Zoological Museum of MSU. Vol. 52). Moscow: KMK Sci Press. 2012:220–276].

13. Ревин Ю.В., Сафронов В.М., Вольперт Я.Л., Попов А.Л. *Экология и динамика численности млекопитающих Предверхоаянья*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 200 с.

[Revin Yu.V., Safronov V.M., Volpert Ya.L., Popov A.L. *Ecology and dynamics of the mammals of Predverhoayan'ye region*. Novosibirsk: Nauka. Sib.otd-nie, 1988. (In Russ.)].

14. Ревин Ю.В. *Млекопитающие Южной Якутии*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 321 с.

[Revin Yu.V. *Mammals of Southern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1989. (In Russ.)].

15. Мордосов И.И. *Млекопитающие таежной части Западной Якутии*. Якутск: ГУП «Полиграфист» ЯНЦ СО РАН, 1997. 235 с.

[Mordosov I.I. *Mammals of the taiga of Western Yakutia*. Yakutsk: GUP «Poligrafist» YaNC SO RAN, 1997. (In Russ.)].

16. Ануфриев А.И. *Экологические механизмы температурных адаптаций млекопитающих и зимующих птиц Якутии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 216 с.

[Anufriev A.I. *Ecological mechanisms of temperature adaptations of mammals and wintering birds of*

*Yakutia*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2013. (In Russ.)].

17. 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. DOI: 10.35885/1996-1499-2021-14-4-134-156.

[Shadrina E.G., Volpert Ya.L., Okhlopov I.M. Introduction of Mammals in Yakutia: Analysis of Effectiveness, Prospects, and Negative Impacts. *Russian Journal of Biological Invasions*. 2022;13(1):105–122. DOI: 10.1134/S2075111722010131].

18. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник*. М.: Т-во научн. изданий КМК, 2012. 604 с.

[Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. (Eds). *The Mammals of Russia: A Taxonomic and Geographic Reference*. М.: KMK Sci. Press. 2012].

19. Шадрина Е.Г. Новые данные по распространению сибирского крота *Talpa (Asiascalops) altaica* Nikolsky (1883) на востоке ареала. *Зоол. ж.* 2004; 83(4):508–509.

[Shadrina E.G. [New data about dispersal of the Siberian mole *Talpa (Asiascalops) altaica* on the east of it's areal. *Zoologicheskii zhurnal*. 2004;83(4):508–509. (In Russ.)].

20. Шадрина Е.Г., Шадрин Д.Я. Фауна и экология мелких млекопитающих юго-западной Якутии. *Почвы, растительный и животный мир Юго-Западной Якутии*. Новосибирск: Наука, 2006:201–210.

[Shadrina E.G., Shadrin D.Ya. Fauna and ecology of small mammals of southwestern Yakutia. *Soils, flora and fauna of Southwestern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, 2006:201–210. (In Russ.)].

21. *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*. Ed. N.N. Vinokurov. Moscow: Nauka, 2019. (In Russ.)].

22. Вольперт Я.Л., Данилов В.А. Насекомоядные млекопитающие техногенных ландшафтов бассейна р. Алдан. *Биология насекомоядных млекопитающих: Мат-лы междунар. конф. (Кемерово, 25–28 октября 1999 г.)*. Кемерово, 1999:41–42.

[Volpert Ya.L., Danilov V.A. Insectivorous mammals of technogenic landscapes of the Aldan river basin. *Biology of insectivorous mammals: Materials of the international conference. (Kemerovo, October 25–28, 1999)*. Kemerovo, 1999:41–42. (In Russ.)].

23. Шадрина Е.Г., Шефтель Б.И. Обыкновенная бурозубка *Sorex araneus* L. (1758) – новый вид для фауны Якутии. *Вестник ЯГУ*. 2007;4(2):5–7.

[Shadrina E.G., Sheftel B.I. Common brown-tooth shrew *Sorex araneus* L. (1758), a new species for the fauna of Yakutia. *Vestnik yakutskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007;4(2):5–7. (In Russ.)].

24. Вольперт Я.Л., Величенко В.В., Прокопьев Н.П., Шадрина Е.Г. Воздействие разработки рассыпных месторождений алмазов на млекопитающих. *Экологическая безопасность при разработке рассыпных месторождений алмазов. Матер. регион. научно-практ. конф. Якутск, ноябрь 2004. г. Якутск, 2004:92–99.*  
[Volpert Ya.L., Velichenko V.V., Prokopyev N.P., Shadrina E.G. The impact of the development of placer diamond deposits on mammals]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pri razrabotke rassypnyh mestorozhdenij almazov. Materialy Region. Nauchno-prakt. konf. Yakutsk, November 2004. Yakutsk, 2004:92–99.* (In Russ.).
25. Вольперт Я.Л., Данилов В.А. Население мелких млекопитающих Анабар-Оленекского междуречья. *Вестник ИрГЦХА. 2017;83:17–24.*  
[Volpert Ya.L., Danilov V.A. Population of Small Mammals of the Anabar and Olenyok Intertributine Area. *Vestnik Irkutskoj gosudarstvennoj sel'skhozyaistvennoj akademii. 2017;83:17–24.* (In Russ.).]
26. Докучаев Н.Е., Захаров Е.С., Сафронов В.М., Пестрякова Л.А. Бурозубки (Sorex, Mammalia) низовьев р. Анабар (северо-западная Якутия). *Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2014;4:66–70.*  
[Dokuchaev N.E., Zakharov E.S., Safronov V.M., Pestryakova L.A. Shrews (Sorex, Mammalia) of the Lower Anabar River, North-West of Yakutia. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch. 2014;4:66–70.* (In Russ.).]
27. Volpert Y.L., Shadrina E.G. Latitude- and climate-associated patterns in small mammal fauna changes of the West Yakutia. *Russian J. Theriol. 2019;18(2): 33–40.* Doi: 10.15298/rusjtheriol.18.2.04.
28. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Охлопков И.М., Сидоров М.М., Данилов В.А. Население млекопитающих бассейна Верхней Муны (Арктическая зона Западной Якутии) современное состояние и прогноз. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020;25(3):74–88.* Doi: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-7.  
[Shadrina E.G., Volpert Ya.L., Okhlopkov I.M., Sidorov M.M., Danilov V.A. Mammalian Population of the Upper Muna Basin (the Arctic Zone of the West Yakutia): Current State and Forecast. *Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020;25(3):74–88.* (In Russ.).]
29. Ануфриев А.И. Механизмы зимней спячки мелких млекопитающих Якутии. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2008. 158 с.  
[Anufriev A.I. *Mechanisms of hibernation of small mammals of Yakutia.* Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. (In Russ.).]
30. Ильин В.Ю. Находка ночницы Иконникова в Южной Якутии. *Редкие виды млекопитающих СССР и их охрана. Мат-лы III Всесоюзн. совещ. 4–6 февр. 1982 г. М., 1983:49–50.*  
[Ilyin V.Yu. Finding of Ikonnikov's night-bird in Southern Yakutia. *Redkie vidy mlekopitayushchih SSSR i ih ohrana. Materials of the III Vses. confer. February 4–6, 1982. Moscow, 1983:49–50.* (In Russ.).]
31. Павлинов И.Я., Россолимо О.Л. Систематика млекопитающих СССР. Сб. тр. Зоологического музея МГУ, XXV. М.: Изд-во МГУ, 1987. 285 с.  
[Pavlinov I.Ya., Rossolimo O.L. *Systematics of mammals of the USSR. Sb. tr. Zoologicheskogo muzeya MGU. XXV. М.: Izd-vo MGU, 1987.* (In Russ.).]
32. Павлинов И.Я., Крусков С.В., Варшавский А.А., Борисенко А.В. Наземные звери России. Справочник-определитель. М.: Изд-во КМК, 2002. 298 с.  
[Pavlinov I.Ya., Kruskov S.V., Varshavsky A.A., Borisenko A.V. *Terrestrial mammals of Russia. Reference guide.* М.: Publishing house СМС, 2002. (In Russ.).]
33. Захаров Е.С., Троева И.С., Орлова М.В., Корякина Л.П., Павлова А.И. К экологии рукокрылых Центральной Якутии. *Наука и образование. 2016;4: 134–140.*  
[Zakharov E.S., Troeva I.S., Orlova M.V., Koryakina L.P., Pavlova A.I. On the Fauna and Ecology of Bats in Central Yakutia. *Nauka i obrazovanie. 2016;4:134–140.* (In Russ.).]
34. Ревин Ю.В., Боескоров Г.Г. О нахождении зимовок летучих мышей (Mammalia, Chiroptera) в Якутии. *Зоол. журн. 1989;68(3):150–151.*  
[Revin Yu.V., Boeskorov G.G. On finding wintering grounds of bats (Mammalia, Chiroptera) in Yakutia. *Zoologicheskij zhurnal. 1989;68(3):150–151.* (In Russ.).]
35. Ревин Ю.В., Ануфриев А.И. Летучие мыши (Mammalia, Chiroptera) в Якутии (видовое разнообразие, распространение, экология, зимовка, зимняя спячка). ВИНТИ. Деп.рукопись. 28.04.2004. № 711-В2004. 53 с.  
[Revin Yu.V., Anufriev A.I. *Bats (Mammalia, Chiroptera) in Yakutia (species diversity, distribution, ecology, wintering, hibernation).* VINITI. Dep.manuscript. 28.04.2004. No 711-B2004. (In Russ.).]
36. Кириллин Р.А., Соломонов Н.Г., Ануфриев А.И., Охлопков И.М. Зимовка северного кожанка (*Eptesicus Nilssonii*, Chiroptera, Vespertilionidae) в окрестностях г. Якутска (Центральная Якутия). *Зоол. журн. 2018;97(9):1171–1174.* DOI: 10.1134/S0044513418090040.  
[Kirillin R.A., Solomonov N.G., Anufriev A.I., and Okhlopkov I.M. Wintering Of The Northern Bat (*Eptesicus Nilssonii*, Chiroptera, Vespertilionidae) In The Suburbs Of The Town Of Yakutsk, Central Yakutia. *Zoologicheskij zhurnal. 2018;97(9):1171–1174.* (In Russ.).]
37. Лисовский А.А. Отряд Lagomorpha. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник (Сборник трудов Зоологического музея МГУ. 52).* М.: Т-во научн. изданий КМК, 2012:127–141.  
[Lisovsky A.A. Order Lagomorpha. Pavlinov I.Ya., Lisovsky A.A. (Eds). *Mammals of Russia: A taxonomic and Geographic Reference (Archive of the Zoological Museum of MSU. 52).* М.: КМК Sci Press, 2012:127–141].

38. Lisovsky A.A., Ivanova N.V., Borisenko A.V. Molecular phylogenetics and taxonomy of the subgenus *Pika* (*Ochotona*, Lagomorpha). *Journal of Mammalogy*. 2007;88(5):1195–1204.
39. Формозов Н.А., Григорьева Т.В., Сурин В.Л. Молекулярная систематика пищух подрода *Pika* (*Ochotona*, Lagomorpha). *Зоол. журн.* 2006;85(12):1465–1473. [Formozov N.A., Grigor'eva T.V., Surin V.L. Molecular Systematics of *Pika* of the Subgenus *Pika* (*Ochotona*, Lagomorpha). *Zoologicheskij zhurnal*. 2006;85(12):1465–1473. (In Russ.)].
40. Вольперт Я.Л. Роль антропогенных факторов в существовании млекопитающих Якутии. *Проблемы региональной экологии*. 2014:1:98–103. [Vol'pert Ya.L. The role of anthropogenic factors in the existence of mammals in Yakutia. *Regional Environmental Issues*. 2014:1:98–103. (In Russ.)].
41. Винокуров В.Н., Ахременко А.К. *Популяционная экология длиннохвостых сусликов Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1982. 164 с. [Vinokurov V.N., Akhremenko A.K. *Population ecology of long-tailed ground squirrels of Yakutia*. Yakutsk: YaF SB of the USSR Academy of Sciences, 1982. (In Russ.)].
42. Лабутин Ю.В. Ревин Ю.В., Ануфриев А.И. *Арктический суслик *Spermophilus parryi* Rich., 1825 (Sciuridae, Mammalia) в Якутии (распространение, экология, зимняя спячка)*. ВИНТИ. Деп.рукопись. № 4-B20005; 12.01.2005. 52 с. [Labutin Yu.V. Revin Yu.V., Anufriev A.I. *Arctic ground squirrel *Spermophilus parryi* Rich., 1825 (Sciuridae, Mammalia) in Yakutia*. VINITI. Dep.manuscript. №4-V20005. 12.01.2005. (In Russ.)].
43. Хляп Л.А. Семейство Sciuridae. Павлинов И.Я., Лисовский А.А. (ред.). *Млекопитающие России: систематико-географический справочник* (Сборник трудов Зоологического музея МГУ. 52). М.: Т-во научн. изданий КМК, 2012:144–171. [Khlyap L.A. Family Sciuridae. Pavlinov I.Ya., Lissovsky A.A. (Eds). *Mammals of Russia: A taxonomic and Geographic Reference* (Archive of the Zoological Museum of MSU. Vol. 52). М.: КМК Sci Press, 2012: 144–171.
44. *Ондатра северо-восточной Якутии. Экология и промысел*. Ю.В. Лабутин, Ю.С. Луковцев, М.В. Попов, Ю.В. Ревин, Н.И. Ча. М.: Наука, 1976. 188 с. [Muskkrat of northeastern Yakutia. *Ecology and hunting*. Yu.V. Labutin, Yu.S. Lukovtsev, M.V. Popov, Yu.V. Revin, N.I. Cha. М.: Nauka, 1976. (In Russ.)].
45. Чибыев В.Ю., Никифоров Н.И., Луковцев Ю.С., Охлопков И.М. Аклиматизированная ондатра (*Ondatra zibethica* L.) Якутии. *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география*. 2013;4:139–144. [Chibyev V.Yu., Nikiforov N.I., Lukovtsev Yu.S., Okhlopkov I.M. Acclimatized muskrat (*Ondatra zibethica* L.) in Yakutia]. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, geografiya*. 2013;4:139–144. (In Russ.)].
46. Сафронов В.М. К экологии сибирского (*Lemmus sibiricus*) и истории распространения копытного (*Dicrostonyx torquatus*) леммингов (Rodentia, Cricetidae) на Новосибирских островах. *Зоол. журн.* 2021; 100(1):115–120. [Safronov V.M. On the ecology of Siberian (*Lemmus sibiricus*) and the history of the distribution of ungulate (*Dicrostonyx torquatus*) lemmings (Rodentia, Cricetidae) on the Novosibirsk Islands. *Zoologicheskij zhurnal*. 2021;100(1):115–120. (In Russ.)].
47. Шадрин Е.Г., Вольперт Я.Л., Однокурцев В.А., Сидоров М.М., Данилов В.А., Яковлева М.Л. Сообщества мелких млекопитающих пригородной зоны и незастроенных территорий г. Якутска. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;24(4):97–108. [Shadrina E.G., Vol'pert Y.L., Odnokurtsev V.A., Sidorov M.M., Danilov V.A., Yakovleva M.L. Small mammals communities in the suburban area and undeveloped areas of Yakutsk city. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;4(24):97–108. (In Russ.)].
48. Bodrov S.Y., Genelt-Yanovskiy E.A., Abramson N.I., Vasiljeva V.K., Okhlopkov I.M., Mamayev N.V., Zakharov E.S., Oleinikov A.Y. Evolutionary history of mountain voles of the subgenus *Aschizomys* (Cricetidae, Rodentia), inferred from mitochondrial and nuclear markers. *Integrative Zoology*. 2020;15(3):187–201. Doi: 10.1111/1749-4877.12415. PMID: 31631516.
49. Васильева В.К., Охлопков И.М., Борисов Б.З. Распространение полевок рода *Alticola* Blandford, 1881 в Якутии и создание модели их ареала в программной среде MaxEnt. *Наука и образование*. 2017;4:135–140. [Vasil'eva V.K., Okhlopkov I.M., Borisov B.Z. Distribution of voles of the genus *Alticola* Blandford, 1881 in Yakutia and creation of a model of their range in the MaxEnt software environment. *Nauka i obrazovanie*. 2017;4:135–140. (In Russ.)].
50. Воронцов Н.Н., Боескоров Г.Г., Ляпунова Е.А., Ревин Ю.В. Новая хромосомная форма и изменчивость коренных зубов полевки *Microtus maximowiczii* (Rodentia, Cricetidae). *Зоол. журн.* 1988;67(2):205–208. [Vorontsov N.N., Boeskorov G.G., Lyapunova E.A., Revin Yu.V. New chromosomal shape and variability of the molars of the vole *Microtus maximowiczii* (Rodentia, Cricetidae). *Zoologicheskij zhurnal*. 1988;67(2):205–208. (In Russ.)].
51. Lisovsky A.A., Obolenskaya E.V., Abramson N.I., Dokuchaev N.E., Yakimenko V.V., Mal'kova M.G., Bogdanov A.S., Ivanova N.V. Geographic variation of *Microtus middendorffii* (Cricetidae, Arvicolinae, Rodentia) sensu lato studied by craniometrical and mitochondrial features. *Russian Journal of Theriology*. 2010;9(2): 71–81.

*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

*Аффилиация*

Институт биологических проблем криолитозоны ФИЦ «ЯНЦ» СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Российская Федерация.

*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, Professor, Dr. Sci. (Biology), Chief researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-mail: e-shadrina@yandex.ru

OKHLOPKOV, Innokenty Mikhailovich, Cand. Sci. (Biology), Director, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

*Affiliation*

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Federal research center «Yakut scientific center SB RAS», 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation.

*Поступила в редакцию / Submitted 20.04.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 14.06.2022*

*Принята к публикации / Accepted 14.07.2022*

## Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых (Orthoptera) таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)

### Ч. I. Сообщества прямокрылых Тюнгулюнской террасы

Ю. В. Ермакова\*, А. П. Бурнашева

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

✉ \*yermakova68@mail.ru

#### Аннотация

В первой части статьи представлены результаты многолетних исследований биотопической приуроченности, структуры и пространственного распределения сообществ прямокрылых насекомых Тюнгулюнской террасы Лено-Амгинского междуречья. Всего за период исследований в травянистых фитоценозах был выявлен 21 вид прямокрылых, в том числе редкие для фауны Якутии степные виды *Montana evermanni* (Kittary, 1849) и *Arcyptera albogeniculata* (Konnikov, 1911). При помощи показателя биотопической приуроченности были выявлены виды прямокрылых насекомых, определяющие облик сообществ, обитающих в естественных и антропогенных фитоценозах. Наиболее разнообразные и оригинальные сообщества, в состав которых входит значительное число стенобионтных видов, обнаружены на влажных поясах аласов, заочкаренных лугах и на опушках. В 2019 г. суммарное обилие прямокрылых насекомых было очень низким, при этом на средних поясах аласных лугов не было отловлено ни одного экземпляра. По сравнению с начальным периодом исследований, в настоящее время на аласных лугах наблюдается заметное снижение таксономического разнообразия прямокрылых насекомых, обусловленное усилением антропогенного влияния.

**Ключевые слова:** прямокрылые (Orthoptera), сообщество, обилие, аласные луга, приуроченность, терраса

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР № 121020500194-9).

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность д.б.н. Р.В. Десяткину за помощь в организации исследований, М.Х. Николаевой (ИБПК) за помощь в поиске литературы, а также коллегам-энтомологам за участие в сборе материала.

**Для цитирования:** Ермакова Ю.В., Бурнашева А.П. Структура и пространственное распределение сообществ прямокрылых насекомых (Orthoptera) таежно-аласных ландшафтов Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):405–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-405-414>

## Structure and spatial distribution of communities Orthoptera in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluve (Central Yakutia)

### Part I. Communities of Orthoptera on the Tyungyulyun Terrace

Yu. V. Ermakova\*, A. P. Burnasheva

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ \*yermakova68@mail.ru

#### Abstract

The first part of the article presents the results of many years of research on the biotopic confinement, structure and spatial distribution of orthopteran insect communities on the Tyungyulyunskaya terrace of the Lena-Amga interfluve.

In total, 21 orthopteran species were identified in herbaceous phytocenoses during the study period, including the steppe species *Montana evermanni* (Kittary, 1849) and *Arcyptera albogeniculata* (Ikonnikov, 1911). These are rare for the fauna of Yakutia. With the help of the index of biotopic confinement, species of orthopteran insects were identified that determine the appearance of communities living in natural and anthropogenic phytocenoses. The most diverse and original communities, which include a significant number of stenobiont species, were found on the humid belts of the alas, tussocked meadows, and forest edges. In 2019, the total abundance of Orthoptera was very low, while not a single specimen was caught in the middle belts of alas meadows. Compared with the initial period of research, a marked decrease in the taxonomic diversity of orthoptera insects is currently observed in alas meadows, due to increased anthropogenic influence.

**Keywords:** Orthoptera, community, abundance, alas meadows, confinement, terrace

**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 (theme number 0297-2021-0044, reg. number 121020500194-9).

**Acknowledgements.** The authors wish to express their gratitude to Dr. R.V. Desyatkin (IBPC, Yakutsk) for his help in organizing research, M.Kh. Nikolaeva (IBPC, Yakutsk) for her help in finding literature and fellow entomologists for participating in the collection of the material.

**For citation:** Ermakova Yu.V., Burnasheva A.P. Structure and spatial distribution of communities Orthoptera in the taiga-alas landscapes of the Lena-Amga interfluvium (Central Yakutia). Part 1. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):405–414. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-405-414>

## Введение

Прямокрылые являются одним из важнейших компонентов как природных, так и антропогенных травянистых ландшафтов. Они участвуют в круговороте питательных веществ и играют важную роль в пищевых цепочках. Некоторые виды кузнечиков могут выступать в качестве индикаторов состояния травянистых экосистем. В то же время, в период вспышек массового размножения прямокрылые являются одними из серьезных вредителей сельского хозяйства [1].

Для замкнутых аласных экосистем, водный режим которых зависит от количества выпадающих атмосферных осадков, характерны большие амплитуды циклических колебаний фитопродуктивности [2]. Динамика численности энтомоценозов аласных лугов, где ведущую биоценологическую роль играют саранчовые, сопряжена с этими циклами, в связи с чем наиболее масштабные вспышки массового размножения этих насекомых отмечаются именно на аласах Лено-Амгинского междуречья [3–6]. В настоящее время в результате интенсивного ведения хозяйственной деятельности и воздействия лесных пожаров ландшафты аласно-таежной зоны подвержены сильным процессам деградации – сокращаются площади лесов, отмечается обширная пастбищная дигрессия, падает производительность сельскохозяйственных угодий [7, 8]. Поэтому изучение особенностей структуры, таксономического разнообразия и биотопической приуроченности сообществ прямокрылых насекомых в условиях климатических изменений и усиливающегося антропогенного воздействия на экосистемы представляет

интерес как с научной, так и с практической точки зрения.

Ввиду значительного объема материала авторы посчитали возможным разделить публикацию на две части. В первой обсуждаются вопросы биотопической приуроченности прямокрылых насекомых, а также структура и пространственное распределение сообществ этих насекомых в пределах Тюнгионской террасы Лено-Амгинского междуречья.

## Материалы и методы

Материалом для настоящего сообщения послужили биоценологические исследования энтомоценозов аласных лугов в четырех пунктах в северо-восточной части Лено-Амгинского междуречья в 2019 г. (рис. 1). Также были привлечены фаунистические и биоценологические данные, собранные Ю.В. Ермаковой в период с 1990 по 1998 г. в окрестностях научного стационара ИБПК СО РАН «Тюнгионский» и А.П. Бурнашевой в 2009 г. в окрестностях с. Ус-Кюеля.

Тюнгионская терраса: окр. с. Харба-Атах, Талахтаах (N 61°46';01, E 130°48';40); окр. с. Тюнгиюлю, Ынах (N 62°9';23, E 130°38';60), Улахан Сыххан (N 62°9';26, E 130°32';32).

Система отряда и названия таксонов приводятся в соответствии с электронной базой данных Orthoptera Species File [9] и с учетом работ отечественных авторов [10–14]. При анализе структуры сообществ были использованы информационные меры разнообразия: индекс Шеннона (H'), выравненность (E), индекс доминирования Бергера–Паркера [15, 16].

Для оценки избирательности вида при выборе местообитаний использовали показатель степени биотопической приуроченности ( $F_{ij}$ ) [17]. Величина показателя  $F_{ij}$  изменяется от  $-1$ , когда вид отсутствует в данном местообитании, до  $+1$ , когда вид встречается только здесь. Нулевой показатель свидетельствует о безразличии вида к данному биотопу. Соответственно, значение показателя  $F_{ij}$  меньше нуля говорит об избегании видом данного биотопа, а больше нуля — о предпочтении видом данного биотопа, и, чем ближе показатель к единице, тем более вид приурочен к данному биотопу. Этот показатель позволяет более точно определить понятие эври- или стено-топности вида. Если вид встречается только в одном биотопе ( $+1$ ), или отдает явное предпочтение одному биотопу (больше  $+0,7$ ) при отрицательном или безразличном (близком к нулю) отношении к другим биотопам, то это стено-топный вид. Если показатели приуроченности во всех исследованных выделах равны нулю или незначительно ( $\pm 0,3$ ) отклоняются от него в ту или иную сторону, то вид следует отнести к эври-топным. Такие виды обладают достаточной экологической валентностью (пластичностью), чтобы освоить несколько биотопов [18]. Для расчетов были использованы данные, полученные в результате многолетних фаунистических и биоценологических исследований прямокрылых на научном стационаре «Тюн-Юлю» ИБПК СО РАН.

Расчеты проведены при помощи пакета программ PAST [19] и Microsoft Excel 2003.

**Описание района исследований.** Лено-Амгинское междуречье занимает восточную окраину Сибирской платформы (между  $60^\circ$  и  $64^\circ$  с.ш. и  $115^\circ$  и  $130^\circ$  в.д.) и составляет юго-восточную часть обширной Центрально-Якутской аккумулятивной равнины. Отличительной особенностью ее является широкое развитие термокарстовых депрессий – аласов, густой сетью покрывающих территорию древних аллювиальных террас р. Лена.

На Лено-Амгинском междуречье широко развиты средневысотные террасы, по мере продвижения на север к оси Нижнеалданской впадины высота террас постепенно падает. Высота Тюн-Юлюнской террасы  $66\text{--}98$  м, ширина колеблется от  $25$  до  $40$  км. Повсеместное распространение многолетнемерзлых пород способствует деформации почвогрунтов (просадка, бугры пучения и т. д.), а частичная деградация ледового

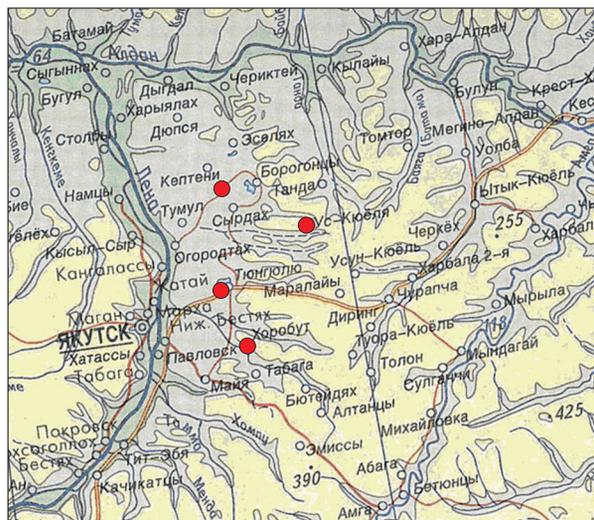


Рис. 1. Карта Лено-Амгинского междуречья с указанием пунктов сбора насекомых.

Fig. 1. Map of the Lena-Amga interfluvium with indication of insect collection points.

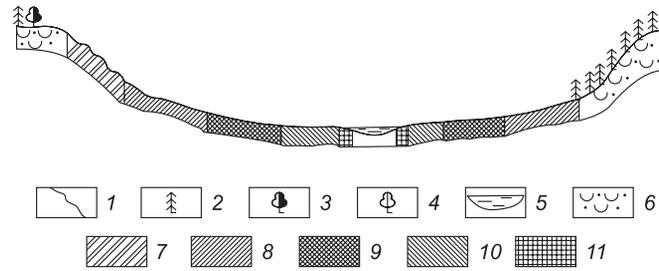
комплекса приводит к широкому распространению аласных форм рельефа [20].

Господствующим типом растительности на Лено-Амгинском междуречье является светлохвойная тайга, лиственничные леса занимают не менее  $80\%$  лесной площади [21]. Тайга прерывается безлесными пространствами в виде пойменных лугов в долинах рек, сухих ложбин, занятых ерниками, и аласных понижений, покрытых луговой и степной растительностью.

В зависимости от степени увлажнения в аласной котловине развиты различные типы лугов, которые концентрическими поясами охватывают центральное озеро (рис. 2). У самой воды находится полоса водно-прибрежной растительности, далее полоса избыточного увлажнения с осоково-злаковой и злаковой растительностью. Третья полоса – среднего увлажнения, обычно это наиболее широкая, основная часть аласа, где основу травостоя создают бескильница тонкоцветковая, ячмень луговой, лисохвост тростниковидный. Последняя, наиболее сухая полоса располагается на периферии аласа; здесь распространены сухие разнотравно-бескильницево-и разнотравно-пырейные луга. В этой полосе нередко можно встретить злаково-разнотравно-осоковую степную растительность [22].

## Результаты и обсуждение

Всего за период исследований на территории Лено-Амгинского междуречья было выявлено



**Рис. 2.** Схематический почвенно-растительный профиль аласов Лено-Амгинского междуречья по [22].

1 – байджарахи; 2 – лиственничник; 3 – березняк; 4 – ерник; 5 – озеро; 6 – мерзлотные таежные почвы (таежная растительность); 7 – мерзлотные остепненные почвы (фрагменты степной растительности); 8 – аласные остепненные почвы (остепненная растительность); 9 – аласные луговые солончаковатые почвы (настоящие или солончаковатые луга); 10 – аласные болотные почвы (влажные и заболоченные луга); 11 – аласные перегнойно-торфянистые глеевые почвы.

**Fig. 2.** Schematic soil-vegetation profile of the alasses of the Lena-Amga interfluve according to [22].

1 – baidzharakhi; 2 – larch; 3 – birch; 4 – yernik; 5 – lake; 6 – permafrost taiga soils (taiga vegetation); 7 – permafrost steppe soils (fragments of steppe vegetation); 8 – alas steppe soils (steppe vegetation); 9 – alas meadow solonchak soils (true or solonchak meadows); 10 – alas peat soils (moist and peaty meadows); 11 – alas muck-peaty gley soils.

27 видов прямокрылых из 18 родов трех семейств, что составляет 75 % фауны Центральной Якутии. В пределах Тюнгилюнской террасы обнаружен 21 вид, в том числе очень редкий для фауны Якутии южно-степной кузнечик *Montana evermanni* (Kittary, 1849), несколько экземпляров которого были отловлены первым автором в окрестностях научного стационара «Тюнгилю» в 1991 и 1992 гг. В 1997 г. в окрестностях с. Тюнгилю была обнаружена локальная популяция еще одного редкого для фауны Якутии вида – *Arcyptera albogeniculata* (Konnikov, 1911).

В июле 2019 г. на аласах Тюнгилюнской террасы было выявлено 8 видов прямокрылых, показатели суммарного обилия сообществ прямокрылых на всех поясах аласных лугов были экстремально низкими. Максимальное значение (150 экз./100 взм.) было зафиксировано на ксерофитном поясе аласа Ынах, за счет преобладания одного из опаснейших вредителей сельского хозяйства в Якутии – белополосой кобылки (*Chorthippus albomarginatus*). Особенно удивительным оказалось отсутствие прямокрылых на средних поясах аласных лугов (табл. 1), где основу травостоя составляет бескильница тонкоцветковая, наиболее предпочитаемое кормовое растение для массовых видов саранчовых.

Таксономическое разнообразие сообществ было низким на всех обследованных поясах (1–2 вида), наибольшее число видов (4) было обнаружено на ксерофитном поясе аласа Ынах, при этом в составе сообществ аласных лугов практически не встречались представители сем. Tettigoniidae, только на опушке аласа Ынах

был отловлен единственный вид *Metrioptera brachyptera*.

В июле 1997 г. во время наблюдавшейся локальной вспышки массового размножения саранчовых, на среднем поясе аласа Ынах общее обилие прямокрылых достигало 3510 экз./100 взм. При этом на остальных поясах численность была значительно ниже, на влажном поясе до 70 экз./100 взм., на сухом поясе до 320 экз./100 взм. Высокие показатели суммарного обилия на среднем поясе обеспечивались за счет белополосой кобылки – 2830 экз./100 взм. и конька короткокрылого (*Pseudochorthippus parallelus*) – 640 экз./100 взм. (табл. 2).

Наиболее высокий уровень общего и таксономического разнообразия (значение индекса Шеннона  $>2$ ) отмечался на опушке аласа Ынах, где обитали 10 видов прямокрылых, в том числе 3 вида кузнечиков. На среднем и остепненном поясах уровень общего разнообразия оказался значительно ниже за счет абсолютного доминирования белополосой кобылки. В целом в 1997 г. на всех поясах аласного луга выявлено 13 видов прямокрылых.

Также были изучены сообщества прямокрылых насекомых, приуроченные к различным вариантам рудеральной растительности. По сравнению со средним и остепненным поясами аласа, суммарное обилие оказалось довольно низким (до 142 экз./100 взм.), но показатели общего (1,44  $< H <$  1,7) и таксономического (6–7 видов) разнообразия на пастбище, залежи и остепненном склоне крупной аласной котловины Нал Тюнгилю были значительно выше. На этехе (за-

## Сообщества прямокрылых насекомых (доли видов от общего обилия) гидротермических поясов аласов Тюнгиюлюнской террасы в 2019 г.

## Communities of Orthoptera (shares of species from the total abundance) of hydrothermal belts of the alasses of the Tyungyulyun terrace in 2019.

Вид Species	Талахтаах Talakhtakh			Ынах Ynakh			Улахан Сыххан Ulakhan Sykhkhan	
	Пояса аласов Belts of alases							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	гигро hygro	ксеро xero	опушка edge	ксеро xero	опушка edge	склон остеп. steppe slope	опушка edge	ксеро xero
<i>Metrioptera brachyptera</i>	–	–	–	–	0,11	–	–	–
<i>Tetrix subulata</i>	–	–	0,1	–	–	–	–	–
<i>Omocestus viridulus</i>	–	–	–	0,067	–	–	0,88	–
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	–	1	0,5	–	–	–	–	0,2
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	–	–	–	0,067	0,11	0,5	–	–
<i>Glyptobotrus maritimus jacutus</i>	–	–	–	–	–	0,5	–	–
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	1	–	–	0,8	0,78	–	–	0,8
<i>Pseudochorthippus parallelus</i>	–	–	0,4	0,067	–	–	0,12	–
Число таксонов (S) Number of taxa (S)	1	1	3	4	3	2	2	2
Обилие экз./100 взм. Abundance pieces/100 swings	40	10	100	150	90	20	80	50
Индекс Шеннона (H') Shannon index (H')	0	0	0,94	0,72	0,68	0,69	0,38	0,50
Выравненность (E) Evenness (E)	1	1	0,86	0,51	0,66	1,00	0,73	0,82
Индекс Бергера–Паркера (d) Berger–Parker index (d)	1	1	0,50	0,80	0,78	0,50	0,88	0,80

брошенная усадьба), как и на среднем поясе аласного луга, преобладала белопологая кобылка (90 %). Всего в рудеральных местообитаниях выявлено 10 видов прямокрылых насекомых (см. табл. 2).

Прямокрылые насекомые могут служить удобным объектом для изучения структуры и функционирования сообществ беспозвоночных, благодаря небольшому числу видов, относительно высокой численности и крупным размерам, поэтому их можно использовать в качестве индикаторов при разработке типологии сообществ. Верность вида биотопу определяется тем, насколько он соответствует биологической и экологической специфике вида. Каждое сообщество состоит из трех основных элементов: 1 – виды-

индикаторы условий биотопа, 2 – виды, связанные с биотопом в период яйцекладки и развития личинок, 3 – виды, присутствие которых в составе сообщества зависит от сочетания абиотических и биотических факторов. Наличие первых двух элементов обеспечивает стабильное существование сообщества в течение длительного периода времени [23].

Для оценки избирательности вида при выборе им местообитаний был рассчитан показатель степени биотопической приуроченности ( $F_{ij}$ ) [17].

Нами были выбраны 11 типов фитоценозов, типичных для Тюнгиюлюнской террасы Лено-Амгинского междуречья. Анализ полученных значений коэффициента биотопической приуроченности позволил выявить виды, определя-

Таблица 2

Сообщества прямокрылых насекомых (доли видов от общего обилия) естественных и антропогенных ландшафтов Тюнглюнской террасы в 1997 г.

Table 2

Communities of Orthoptera (shares of species from the total abundance) in natural and anthropogenic landscapes of the Tyunglyunskaya terrace in 1997

Виды Species	Алас Ынах Alas Ynakh				Нал Тьонгюлю остеп. склон Nal Tungyulu steppe slope	кочкарник tussock	залежь fallow land	пастбище grazing	этех abandoned manor
	гигро hygro	мезо meso	ксеро херо	опушка edge					
<i>Gampsocleis sedakovii</i>			0,13	0,03			0,09		
<i>Decticus verrucivorus</i>		0,003							
<i>Montana montana</i>		0,006		0,03	0,03		0,06	0,02	0,07
<i>Metrioptera brachyptera</i>			0,06						
<i>Roeseliana roeselii</i>				0,05					
<i>Pruma primnoa</i>				0,16					
<i>Bohemanella frigida</i>								0,05	
<i>Podismopsis jacuta</i>				0,16					
<i>Omocestus viridulus</i>				0,16					
<i>O. haemorrhoidalis</i>		0,003			0,25		0,02	0,17	0,02
<i>Glyptobothrus maritimus jacutus</i>				0,11	0,23		0,20		
<i>Gomphocerus sibiricus</i>			0,13	0,11	0,01		0,30	0,09	
<i>Aeropedellus variegatus variegatus</i>					0,41				
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	1	0,81	0,69	0,05	0,04		0,24	0,44	0,90
<i>Ch. fallax</i>				0,16		0,25		0,23	
<i>Pseudochorthippus parallelus</i>		0,18							
<i>Ps. montanus</i>						0,5			
<i>Stethophyma grossum</i>						0,25			
<i>Bryodemella tuberculata</i>					0,03		0,09		
Число таксонов (S) Number of taxa (S)	1	5	4	10	7	3	7	6	3
Обилие экз./100 взм. Abundance pieces/100 swings.	70	3510	320	76	142	16	108	128	82
Индекс Шеннона (H') Shannon index (H')	0	0,55	0,95	2,14	1,44	1,04	1,70	1,44	0,37
Выравненность (E) Evenness (E)	1	0,35	0,65	0,85	0,61	0,94	0,78	0,70	0,48
Индекс Бергера– Паркера (d) Berger–Parker index (d)	1	0,81	0,69	0,16	0,41	0,5	0,30	0,44	0,90

ющие облик сообществ в модельных биотопах. Значение  $F_{ij}$  от 0,7 до 1 показывает, что условия данного биотопа наиболее благоприятны для вида. Результаты расчетов представлены в виде таблицы. В правой части в горизонтальных рядах показана характеристика приуроченности каждого вида к различным биотопам, а в вертикальных – отношение разных видов к данному биотопу (табл. 3).

Проведенные расчеты показывают, что для каждого типа травянистых фитоценозов существует специфический комплекс видов-индикаторов условий биотопа. Для влажного пояса аласных лугов таким видом является *Tetrix subulata* (сем. Tetrigidae), который встречается по берегам аласных озер. Индикаторами сообществ средних поясов аласов и мелкодолинных лугов выступает комплекс видов родов *Chorthippus* – *Pseudochorthippus*, зеленая травянка *Omocestus viridulus* и мезофильные кузнечики (*Decticus verrucivorus* и *Bicolorana roeselii*). В составе сообществ остепненных поясов и опушек довольно много общих видов, хотя сообщества опушек более разнообразны и оригинальны по видовому составу, в силу их пограничного положения и разнообразия растительных ассоциаций. Именно на опушке были отловлены очень редкие для фауны Якутии виды *Montana eversmanni* и *Arcyptera albogeniculata*. Индикаторами сообществ, приуроченных к ксерофитным вариантам рудеральной растительности, таким как этехи и залежи, служат степные (*Montana montana*, *Bryodemella tuberculata*) и ксерофильные (*Gomphocerus sibiricus*) виды. Для степных сообществ по бортам крупных аласных котловин наиболее характерным видом является *Aeropedellus variegatus variegatus*. На остепненных склонах неглубоких аласов этот вид пока не обнаружен, здесь основу сообществ формирует *Glyptobotrus maritimus jacutus* совместно с комплексом ксерофильных видов, характерных для рудеральной растительности.

Индикатором сообществ, приуроченных к наиболее влажным заболоченным участкам осоково-вейниковой растительности, является большая болотная кобылка (*Stethophyma grossum*). Для всех экологических групп значения показателя степени биотопической приуроченности для видов-индикаторов условий биотопов близки к +1 для предпочитаемых биотопов и к –1 для остальных (см. табл. 3).

Наибольшей экологической пластичностью по отношению к изученным биотопам отличаются

виды *Gampsocleis sedakovii*, *Montana montana*, *Omocestus haemorrhoidalis* и *Chorthippus albomarginatus*, хотя первые 3 вида явственно тяготеют к наиболее сухим, а последний – к мезофитным вариантам растительности.

### Заключение

Таким образом, в 2019 г. на аласных лугах Тюнгулонской террасы Лено-Амгинского междуречья было выявлено 8 видов прямокрылых насекомых из 7 родов, трех семейств.

Облик сообществ большинства травянистых фитоценозов Тюнгулонской террасы формируют степные и ксерофильные, а также эвритопные виды, тяготеющие к остепненной и рудеральной растительности. Стенотопные виды в основном встречаются на влажных поясах аласов, заочкаренных лугах и в пограничных биотопах (опушках), которые можно рассматривать в качестве экотонов [24].

Показатели суммарного обилия прямокрылых на различных гидротермических поясах всех исследованных аласов в 2019 г. оказались экстремально низкими (10–150 экз./100 взм.) по сравнению с периодами вспышек массового размножения. Так, в 2004 г., во время первой в XXI в. вспышки массового размножения, максимальные показатели достигали 3000 экз./100 взм. на необработанных аласах, после проведения химической обработки численность саранчовых падала до 1–2 экз./100 взм. [5].

За прошедшие 20 лет в сообществах прямокрылых насекомых аласных лугов Тюнгулонской террасы наблюдается падение уровня общего и таксономического разнообразия. Если в 1997 г. такие сообщества состояли в среднем из 5, а наиболее богатые видами и из 10 видов, то в 2019 г. максимальное число видов (4) было зарегистрировано только на остепненном поясе аласа Талахтаах. Заметно снизилось разнообразие настоящих кузнечиков, наиболее чувствительных к антропогенному воздействию, так, в 2019 г. на аласах был отловлен только один вид – *Metrioptera brachyptera*, хотя ранее на аласных лугах отмечалось до 5 видов Tettigoniidae. Даже наиболее массовые виды – белополосая кобылка и другие представители комплекса *Chorthippus* – *Pseudochorthippus*, ранее заселявшие все гидротермические пояса аласов, в результате проведения агрохимических мероприятий были вытеснены с наиболее предпочитаемых местообитаний на периферию аласных лугов. В условиях нара-

Значения показателя степени биотопической приуроченности  
прямокрылых Лено-Амгинского мездуречья ( $F_{ij}$ )

Table 3

Values of the indicator of the degree of biotope confinement  
of Orthoptera in the Lena-Amga interfluvium ( $F_{ij}$ )

Биотопы Biotores	Аласы Alasy				Залежи Fallow lands	Пастбища Grazings	Этехи Abandoned manors	Мелкодолинные луга Shallow valley meadows			Степной склон Steppe slope
	гигро hygro	мезо (meso)	ксеро xero	опушка edge				мезо meso	ксеро xero	кочкарник tussock	
<i>Gampsocleis sedakovii</i>	0,74	-0,36	0,16	-0,04	0,34	-1	-0,44	-1	0,90	-1	-1
<i>Decticus verrucivorus</i>	-1	0,39	-1	-1	-1	-1	-1	0,98	-1	-1	-1
<i>Montana montana</i>	-1	-0,71	0,38	-1	0,72	-0,08	0,48	-1	0,76	-1	0,28
<i>Metrioptera brachyptera</i>	-1	-1	0,84	0,82	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Bicolorana roeselii</i>	-1	-0,45	-1	-1	-1	-1	-1	0,99	-1	-1	-1
<i>Tetrix subulata</i>	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>T. bipunctata</i>	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Prumna primnoa</i>	-1	-1	0,60	0,99	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Bohemanella frigida</i>	-1	-1	-1	0,97	-1	0,88	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Omocestus viridulus</i>	0,85	-1	-1	0,94	-1	-1	-1	0,98	-1	-1	-1
<i>Omocestus haemorrhoidalis</i>	-1	-0,65	0,74	-0,85	-0,73	0,27	-0,48	-1	-0,09	-1	0,26
<i>Arcyptera fusca</i>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Arcyptera albogeniculata</i>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Gomphocerus sibiricus</i>	-1	-0,97	-0,06	0,51	0,92	0,84	-0,61	-1	-1	-1	-0,37
<i>Aeropedellus variegatus</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1
<i>Glyptobotrus maritimus jacutus</i>	-1	-1	0,04	0,16	0,91	-1	-1	-1	0,91	-1	0,90
<i>Podismopsis genicularibus</i>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Podismopsis jacuta</i>	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Chorthippus albomarginatus</i>	-0,03	0,33	-0,26	-0,40	-0,47	-0,54	0,14	-1	-0,7	-1	-0,97
<i>Ch. fallax</i>	-1	0,59	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,98	-1
<i>Pseudochorthippus parallelus</i>	-1	0,52	-1	-1	-1	0,80	-1	-1	-1	-1	-1
<i>Ch. montanus</i>	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,99	-1	0,99	-1
<i>Stethophyma grossum</i>	0,96	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,96	-1
<i>Bryodemella tuberculata</i>	-1	-1	-1	-1	0,99	-1	-1	-1	-1	-1	0,63

стающей антропогенной нагрузки на аласные экосистемы особые опасения вызывает судьба локальных популяций редких для фауны Якутии видов прямокрылых насекомых – *Montana evermanni* и *Arcyptera albogeniculata*.

### Список литературы / References

1. Лачининский А.В., Сергеев М.Г., Чильдебаев М.К., Черняховский М.Е., Локвуд Дж. А., Камбулин В.Е., Гаппаров Ф.А. *Саранчовые Казахстана, Средней Азии и сопредельных территорий*. Ларамии; 2002. 387 с.

[Lachininskiy A.V., Sergeev M.G., Chil'debayev M.K., Chernyakhovskiy M.E., Lokvud Dzh.A., Kambulin V.E., Gapparov F.A. *Saranchovyye Kazakhstana, Sredney Azii i sopredel'nykh territoriy*. Larami, 2002. 387 p. (In Russ.)].

2. Николаева М.Х., Десяткин Р.В. Продуктивность луговых фитоценозов аласов Центральной Якутии. *Ботанический журнал*. 2020;105(6):578–586.

[Nikolayeva M.Kh., Desyatkin R.V. Produktivnost' lugovykh fitotsenozov alasov Tsentral'noy Yakutii. *Botanicheskiy zhurnal*. 2020;105(6):578–586. (In Russ.)] DOI: <https://doi.org/10.31857/S0006813620060071>

3. Карелина Р.И. К вопросу о биологии белополосой кобылки в Центральной Якутии. *Ученые записки ЯГУ*. 1957;1:99–103.

[Karelina R.I. K voprosu o biologii belopolosoy kobylki v Tsentral'noy Yakutii. *Uchenyye zapiski YAGU*. 1957;1:99–103. (In Russ.)]

4. Карелина Р.И. Состояние и меры борьбы с саранчовыми в Якутии. *Сб. научн.-техн. информ.* Якутск: ЯНИИСХ, 1966;10:39–55.

[Karelina R.I. Sostoyaniye i mery bor'by s saranchovymi v Yakutii. 1966. *Sb. nauchn.-tekh. inform.* Yakutsk: YANIISKH, 1966;10:39–55. (In Russ.)]

5. Винокуров Н.Н., Багачанова А.К. *Отчет по Государственному контракту №16 на выполнение опытно-конструкторских работ по теме: «Внедрение аэрозольной обработки аласных угодий против саранчовых и мониторинг за динамикой численности нестадных саранчовых таежно-аласных ландшафтов»*. Якутск: М-во сельского хоз-ва РС (Я), ИБПК СО РАН; 2004. 29 с.

[Vinokurov N.N., Bagachanova A.K. *Otchet po Gosudarstvennomu kontraktu №16 na vypolneniye opytно-konstruktorskiykh rabot po teme: «Vnedreniye aerezol'noy obrabotki alasnykh ugodyy protiv saranchovykh i monitoring za dinamikoy chislenosti nestadnykh saranchovykh tayezhno-alasnykh landshaftov»*. Yakutsk: M-vo sel'skogo khoz-va RS (Ya), IBPK SO RAN; 2004. 29 p. (In Russ.)]

6. Багачанова А.К., Евдокарлова Т.Г. *Вредители культурных растений Якутии*. Якутск: Бичик; 2012. 64 с.

[Bagachanova A.K., Evdokarova T.G. *Vrediteli kul'turnykh rasteniy Yakutii*. Yakutsk: Bichik; 2012. 64 p. (In Russ.)]

7. Десяткин Р.В., Десяткин А.Р. Влияние увеличения глубины деятельного слоя почвы на изменение водного баланса в криолитозоне. *Почвоведение*. 2019; 11:1393–1402.

[Desyatkin R.V., Desyatkin A.R. Vliyaniye uvelicheniya glubiny deyatel'nogo sloya pochvy na izmeneniye vodnogo balansa v kriolitozone *Pochvovedeniye*. 2019; 11:1393–1402. (In Russ.)] DOI: <https://doi.org/10.1134/S003218X19110030>

8. Bouchard F., Macdonald L.A., Turner K.W., Thienpont J.R., Medeiros A.S., Biskaborn B.K., Korosi J., Hall R.J., Pienitz R., Wolfe B.B. Paleolimnology of thermokarst lakes: a window into permafrost landscape evolution. *Arctic Science*. 2016;3:91–117. DOI: <https://doi.org/10.1139/as-2016-0022>

9. Cigliano M.M., Braun H., Eades D.C., Otte D. Orthoptera Species File Online [электронный ресурс] / Orthoptera Species File (Version 5.0/5.0). URL: <http://Orthoptera.SpeciesFile.org> (дата обращения 03.03.2022).

10. Стороженко С.Ю. *Длинноусые прямокрылые насекомые (Orthoptera, Ensifera) азиатской части России*. Владивосток: Дальнаука; 2004. 280 с.

[Storozhenko S. Yu. *Dlinnousye pryamokrylye nasekomye (Orthoptera, Ensifera) aziatskoj chasti Rossii*. Vladivostok: Dal'nauka; 2004. 280 p. (In Russ.)]

11. Storozhenko S.Yu. An Annotated List of Grasshoppers and Their Allies (Orthoptera: Caelifera) of the Asian Part of Russia. *Korean Journal of Soil Zoology*, 2009;13(1–2):10–24.

12. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A. An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adjacent regions. Part 1. Suborder Ensifera. *Far Eastern Entomologist*. 2018;372:1–24. DOI: <https://doi.org/10.25221/fee.372.1>

13. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A. An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adjacent regions. Part 2. Suborder Caelifera. Tridactylidae, Tetrigidae, Acrididae: Melanoplinae, Calliptaminae and Gomphocerinae (except Gomphocerini). *Far Eastern Entomologist*. 2019;389:7–44. DOI: <https://doi.org/10.25221/fee.389.2>

14. Sergeev M.G., Storozhenko S.Yu., Benediktov A.A. An Annotated check-list of Orthoptera of Tuva and adjacent regions. Part 3. Suborder Caelifera (Acrididae: Gomphocerinae: Gomphocerini; Locustinae). *Far Eastern Entomologist*. 2020;402:1–36. DOI: <https://doi.org/10.25221/fee.402.1>

15. Малков П.Ю. *Количественный анализ биологических данных*. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ; 2005. 71 с.

[Malkov P.Yu. *Kolichestvennyy analiz biologicheskikh dannykh*. Gorno-Altaysk: RIO GAGU; 2005. 71 p. (In Russ.)]

16. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение*. М.: Мир; 1992. 181 с.

[Magurran A.E. *Ecological Diversity and Its Measurement* Moscow: Mir; 1992. 181 p. (In Russ.)]

17. Песенко Ю.А. *Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях*. М.: Наука; 1982. 288 с.

[Pesenko Yu.A. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh*. Moscow: Nauka; 1982. 288 p. (In Russ.)]

18. Наглов В.А., Загороднюк И.В. Статистический анализ приуроченности видов и структуры сообществ. *Теріофауна сходу України. Праці Теріологічної школи*. Луганськ: 2006;7:291–300.

[Nahlov V.A., Zahorodnyuk Y.V. *Statysticheskyu analiz pryurochennosty vydiv y struktury soobshchestv. Teriofauna shkodu Ukrayiny. Pratsi Teriologichnoyi shkoly*. Luhans'k: 2006;7:291–300. (In Russ.)]

19. Hammer H., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologica electronica*. 2006; 4(Suppl. 1):1–9.

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

[Solov'yev P.A. *Kriolitozona severnoy chasti Leno-Amginskogo mezhdurech'ya*. Moscow: Izd-vo AN SSSR; 1959. 143 p. (In Russ.)]

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

[Shcherbakov I.P. *Lesnoy pokrov Severo-Vostoka SSSR*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 344 p. (In Russ.)]

22. Босиков Н.П. *Эволюция аласов Центральной Якутии*. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1991. 128 с.

[Bosikov N.P. *Evolutsiya alasov Tsentral'noy Yakutii*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 1991. 128 p. (In Russ.)]

23. Правдин Ф.Н. Ортоптероидная группировка, ее структура и значение в биоценозе. *Тр. Всес. энто-мол. о-ва*. Л.: Наука; 1974(57):38–65.

[Pravdin F.N. *Ortopteroidnaya gruppirovka, yeye struktura i znacheniyе v biotsenozе. Trudy Vses. entomol. o-va*. L.: Nauka; 1974(57):38–65.

24. Соловьева В.В. Что такое «экотон»? 2014. *Самарский научный вестник*. 2(7):116–119.

[Solov'yeva V.V. *Chto takoye «ekoton»? 2014. Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2(7): 116–119. (In Russ.)]

#### Об авторах

ЕРМАКОВА Юлия Владимировна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0001-5485-9118>, Author ID: 57193325134, e-mail: [yermakova68@mail.ru](mailto:yermakova68@mail.ru)

Бурнашева Альбина Петровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <http://orcid.org/0000-0001-8010-2469>, e-mail: [a\\_burnacheva@mail.ru](mailto:a_burnacheva@mail.ru)

#### Аффилиация

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Российская Федерация.

#### About the authors

ERMAKOVA, Yulia Vladimirovna, Cand. Sci. (Biology), Researcher, <http://orcid.org/0000-0001-5485-9118>, Author ID: 57193325134, e-mail: [yermakova68@mail.ru](mailto:yermakova68@mail.ru)

BURNASHEVA, Albina Petrovna, Cand. Sci. (Biology), <http://orcid.org/0000-0001-8010-2469>, e-mail: [a\\_burnacheva@mail.ru](mailto:a_burnacheva@mail.ru)

#### Affiliation

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russian Federation.

Поступила в редакцию / Submitted 20.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 09.06.2022

Принята к публикации / Accepted 21.07.2022

## Дополнение к лишенобиоте бассейна реки Алазея (северо-восточная Якутия)

Л. Н. Порядина

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

✉ [poryadina-lena@rambler.ru](mailto:poryadina-lena@rambler.ru)

### Аннотация

В статье представлены результаты исследований некоторых накипных образцов лишенобиоты бассейна р. Алазея. Сборы лишайников произведены в различных растительных сообществах (лиственничные леса и редколесья, ивняки, ерники, тундры). Список изученной лишенобиоты насчитывает 16 видов лишайников. Из них новый вид для Якутии *Lecanora circumborealis*, впервые указываются для бассейна р. Алазея 14 видов. Для видов *Biatora subduplex*, *Cyphelium inquinans*, *Lecanora saligna* было известно единичное местонахождение в Якутии. Редкими в Якутии и на смежных территориях являются виды *Cyphelium inquinans*, *Lecanora circumborealis*. Приведенные в статье виды лишайников дополняют данные о лишенобиоте арктической Якутии.

**Ключевые слова:** лишайники, флористический район, распространение, бассейн реки Алазея, гербарий лишайников SASU

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (№ 1021061710089-0).

**Для цитирования:** Порядина Л.Н. Дополнение к лишенобиоте бассейна реки Алазея (северо-восточная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):415–422. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-415-422>

## Addition to the lichenobiota of the Alazeya River basin (north-eastern Yakutia)

L. N. Poryadina

Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation

✉ [\\*poryadina-lena@rambler.ru](mailto:*poryadina-lena@rambler.ru)

### Abstract

The article presents the data on the scale samples of lichenobiota obtained from the Alazei River basin. We have collected lichens from the various plant communities (larch forests and woodlands, willows, yerniki and tundra). The list of the studied lichenobiota includes 16 species of lichens. Among them we have identified *Lecanora circumborealis* as a new species for Yakutia. Furthermore, 14 species were indicated as new for the Alazei River basin. We specify a single location in Yakutia for the species: *Biatora subduplex*, *Cyphelium inquinans*, *Lecanora saligna*. While *Cyphelium inquinans*, *Lecanora circumborealis* belong to the rare species in Yakutia and adjacent territories. The studied lichens species supplement the data on the lichenobiota in the Arctic Yakutia.

**Keywords:** lichens, floristic area, distribution, the Alazeia River basin, SASU lichen herbarium

**Funding.** This study was carried out within the framework of the State Assignment from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project «Vegetation cover of the cryolithozone of Taiga Yakutia: biodiversity, environmental functions, protection and rational use», number 1021061710089-0).

**For citation:** Poryadina L.N. Addition to the lichenobiota of the Alazeya River basin (north-eastern Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):415–422. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-415-422>

### Введение

Река Алазея протекает по западной части Колымской низменности и впадает в Восточно-

Сибирское море. Образуясь на Алазейском плоскогорье при слиянии рек Нелькан и Кадылчан, на протяжении примерно 100 км в верховьях

р. Алазея имеет горный характер. В среднем и нижнем течении она приобретает равнинный облик, свойственным рекам арктического Севера, с частым меандрированием и сообщением через протоки с многочисленными озерами. Климат района резко-континентальный со средней годовой температурой воздуха от  $-12,5^{\circ}\text{C}$  (Среднеколымск) до  $-15,2^{\circ}\text{C}$  (Алазея). Среднегодовое количество осадков 209–276 мм. Несмотря на малое количество осадков степень увлажнения большей части поверхности избыточна, что приводит к интенсивному заболачиванию территории. Это связано с незначительным испарением и экранирующим влиянием многолетнемерзлых пород.

Среднее течение р. Алазея (участки Сватай–Аргахта–Андрюшкино) относится к Абыйско-Колымскому округу Северо-Восточной подпровинции северотаежной подзоны. Здесь равнинные территории заняты сильно заболоченными и закустаренными лиственничными лесами из *Larix cajanderi* Mayr, господствуют брусничные и багульниковые типы лесов. Вдоль берегов рек узкой полосой тянутся хвощевые ивняки, на обширных озерных депрессиях распространены переувлажненные луга.

Участок реки от пос. Андрюшкино и ниже, в пределах до 40 км, входит в Колымский округ Северо-Восточной подпровинции подзоны притундровых редкостойных лиственничных лесов. Здесь лиственничные редины чередуются с массивами полигонально-валиковых и участками крупнобугорковых закустаренных тундр. Широко распространены ерники, прибрежные ивняки, закочкаранные пушицевые тундры. Обширные пространства занимают гари в разной стадии восстановления.

Низовье реки находится в тундровой зоне и относится к Яно-Колымской подпровинции. По морскому побережью распространены приморские луга. Широко развит тундроболотный комплекс в сочетании с бугорковыми тундрами [1].

По данным геоботанических исследований для среднего течения и устья р. Алазея указывалось 20 видов лишайников. Специальные лишенологические исследования бассейна р. Алазея выполнялись впервые автором в составе комплексной экспедиции «Алазея–2008». Лишенобиота бассейна р. Алазея насчитывала 112 видов из 46 родов 20 семейств отдела Ascomycota [1].

#### Методы и материалы исследования

Основу данной статьи составляют личные сборы автора в рамках комплексной экспедиции

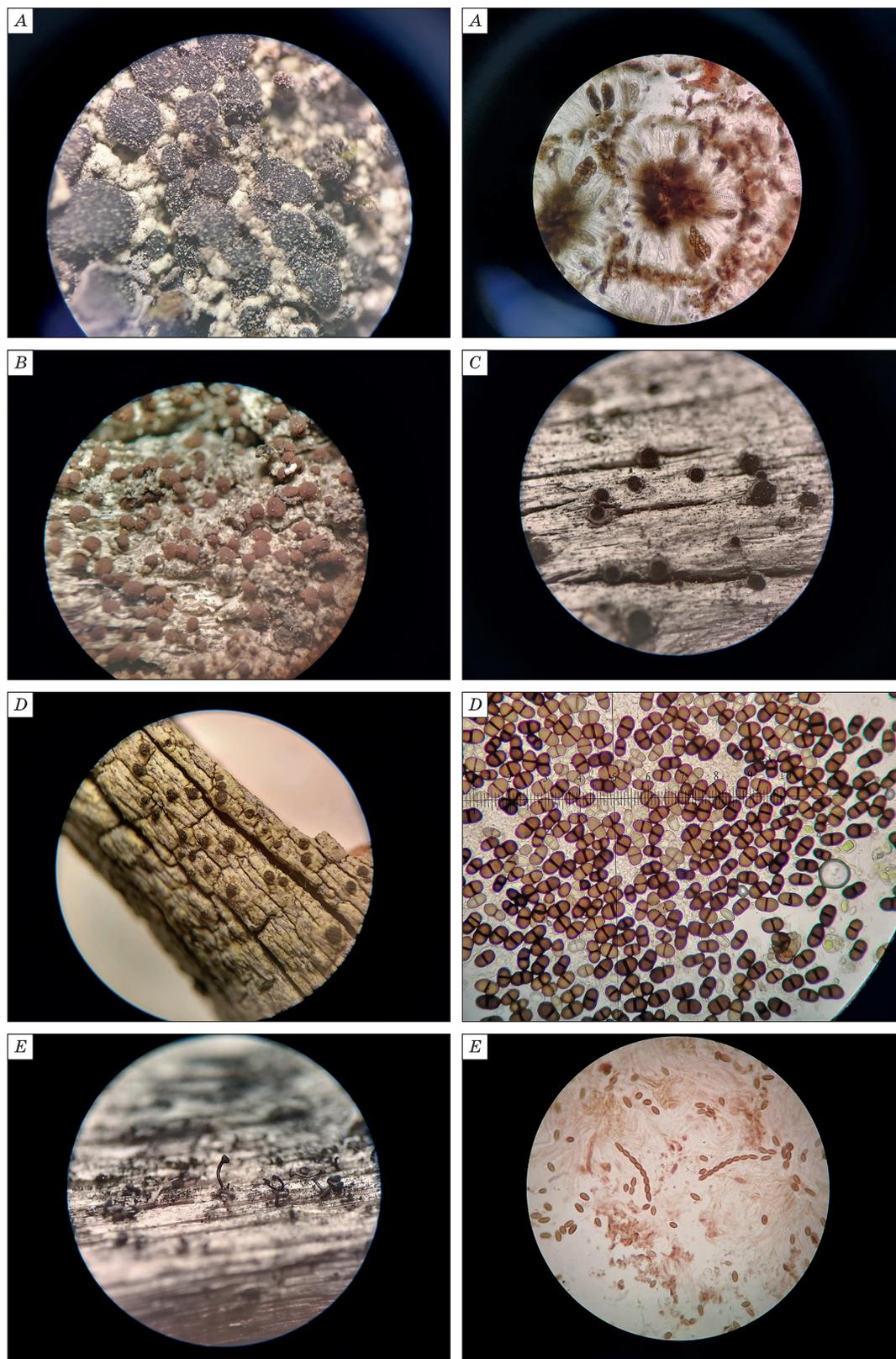
учреждений Якутского научного центра «Алазея–2008»: Института мерзлотоведения, Института биологических проблем криолитозоны, Института физико-технических проблем Севера. При сборе и определении лишайников использованы стандартная методика, различные определители, таксономические сводки, статьи [2–12]. Идентификация видов лишайников проводилась автором в лаборатории Отдела ботаники ИБПК СО РАН. Фотографии сделаны автором с использованием бинокля МСП-1 и микроскопа Motic B1-223ASC (рис. 1).

Места сбора образцов лишайников, приведенных в статье, данные описаний указаны ниже. Географические координаты определены при помощи GPS-навигатора Garmin GPSmap 60Сх.

#### Колымский флористический район (ФР):

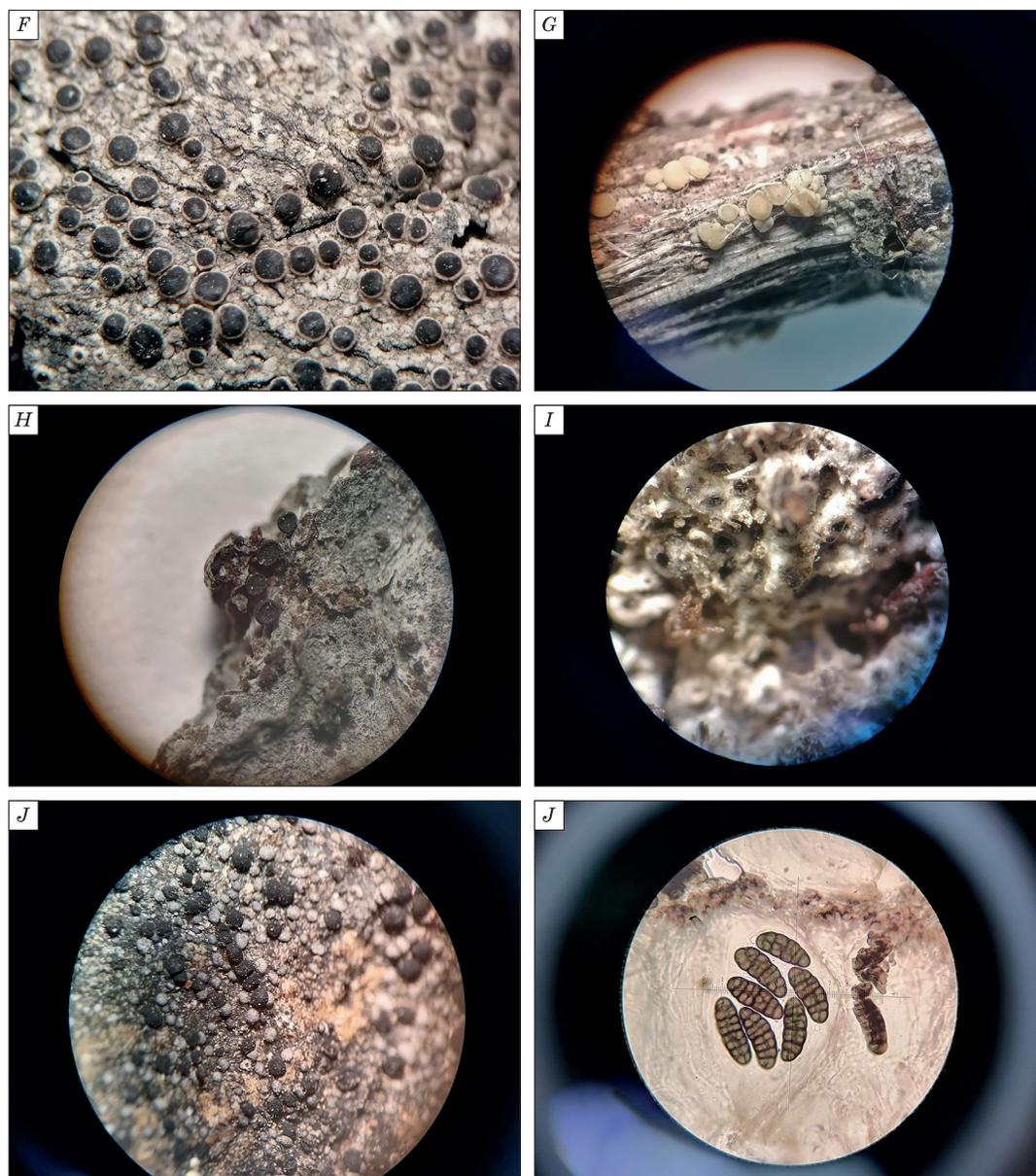
**1.** Среднеколымский район, окрестности пос. Сватай,  $68^{\circ}04'01''\text{N}$ ,  $151^{\circ}47'09.3''\text{E}$ , ивняк с примесью лиственницы, 04.09.2008; **2.** Среднеколымский район, в 30 км выше по р. Алазея от пос. Сватай (участок Эчиктээн Сиэнэ),  $68^{\circ}01'32''\text{N}$ ,  $151^{\circ}42'28''\text{E}$ , лиственничник вейниковый, 05.09.2008; **3.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея выше пос. Сватай,  $67^{\circ}56'07''\text{N}$ ,  $151^{\circ}25'47.6''\text{E}$ , лиственничник бруснично-багульниковый зеленомошный, 06.09.2008; **4.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея выше пос. Сватай,  $67^{\circ}57'23.6''\text{N}$ ,  $151^{\circ}35'46''\text{E}$ , лиственничник зеленомошный, 07.09.2008; **5.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея ниже пос. Сватай (участок Кумах),  $68^{\circ}09'11.9''\text{N}$ ,  $152^{\circ}21'51.6''\text{E}$ , лиственничник ерниковый (*Betula exilis* Sukaczew), 11.09.2008; **6.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея ниже пос. Сватай,  $68^{\circ}29'26''\text{N}$ ,  $152^{\circ}56'47.6''\text{E}$ , лиственничник с ольховником бруснично-багульниковый, 11.09.2008; **7.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея ниже пос. Сватай, склон сопки,  $68^{\circ}27'59.5''\text{N}$ ,  $153^{\circ}06'56.5''\text{E}$ , лиственничник кустарниково-ерниковый, 12.09.2008; **8.** Среднеколымский район, правый берег р. Алазея, окрестности пос. Аргахта,  $68^{\circ}26'55.1''\text{N}$ ,  $153^{\circ}22'38.3''\text{E}$ , лиственничник бруснично-багульниковый, 14.09.2008;

Арктический ФР: **9.** Нижнеколымский район, левый берег р. Алазея, устье р. Рассоха,  $69^{\circ}30'23.6''\text{N}$ ,  $155^{\circ}02'49.9''\text{E}$ , ерник грушанково-зеленомошный, 19.09.2008; **10.** Нижнеколымский район, левый берег р. Алазея, участок Таас харгы,  $69^{\circ}43'26.9''\text{N}$ ,  $155^{\circ}02'10.8''\text{E}$ , киселяхи, тундра влагищнопушицевая лишайниковая,



**Рис. 1.** (Начало).

**Fig. 1.** (Beginning).



**Рис. 1.** (Окончание). Виды лишайников, новые для бассейна р. Алазеи / **Fig. 1.** (Ending). Lichen species new to the Alazei River basin.

*A* – *Buellia geophila* (Flörke ex Sommerf.) Lyngе (шкала 2.5 мкм / scale 2.5 microns); *B* – *Biatora subduplex* (Nyl.) Printzen; *C* – *Cyphelium inquinans* (Sm.) Trevis; *D* – *Cyphelium tigillare* (Ach.) Ach. (шкала 2.5 мкм / scale 2.5 microns); *E* – *Chaenothecopsis savonica* (Räs.) Tibell; *F* – *Lecanora circumborealis* Brodo & Vitik; *G* – *Lecanora symmicta* (Ach.) Ach; *H* – *Lopadium pezizoideum* (Ach.) Körb; *I* – *Megaspora verrucosa* (Ach.) Hafellner & V. Wirth; *J* – *Rhizocarpon eupetraeum* (Nyl.) Arnold (шкала 2.5 мкм / scale 2.5 microns)

20.09.2008; **11.** Нижнеколымский район, левый берег р. Алазея, 69°39'05.4"N, 154°55'33.7"E, граница леса, лиственничная редина ерниковая, 28.09.2008; **12.** Нижнеколымский район, напротив с. Андриюшкино, левый берег р. Алазея, увал Лысый, 69°10'15.4"N, 154°24'27.5"E, лиственничное редколесье кустарничковое лишайниковозеленомошное, 29.09.2008.

### Результаты исследования и обсуждение

Список исследованной лишайнобиоты включает 16 видов лишайников. Из числа приведенных видов новыми для бассейна р. Алазея являются 14 видов.

Виды лишайников собраны в ходе комплексной экспедиции в бассейне р. Алазея. Сборы произведены в различных растительных сооб-

ществах: лиственничных лесах и редицах, ивняках, ерниках, тундрах.

Изученные виды лишайников обитают на коре стволов и ветвей деревьев, кустарников; поселяются на обнаженной древесине, растительных остатках, моховой дернине; осваивают каменистый субстрат.

Для каждого вида приводятся сведения о местонахождении, субстрате, номере образца в гербарии SASY. Указываются данные о распространении видов лишайников на территории Якутии в рамках флористического района (ФР), а также распространение на смежных территориях. Знаком \* обозначен новый вид лишайника для Якутии, знаком \*\* – новые виды для бассейна р. Алазея. Образцы лишайников хранятся в Гербарии ИБПК СО РАН (SASY).

***Amandinea punctata*** (Hoffm.) Coppins & Scheid. – 1. Кора, комля лиственницы, SASY 2008-09-04/2-7; 2. Древесина, SASY 2008-09-05/4-2; 4. Кора веточек лиственницы, SASY 2008-09-07/10-4; 6. Кора веточек лиственницы, SASY 2008-09-11/18-8; 7. Древесина веточек лиственницы, SASY 2008-09-12/19-1; 8. Кора веточек лиственницы, SASY 2008-09-14/22-1; 9. Древесина лиственницы SASY 2008-09-19/24-5. Вид распространен на древесине и коре деревьев в северотаежных лиственничных лесах, притундровых лиственничных редколесьях бассейна р. Алазея [1]. Якутия: Арктический, Яно-Инди-гирский, Центрально-Якутский ФР [22, 24]. Вид распространен на смежных территориях.

\*\****Biatora subduplex*** (Nyl.) Printzen – 11. Растительные остатки, SASY 2008-09-28/32-4. Якутия: Центрально-Якутский ФР [13]. Смежные территории: Красноярский край [36], Забайкальский край [31], Хабаровский край [32].

\*\****Buellia geophila*** (Flörke ex Sommerf.) Lynge – 11. Моховая дернина, SASY 2008-09-28/32-5. Якутия: Арктический, Яно-Инди-гирский ФР [20, 22, 38]. Смежные территории: Красноярский край [25], Иркутская область [27], Чукотский полуостров [38].

\*\****Chaenothecopsis savonica*** (Räs.) Tibell – 3. Древесина валежника, SASY 2008-09-06/9-1. Якутия: Центрально-Якутский [24], Верхне-Ленский ФР [23]. Смежные территории: Красноярский край [35, 36], Иркутская область [37].

\*\****Cyphelium inquinans*** (Sm.) Trevis. – 7. Древесина веточки лиственницы, SASY 2008-09-12/19-2. Якутия: Арктический ФР (Новосибирские о-ва [18]). Смежные территории: Иркутская область [28], Бурятия [27].

\*\****Cyphelium tigillare*** (Ach.) Ach. – 5. Древесина, SASY 2008-09-11/16-4. Якутия: Центрально-Якутский, Алданский ФР [13, 22, 24]. Смежные территории: Красноярский край [25, 26], Иркутская область [27, 28], Хабаровский край [32].

\*\****Hypocenomyce scalaris*** (Ach.) M. Choisy – 1. Кора, комля лиственницы, SASY 2008-09-04/2-7. Якутия: Яно-Инди-гирский, Центрально-Якутский, Верхне-Ленский ФР [13, 22, 23, 24]. Вид распространен на смежных территориях.

***Japewia tornoenis*** (Nyl.) Tønsberg – 11. Моховая дернина, SASY 2008-09-28/32-6. Вид ранее указывался для бассейна р. Алазея (единичное местонахождение) [1]. Якутия: Арктический ФР (бассейн р. Колыма [14], Новосибирские острова [15]). Смежные территории: Красноярский край [26], Бурятия [33], Забайкальский край [30], Хабаровский край [32], Чукотский полуостров [38].

\****Lecanora circumborealis*** Brodo & Vitik. – 9. Древесина, SASY 2008-09-19/24-4. Якутия: новый вид. Смежные территории: Забайкальский край [29], Чукотский полуостров [38].

\*\****Lecanora saligna*** (Schrad.) Zahlbr. – 11. Древесина, SASY 2008-09-28/32-7. Якутия: Яно-Инди-гирский ФР [22]. Смежные территории: Красноярский край [26], Забайкальский край [29].

\*\****Lecanora symmicta*** (Ach.) Ach. – 2. Древесина, SASY 2008-09-05/4-3. Якутия: Арктический, Яно-Инди-гирский, Центрально-Якутский, Верхне-Ленский ФР [20–24]. Смежные территории: Бурятия [33], Забайкальский край [29], Хабаровский край [32], Чукотский полуостров [38].

\*\****Lopadium pezizoideum*** (Ach.) Körb. – 11. Растительные остатки, SASY 2008-09-28/32-10; 12. Растительные остатки, SASY 2008-09-29/35-3. Якутия: Арктический ФР – бассейн р. Анабар [38, 39], дельта р. Лена [20, 21], бассейн р. Колыма [14], Новосибирские острова [15, 16]. Смежные территории: Красноярский край [25, 26], Забайкальский край [29], Хабаровский край [34], Чукотский полуостров [38].

\*\****Megaspora verrucosa*** (Ach.) Hafellner & V. Wirth – 11. Моховая дернина, SASY 2008-09-28/32-8. Якутия: Арктический ФР (бассейн р. Колыма [14], Новосибирские острова [15]), о. Самойловский [17], дельта р. Лена [19]. Смежные территории: Красноярский край [26], Бурятия [33], Забайкальский край [30], Чукотский полуостров [38].

\*\****Mycobilimbia berengeriana*** (A. Massal.) Hafellner & V. Wirth – 11. Кора лиственницы в комлевой части, SASY 2008-09-28/32-9. Якутия:

Арктический ФР (Новосибирские острова) [15], дельта р. Лена [20]. Смежные территории: Красноярский край [26], Бурятия [33], Хабаровский край [34].

\*\**Placynthiella uliginosa* (Schrad.) Coppins & P. James – 1. Растительные остатки, SASY 2008-09-04/2-9. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский ФР [22]. Смежные территории: Красноярский край [26], Иркутская область [27], Бурятия [33], Чукотский полуостров [38].

\*\**Rhizocarpon eupetraeum* (Nyl.) Arnold – 10. Силикатные камни, SASY 2008-09-20/25-11. Якутия: Арктический ФР (окрестности Тикси) [21], Оленекский, Яно-Индибирский, Алданский [22]. Смежные территории: Бурятия [33], Хабаровский край [32, 34], Чукотский полуостров [38].

### Выводы

1. В статье представлены результаты исследований автором некоторых накипных образцов лишенобиоты бассейна р. Алазея.

2. Сборы лишайников произведены в различных растительных сообществах (лиственничные леса и редколесья, ивняки, ерники, тундры).

3. Список изученной лишенобиоты насчитывает 16 видов лишайников. Из них новый вид для Якутии *Lecanora circumborealis*, впервые указываются для бассейна р. Алазея 14 видов лишайников.

4. Для видов *Biatora subduplex*, *Cyphelium inquinans*, *Lecanora saligna* было известно единичное местонахождение в Якутии.

5. Редкими в Якутии и на смежных территориях являются виды *Cyphelium inquinans*, *Lecanora circumborealis*.

6. Эколого-субстратные группы изученных видов лишенобиоты представлены разнообразно (эпифиты, эпиксилы, эпилиты, эпифитореликвиты, эпибриофиты).

### Заключение

Приведенные в статье виды лишайников дополняют данные о лишенобиоте арктической Якутии. Список лишайников бассейна р. Алазея пополнился 14 видами, новым для Якутии является вид *Lecanora circumborealis*.

### Список литературы / References

1. *Криоэкосистемы бассейна реки Алазея*. Отв. ред. А.П. Исаев, И.В. Климовский. Новосибирск: Гео; 2018. 211 с.

[*Cryoecosystems of the Alazeya River basin*. Responsible editors A.P. Isaev, I.V. Klimovskiy. Novosibirsk: Geo; 2018. 211 p. (In Russ.)]

2. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В. Сбор, определение и хранение лишенологических коллекций. *Флора лишайников России. Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников*. Отв. редакторы Андреев М.П., Гимельбрант Д.Е. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК; 2014. 392 с.

[Stepanchikova I.S., Gagarina L.V. Collection, Definition and Storage of Lichenological Collections. *Lichen Flora of Russia: Biology, Ecology, Diversity, Distribution, and Methods for Study Lichens*. Eds-in-chief: Andreev M.P., Gimelbrant D.Ye. Moscow, Saint-Petersburg: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2014. 392 p. (In Russ.)]

3. *Определитель лишайников СССР*. Л.: Наука; 1971. 412 с.

[*USSR Lichen Guide*. Leningrad: Nauka; 1971. 412 p. (In Russ.)]

4. *Определитель лишайников СССР*. Л.: Наука; 1975. 275 с.

[*USSR Lichen Guide*. Leningrad: Nauka; 1975. 275 p. (In Russ.)]

5. *Определитель лишайников России*. СПб.: Наука; 2003. 277 с.

[*USSR Lichen Guide*. Saint-Petersburg: Nauka; 2003. 277 p. (In Russ.)]

6. *Определитель лишайников России*. СПб.: Наука; 2008. 515 с.

[*Russia's Lichen Guide*. Saint-Petersburg: Nauka; 2008. 515 p. (In Russ.)]

7. Brodo I.M., Duran Sharnoff S., Sharnoff S. *Lichens of North America*. New Haven and London: Yale University Press; 2001. 828 p.

8. Nash III T.H., Ryan B.D., Diederich P., Gries C., Bongartz F. Edited by Thomas H. Nash III. *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*. Tempe, Arizona: Lichens Unlimited, School of Life Sciences, Arizona State University; 2004.

9. Nash III T.H., Gries C., Bongartz F. Edited by Thomas H. Nash III. *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*. Tempe, Arizona: Lichens Unlimited, School of Life Sciences, Arizona State University; 2007.

10. Foucard T. *Svenska Skorplavar och svampar som växer på dem*. Stockholm: Interpublishing; 2001. 392 p. [*Swedish skorplaves and mushrooms growing on them*. Stockholm: Interpublishing. 392 p. (In Swedish)].

11. LaGreca S., Thorsten Lumbsch H. Taxonomic investigations of *Lecanora strobilina* and *L. symmicta* (Lecanoraceae, Lecanorales) in northeastern North America. *The Bryologist*. 2013;116(3):287–295. DOI: 10.1639/0007-2745-116.3.287.

12. Титов А.Н. *Микокалицевые грибы (порядок Mycocaliciales) Голарктики*. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2006. 296 с.

[Titov A.N. *Mycocalic fungi (Mycocaliciales) in Holarctics*. Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2006. 296 p. (In Russ.)]

13. Галанина И.А. Дополнение к лишенобиоте дюнных комплексов (тукуланов) Центральной Якутии. *Ботанический журнал*. 2016;101(12): 1486–1497. DOI: 10.1134/S0006813616120097  
[Galanina I.A. Addition to the lichen biota of dune complexes of central yakutia. *Botanicheskiy zhurnal*. 2016;101(12):1486–1497. (In Russ.)] DOI: 10.1134/S0006813616120097
14. Zhurbenko M.P., Raynolds M.K., Walker D.A., Matveeva N.V. Lichens and lichenicolous fungi from the Kolyma delta region, Russian Arctic. *Graphis Scripta*. 2005;17:27–31.
15. Самарский М.А., Соколова М.В., Журбенко М.П., Афонина О.М. О флоре и растительности острова Жохова (Новосибирские острова). *Ботанический журнал*. 1997;82(4):62–70.  
[Samarskiy M.A., Sokolova M.V., Zhurbenko M.P., Afonina O.M. About the flora and vegetation of Zhokhov Island (Novosibirsk Islands). *Botanicheskiy zhurnal*. 1997;82(4):62–70. (In Russ.)]
16. Сумина О.И. Дополнение к флоре и растительности о. Котельного и Земли Бунге (Новосибирские острова). *Ботанический журнал*. 1986;71(7): 903–911.  
[Sumina O.I. Supplement to the flora and vegetation of Kotelnny Island and Bunge Lands (Novosibirsk Islands). *Botanicheskiy zhurnal*. 1986;71(7):903–911. (In Russ.)]
17. Журбенко М.П., Чернядьева И.В., Кожевников Ю.П. Лишайники, лишенофильные грибы, мхи и сосудистые растения острова Самойловский (Усть-Ленский заповедник, арктическая Якутия). *Новости систематики низших растений*. 2002;36:100–113.  
[Zhurbenko M.P., Chernyadeva I.V., Kozhevnikov Yu.P. Lichens, lichenicolous fungi, mosses and vascular plants of samoilovskii island (Ust-Lenskii reserve, Arctic Yakutiya). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 2002;36: 100–113. (In Russ.)]
18. Макарова И.И., Перфильева В.И., Николин Е.Г. К флоре лишайников Новосибирских островов. *Новости систематики низших растений*. 1988;25:127–134.  
[Makarova I.I., Perfiljeva V.I., Nikolin Ye.G. The lichen flora of the Novosibirsk Islands. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 1988;25:127–134. (In Russ.)]
19. Макарова И.И. Лишайники карбонатных местобитаний Усть-Ленского заповедника. *Новости систематики низших растений*. 1996;31: 126–130.  
[Makarova I.I. Lichens of carbonate habitats of the Ust-Lena Nature Reserve. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 1996;31:126–130. (In Russ.)]
20. Макарова И.И. Дополнение к лишенофлоре Усть-Ленского заповедника. *Новости систематики низших растений*. 1998;32:52–55.  
[Makarova I.I. Addition to the lichenoflora of the Ustlensky Reserve. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 1998;32:52–55. (In Russ.)]
21. Макарова И.И. К флоре лишайников низовьев реки Лены. *Новости систематики низших растений*. 1989;26:118–124.  
[Makarova I.I. The flora of lichens of the lower reaches of the Lena River. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 1989;26:118–124. (In Russ.)]
22. Порядина Л.Н. Лишайники. *Разнообразие растительного мира Якутии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2005. 326 с.  
[Poryadina L.N. Lichens. *Raznoobrazie rastitelnogo mira Yakutii*. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN; 2005. 326 p. (In Russ.)]
23. Вершинина С.Э., Гимельбрант Д.Е., Кузнецова Е.С., Габышев Э.М., Габышева Л.М. Дополнение к лишенофлоре государственного заповедника «Олекминский» (Республика Саха (Якутия). *Труды Государственного природного заповедника «Олекминский»*. Якутск: Издательский дом СВФУ. 2015;1:90–107.  
[Vershina S.E., Gimelbrant D.Ye., Kuznetsova E.S., Gabyshev E.M., Gabysheva L.M. Supplement to the lichen flora of the Olekminsky State Reserve (Republic of Sakha (Yakutia). *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Olekminskiy»*. Yakutsk: Izdatelskiy dom SVFU. 2015; 1: 90–107. (In Russ.)]
24. Порядина Л.Н. Материалы к лишенобиоте Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(3):97–109. DOI:10.31242/2618971220202539.  
[Poryadina L.N. Materials on the lichenbiota of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(3):97–109. DOI:10.31242/2618971220202539. (In Russ.)]
25. Жданов И.С. Дополнения к лишенофлоре Центральносибирского биосферного заповедника (Красноярский край). *Новости систематики низших растений*. 2013;47:200–214.  
[Zhdanov I.S. Additions to the lichen flora of Central Siberian biosphere reserve (Krasnoyarsk territory). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 2013;47: 200–214. (In Russ.)]
26. Журбенко М.П. Лишайники и лишенофильные грибы Пutorанского заповедника (аннотированный список видов). *Флора и фауна заповедников*. 2000; 89:5–53.  
[Zhurbenko M.P. Lichens and lichenophilic fungi of the Putoran Reserve (Annotated list of species). *Flora i fauna zapovednikov*. 2000;89:5–53. (In Russ.)]
27. Урбанавичюс Г.П., Урбанавичене И.Н. Лишайники. *Современное состояние биологического разнообразия на заповедных территориях России*. М.: МСОП; 2004; 3 (лишайники и мохообразные).  
[Urbanavichyus G.P., Urbanavichene I.N. Lichens. *Sovremennoe sostoyanie biologicheskogo raznoobraziya na zapovednykh territoriyakh Rossii*. Moscow: MSOP; 2004; 3 (lishayniki i mokhoobraznye). (In Russ.)]
28. Лиштва А.В. Эпифитные лишайники Витимского заповедника. *Проблемы экологии, биоразнообразия и охраны природных экосистем Прибайкалья*. Иркутск: Изд-во Иркут. университета; 2000.  
[Lishtva A.V. Epiphytic lichens of the Vitim Reserve. *Problemy ekologii, bioraznoobraziya i okhrany prirod-*

*nykh ekosistem Pribaykalya*. Irkutsk: Izd-vo Irkut. universiteta; 2000. (In Russ.)]

29. Chesnokov S., Konoreva L. Additions to the Lichen Biota of SE Siberia: Records from the Stanovoye Nagor'e Highlands (Trans-Baikal Region, Russia). *Polish Botanical Journal*. 2015;60(2):203–216. DOI:10.1515/pbj-2015-0019

30. Чесноков С.В., Лиштва А.В. Лишайники хребта Кодар: дополнение к флоре лишайников Витимского заповедника. *Известия Иркут. гос. университета*. Серия «Биология. Экология». 2016;15:37–46.

[Chesnokov S.V., Lishtva A.V. Lichens of Kodar Range: addition to the lichen flora of the Visimsky Reserve. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. Series «Biology. Ecology». 2016;15:37–46. (In Russ.)]

31. Конорева Л.А., Андреев М.П. Лишайники горных тундр хребта Кодар. *XIII Съезд русского ботанического общества. Секция лишенологии*. Тольятти. 2013;1:194–195.

[Konoreva L.A., Andreev M.P. Lichens of the mountain tundra of the Kodar range. *XIII Sezd russkogo botanicheskogo obshchestva. Sektsiya likhenologii*. Tolyatti. 2013;1:194–195. (In Russ.)]

32. Великанов А.В., Скирина И.Ф. Лишайники Ланжинских гор (северное побережье Охотского моря). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2012;2:68–77.

[Velikanov A.V., Skirina I.F. Lichens of Lanzhinsky Mountains (Northern coast of the Sea of Okhotsk). *The Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2012;2:68–77. (In Russ.)]

33. Урбанавичене И.Н., Урбанавичюс Г.П. Лишайники Байкальского заповедника (аннотированный список видов). *Флора и фауна заповедников*. 1998;68:5–53.

[Urbanavichene I.N., Urbanavichyus G.P. Lichens of the Baikal Nature Reserve (Annotated list of species). *Flora i fauna zapovednikov*. 1998;68:5–53. (In Russ.)]

34. Чабаненко С.И. Конспект флоры лишайников юга российского Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука; 2002. 232 с.

[Chabanenko S.I. *Compendium of lichen flora of the South of the Russian Far East*. Vladivostok: Dalnauka; 2002. 232 p. (In Russ.)]

35. Седельникова Н.В. Видовое разнообразие лишенобиоты Алтае-Саянского экорегиона. *Растительный мир Азиатской России*. 2013;2(12):12–54.

[Sedelnikova N.V. Species diversity of lichen biota of the Altai-Sayan ecological region. *Rastitel'nyy mir Aziatskoj Rossii*. 2013;2(12):12–54. (In Russ.)]

36. Zhdanov I. New and rare lichen records from the Central Siberian Biosphere Reserve (Krasnoyarsk Krai, Russia). II. *Folia Cryptogamica Estonica*. 2012;49:83–87.

37. Воронюк С. Э., Макрый Т. В. Калициевые лишайники лесов Восточного Присаянья. *Новости систематики низших растений*. 2002;36:89–94.

[Voronyuk S. E., Makryu T. V. Calicium lichens of the forests of the Eastern Prisyanye. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 2002;36:89–94. (In Russ.)]

38. Andreev M., Kotlov Yu., Makarova I. Checklist of lichens and lichenicolous fungi of the Russian Arctic. *The Bryologist*. 1996;99(2):137–169.

39. Макарова И.И., Перфильева В.И. К флоре лишайников северо-запада Якутии. *Новости систематики низших растений*. 1984;21:150–160.

[Makarova I.I., Perfiljeva V.I. The lichen flora of the north-west of Yakutia. *Novosti sistematiki nizshikh rastenii*. 1984;21:150–160. (In Russ.)]

#### Об авторе

ПОРЯДИНА Лена Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6445-4269>, Researcher ID: S-9860-2018 e-mail: [poryadina-lena@rambler.ru](mailto:poryadina-lena@rambler.ru)

#### Аффилиация

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, пр. Ленина, 41, г. Якутск, 677980, Российская Федерация.

#### About the author

PORYADINA, Lena Nikolaevna, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6445-4269>, Researcher ID: S-9860-2018 e-mail: [poryadina-lena@rambler.ru](mailto:poryadina-lena@rambler.ru)

#### Affiliation

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russian Federation.

Поступила в редакцию / Submitted 27.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 12.07.2022

Принята к публикации / Accepted 08.08.2022

## Экология

УДК 57.014

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-423-433>

### Онтогенетические реакции мезоструктуры листьев *Betula nana* L. на техногенный стресс в условиях Арктики

Н. В. Василевская, В. В. Стружко

Мурманский Арктический государственный университет, г. Мурманск, Российская Федерация

✉ [n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Аннотация

В статье представлены результаты исследований показателей мезоструктуры в онтогенезе листьев карликовой березы (*Betula nana* L.), произрастающей в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск. Выявлены признаки ксероморфности листьев *B. nana*: утолщение верхней и нижней эпидермы, листовой пластинки, губчатой паренхимы. В онтогенезе листьев уменьшается толщина палисадного мезофилла и снижается индекс палисадности. В результате обработки данных однофакторным дисперсионным анализом показано, что техногенное загрязнение влияет на длину палисадных клеток листа *B. nana* в июне и июле ( $p \leq 0,0005$ ) и не оказывает воздействия в августе ( $p \leq 0,1$ ). Достоверных различий размеров клеток губчатого мезофилла не выявлено, что свидетельствует об увеличении толщины губчатого слоя и листовой пластинки за счет числа периклиальных делений клеток и увеличения объема межклетников. Полученные данные являются подтверждением неспецифической реакции ассимиляционного аппарата берез на действие стрессовых факторов. Онтогенетические изменения показателей мезоструктуры *B. nana* рассматриваются как адаптивные реакции на техногенный стресс, обеспечивающие снижение транспирации и оптимальный фотосинтез в условиях загрязнения среды арктического города. Карликовая береза может быть использована как объект биомониторинга качества окружающей среды промышленных территорий Арктики и Субарктики.

**Ключевые слова:** *Betula nana*, мезофилл, онтогенез, техногенный стресс, Арктика

**Для цитирования:** Василевская Н.В., Стружко В.В. Онтогенетические реакции мезоструктуры листьев *Betula nana* L. на техногенный стресс в условиях Арктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):423–433. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-423-433>

### Ontogenetic reactions of the mesostructure of leaves of *Betula nana* L. on the technogenic stress in the Arctic

N. V. Vasilevskaya, V. V. Struzhko

Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russian Federation

✉ [n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Abstract

The article presents the results of studies of indicators of mesostructure in the ontogeny of leaves of dwarf birch (*Betula nana* L.), which grows under the influence of emissions of industrial enterprises of the city of Murmansk. Signs of xeromorphism of *B. nana* leaves were revealed: thickening of the upper and lower epidermis, leaf blade, spongy parenchyma. In the leaf ontogenesis, the thickness of the palisade mesophyll and the palisade index decreases. As a result of data processing by analysis of variance, it was found that technogenic pollution effects on the length of palisade cells of the leaves of *B. nana* in June and July ( $p \leq 0.0005$ ) and does not affect in August ( $p \leq 0.1$ ). There were no significant differences in the sizes of cells of the spongy mesophyll in the samples, which indicates an increase of the thickness of the spongy layer and leaf blade due to the number of periclinal cell divisions and increase of the volume of intercellular spaces. The obtained data confirm the nonspecific reaction of the assimilation apparatus of birch trees on the influence of stress environmental factors. The ontogenetic reactions of indicators of the mesostructure of *B. nana* are considered as adaptive responses to technogenic stress, providing the decrease in transpiration and optimal

photosynthesis under conditions of environmental pollution of the Arctic city. Dwarf birch can be used as an object for biomonitoring of environmental quality in the industrial areas of the Arctic and Subarctic.

**Keywords:** *Betula nana* L., mesophyll, ontogeny, technogenic stress, Arctic

**For citation:** Vasilevskaya N.V., Struzhko V.V. Ontogenetic reactions of the mesostructure of leaves of *Betula nana* L. on the technogenic stress in the Arctic. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):423–433. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-423-433>

### Введение

В последние десятилетия в Российской Арктике отмечается изменение климата и увеличение антропогенного воздействия вследствие активного развития промышленности, транспорта и логистики, разведки углеводородов и газа [1]. Арктические растения реагируют на изменение окружающей среды комплексом структурных и физиологических реакций ассимиляционных органов [2–7]. В условиях техногенного загрязнения среды происходит ксероморфизация листьев, что проявляется в изменении размеров листовых пластинок, клеток, толщины эпидермы и мезофилла [8–11]. Исследования воздействия промышленного загрязнения на анатомическую структуру гипоарктических видов растений промышленных зон и урбанизированных

территорий Арктики и Субарктики имеют особую актуальность, однако такие работы единичны [10–12]. Изучена мезоструктура листьев карликовой березы в природных тундровых и горно-тундровых популяциях [6, 7, 13, 14], однако в условиях техногенного загрязнения такие исследования не проводились.

Цель работы – изучение воздействия промышленного загрязнения г. Мурманск на динамику показателей мезоструктуры в онтогенезе листьев *Betula nana* L.

### Материалы и методы исследования

*Betula nana* L. (карликовая береза) – арктический циркумполярный кустарник, нанофанерофит и хамефит [15], ключевой вид субарктических кустарниковых сообществ. Характеризуется высокой пластичностью и разнообразием жизненных форм от прямостоячего кустарника до стланика. Листья *B. nana* отличаются от остальных видов берез как формой, так и карликовыми размерами: округлые, кожистые, глянцеватые (рис. 1).

Популяции *B. nana* являются климатическими реликтами, фрагментированными из-за потепления климата и антропогенного загрязнения [16], на их распространение большое влияние оказывает среднегодовая температура [17]. В Германии, Польше, Чехии, Белоруссии, Литве, Великобритании вид находится под угрозой исчезновения. Карликовая береза широко распространена в арктической Скандинавии, Исландии, Гренландии, Северной Америке. В Российской Арктике обычна на Кольском полуострове, юге Канина Носа, в низовьях Пешы, Тиманской и Малоземельской тундрах, в низовьях Печоры, на востоке Большеземельской тундры, Полярном Урале и Ямале, в низовьях Оби и Енисея [18]. В умеренно северных районах приатлантической Арктики образует ерниковые заросли в южной части тундровой зоны. В Мурманской области растет в горных и низинных тундрах, в сырых сфагновых елово-березовых лесах и на болотах [15].

*Betula nana* филогенетически молодой вид, его происхождение связано с низкими темпера-

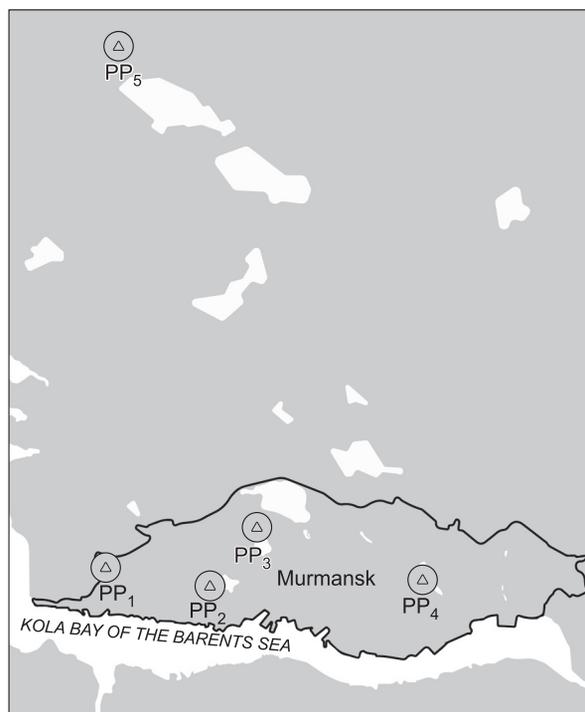


Рис. 1. *Betula nana* L. в г. Мурманск.

Fig. 1. *Betula nana* L. in Murmansk.

турами среды в ледниковый период [19]. Согласно гипотезе, подтвержденной генетическим анализом пластидной ДНК, *B. nana* распространилась в Евразии из двух основных рефугиумов, расположенных к югу и востоку от северо-европейских ледников [20]. Позднеледниковый период был для нее климатически благоприятным, в межледниковом Голоцене произошли резкие экологические изменения и карликовая береза исчезла из многих районов [21]. Современное широкое распространение вида в арктической зоне свидетельствует о его экологической пластичности [13]. Известно, что для рода *Betula* характерна интенсивная гибридизация, которая обуславливает полиморфизм видов [22], на Севере этому способствуют низкие температуры [23]. *Betula nana* часто образует гибриды как филогенетически молодой вид, имеющий несбалансированный геном [24]. В северных широтах, в верхних высотных поясах наблюдается гибридизация диплоидной *B. nana* ( $2n = 28$ ) с тетраплоидной *Betula pubescens* ( $2n = 56$ ) [4]. Отмечено большое сходство *B. nana* с *B. pubescens* по составу флавоноидов и аллелям ядерной ДНК [25]. На основе исследований ядерного генома и пластидной ДНК получены доказательства гибридизации между *B. nana* и *B. pubescens* в популяциях по всей Европе и Северной Америке [20]. Гибридизация и адаптивная интрогрессия, часто встречающиеся в роду *Betula* [26], могут играть важную роль в колонизации новых мест обитания.

Исследования проведены в г. Мурманск – морском порту России, расположенном в 300 километрах севернее Полярного круга ( $68^{\circ}58'$  с. ш.;  $33^{\circ}05'$  в. д.). Город находится в Атлантико-Арктической зоне умеренного климата, который формируется под влиянием теплого Северо-Атлантического течения Баренцева моря. Среднегодовая температура воздуха  $+1,1^{\circ}\text{C}$ , средняя температура зимы  $-7,2^{\circ}\text{C}$ , лета  $+11,1^{\circ}\text{C}$  [27]. Продолжительность полярной ночи 44 дня, полярного дня – 62. Суммарное количество осадков в Мурманске – 500 мм/год. Источниками загрязнения атмосферы являются мурманские ТЭЦ, Мурманский морской торговый порт, завод по термической обработке твердых бытовых отходов (ТО ТБО), 35-й судоремонтный завод АО ЦС «Звездочка». Основные загрязнители: токсичные металлы, нефть, полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества ( $\text{SO}_2$  и  $\text{NO}_2$ ) [28]. В последние годы увеличился объем



**Рис. 2.** Расположение экспериментальных площадок на территории г. Мурманск. PP<sub>1</sub> – 35-й завод, PP<sub>2</sub> – Морской порт, PP<sub>3</sub> – ТО ТБО, PP<sub>4</sub> – ул. Героев Рыбачьего. PP<sub>5</sub> – контроль.

**Fig. 2.** Location of the experimental sites in Murmansk. PP<sub>1</sub> – 35 Plants, PP<sub>2</sub> – Sea Port, PP<sub>3</sub> – Incineration plant, PP<sub>4</sub> – Heroev Rybachego Street. PP<sub>5</sub> – Control.

пылевых выбросов при дроблении и перевалке угля открытым способом Мурманским морским торговым портом.

В полевой сезон 2018 г. в различных районах г. Мурманск с севера на юг заложено четыре пробных площадки (рис. 2). PP<sub>1</sub> – «35-й завод» расположена на ул. Лобова, в 400 м от 35-го судоремонтного завода «Звездочка», рядом с железной дорогой и котельной «Роста», работающей на мазуте. PP<sub>2</sub> – «Морской порт» находится в окрестностях оз. Семеновское, в 953 м от Мурманского морского торгового порта. PP<sub>3</sub> – «ТО ТБО», в окрестностях оз. Среднее, в 373 м от завода по термической обработке твердых бытовых отходов. PP<sub>4</sub> расположена на ул. Героев Рыбачьего, рядом с автомобильной дорогой и гаражным кооперативом. Контрольная площадка заложена на 35-м километре Серебрянского шоссе, в северном направлении от города, в 200 м от автотрассы.

На каждой пробной площадке промаркированы 10 кустарников карликовой березы. В конце июня, июля и августа собирались листья ( $N = 50$ ) и фиксировались в растворе FAA. Исследование

мезофилла проводили методом световой микроскопии на поперечных срезах листьев при увеличении в 400 раз, с помощью окулярмикрометра. Изучены показатели: толщина верхней и нижней эпидермы, листовой пластинки, палисадного и губчатого мезофилла, длина и ширина палисадных и губчатых клеток. Индекс палисадности определяли как соотношение толщины палисадной ткани к губчатой. В каждой пробе исследованы анатомические показатели 10 листьев ( $N = 50$ ). Экспериментальные данные обработаны с помощью общепринятых методов вариационной статистики, в том числе однофакторным дисперсионным анализом. Результаты считались достоверными при  $p \leq 0,0005$ .

### Результаты и обсуждение

Анатомические исследования показали, что листья *B. nana* имеют дорсовентральное строение, с однорядным слоем палисадных клеток и многослойной губчатой паренхимой (рис. 3).

Карликовая береза является типичным гелиофитом, как и большинство тундровых растений [5]. Хорошо выражены верхняя и нижняя эпидерма, различающиеся по своему строению. Адаксиальная эпидерма крупноклеточная, сформирована слизеобразующими клетками, в верхней половине которых оптически плотное вещество, в нижней – светлое, в виде слизи [13]. Эпидерма абаксиальной стороны листа однослойная,

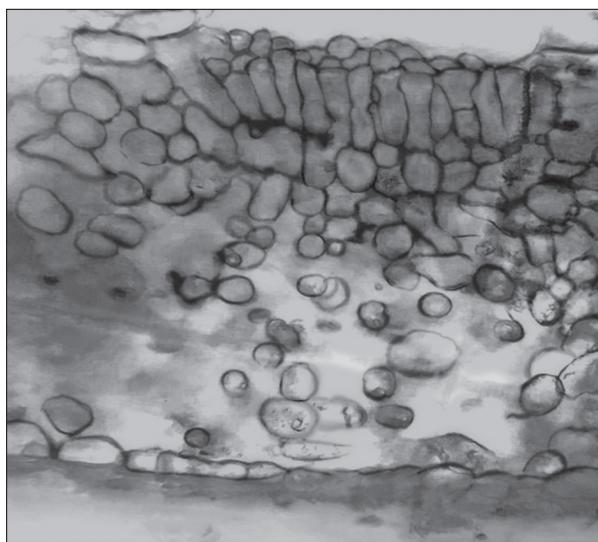


Рис. 3. Мезофилл листа *Betula nana* в окрестностях судоремонтного завода «Звездочка».

Fig. 3. Mesophyll of the leaf of *Betula nana* in the vicinity of the Zvyozdochka shipyard.

в ней не наблюдается разделения содержимого клеток. Клетки губчатой паренхимы располагаются под палисадным мезофиллом компактно, в центре и нижней части листа очень рыхло, образуя крупные межклетники (см. рис. 3).

В результате исследований верхней эпидермы в онтогенезе листьев *B. nana* получено, что в июне в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск рост эпидермальных клеток ингибирован, их высота меньше, чем в контроле, на 21–24 % (рис. 4). На ул. Героев Рыбачьего величина показателя аналогична контролю. В июле выявлено значительное утолщение верхней эпидермы листьев карликовой березы около Морского торгового порта (на 19 %) и мусоросжигательного завода (на 29 %) по сравнению с контролем, в августе на этих площадках высота эпидермальных клеток увеличивается незначительно (см. рис. 4). В окрестностях 35-го завода ингибирующий эффект пролонгирован и интенсивное утолщение верхней эпидермы происходит только к концу вегетации (см. рис. 4). Все результаты достоверны ( $p \leq 0,0001$ ).

Толщина нижней эпидермы листьев *B. nana* в июне на площадках около промышленных предприятий меньше, чем в контроле, на 21–24 % (рис. 5). Аналогичное ингибирование роста клеток верхней и нижней эпидермы было обнаружено на начальных этапах онтогенеза листьев *Acer platanoides* L в импактной зоне сталелитейного завода «Kremikovtzi» в Софийской долине (Болгария) [29]. В июле в г. Мурманск выявлен рост клеток абаксиальной эпидермы листьев карликовой березы на всех пробных площадках, однако, только в окрестностях мусоросжигательного завода значения показателя превышали контроль (см. рис. 5). В августе утолщение нижней эпидермы продолжалось только в окрестностях судоремонтного и мусоросжигательного заводов, высота клеток превосходила контроль на 20 %. На ул. Героев Рыбачьего, где нет промышленных объектов, значения показателя в онтогенезе листа близки к контролю (см. рис. 5). Результаты достоверны,  $p \leq 0,0001$ . Исследования показали, что к концу вегетационного сезона верхняя эпидерма листьев *B. nana* на всех пробных площадках г. Мурманск утолщена больше, чем нижняя. Это подтверждает результаты исследований *Vaccinium myrtillus* в окрестностях мусоросжигательного завода г. Мурманск [12]. Ряд ученых отмечает, что под воздействием техногенного стресса эпидерма листьев становится тол-

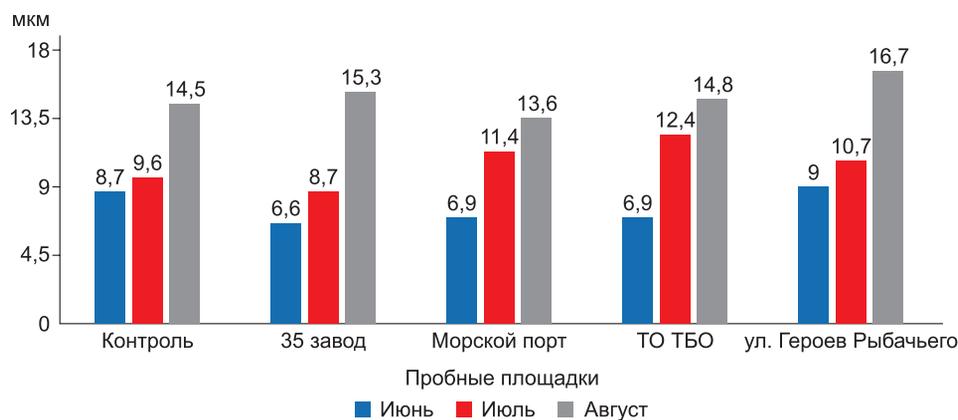


Рис. 4. Динамика изменения толщины верхней эпидермы листа *Betula nana* (мкм).

Fig. 4. The dynamics of changes of the thickness of the upper epidermis of *Betula nana*,  $\mu\text{m}$ .

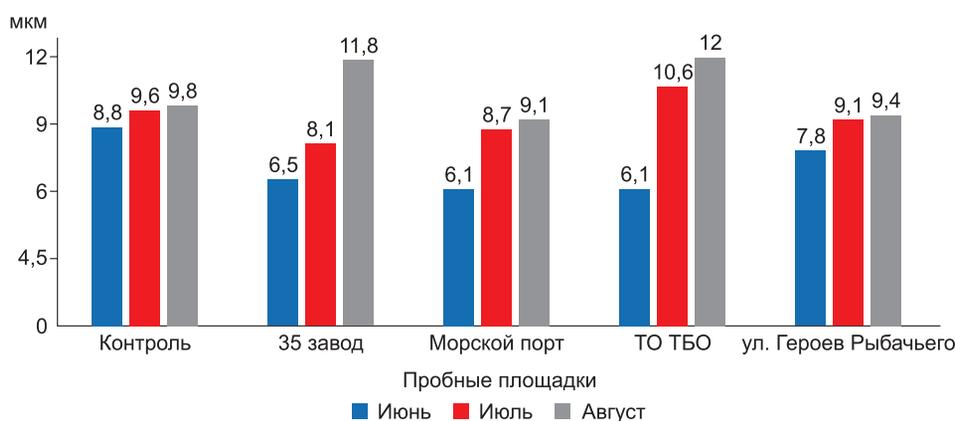


Рис. 5. Динамика изменения толщины нижней эпидермы листа *Betula nana* (мкм).

Fig. 5. The dynamics of changes of the thickness of the lower epidermis of the leaf of *Betula nana*,  $\mu\text{m}$ .

ще [30], это является адаптацией к низкой влажности и направлено на предотвращение потери воды [31].

Толщина листа *B. nana* в образцах всех пробных площадок г. Мурманск превышает контрольные значения на всех этапах его онтогенеза ( $p \leq 0,0002$ ). В июне и июле интенсивное утолщение листовых пластинок выявлено на ул. Героев Рыбачьего, в окрестностях судоремонтного и мусоросжигательного заводов (рис. 6). В августе – только около Мурманского морского торгового порта и завода ТО ТБО. Известно, что рост листа в толщину находится под сильным генетическим контролем [32], но при воздействии поллютантов и абиотических факторов он усиливается [7, 10, 33, 34]. Утолщение листьев было выявлено у *Betula czerepanovii* в импактной зоне комбината «Североникель» (г. Мончегорск) [10], *Vaccinium myrtillus* в окрестностях мусоросжигательного завода Мурманска [12].

В экспериментах в Абиско (Северная Швеция), у *B. nana* лист утолщался на 13 % с повышением температуры на 3–4 °C [7]. Утолщение листа является признаком ксероморфности и адаптивной реакцией, ограничивающей влияние стрессового фактора [11]. При этом внутренняя фотосинтетическая поверхность увеличивается и поддерживает оптимальную интенсивность фотосинтеза.

Толщина слоя палисадных клеток листьев *B. nana* в июне в окрестностях Мурманского морского порта (на 24 %) и завода по переработке ТБО (на 15 %) меньше, чем в контроле (рис. 7). Около судоремонтного завода и на ул. Героев Рыбачьего в начале онтогенеза листьев значения аналогичны контролю. На всех площадках, кроме окрестностей морского порта, где отмечается сильное запыление, выявлено снижение толщины палисадного мезофилла в онтогенезе листьев ( $p \leq 0,0002$ ) (см. рис. 7).

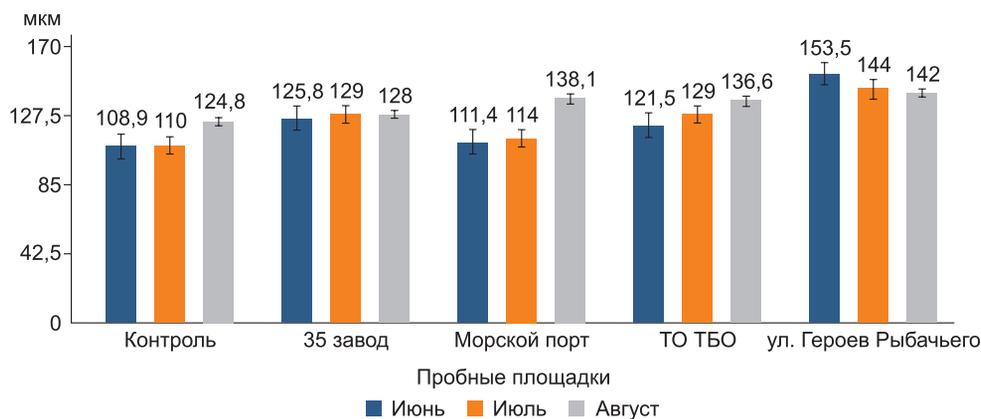


Рис. 6. Динамика изменения толщины листа *Betula nana* (мкм).

Fig. 6. The dynamics of changes of thickness of the leaf of *Betula nana*,  $\mu\text{m}$ .

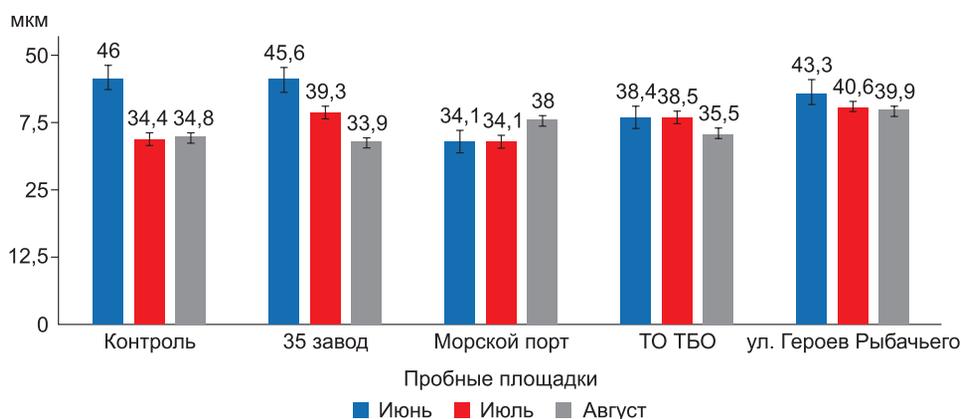


Рис. 7. Динамика изменения толщины палисадного мезофилла *Betula nana* (мкм).

Fig. 7. The dynamics of changes in the thickness of the palisade mesophyll of *Betula nana*,  $\mu\text{m}$ .

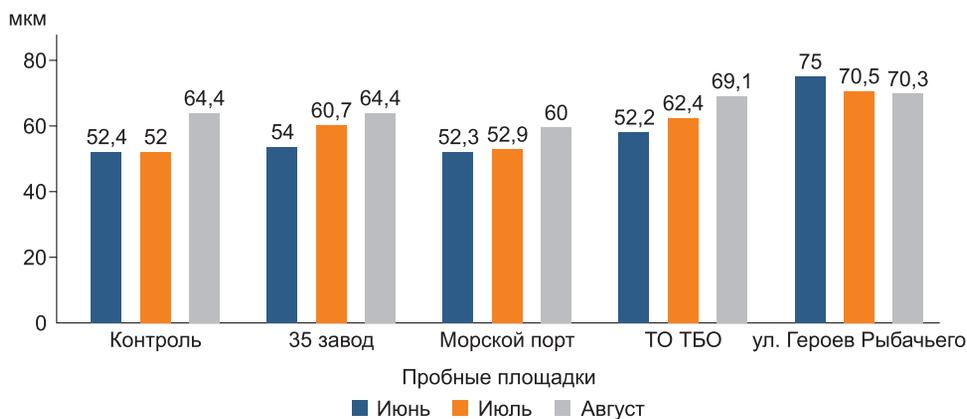


Рис. 8. Динамика изменений толщины губчатого мезофилла *Betula nana* (мкм).

Fig. 8. The dynamics of changes in the thickness of the spongy mesophyll of *Betula nana*,  $\mu\text{m}$ .

Толщина губчатого мезофилла в июне близка к контролю на всех площадках, кроме ул. Героев Рыбачьего (рис. 8). В июле губчатая паренхи-

ма утолщалась в окрестностях судоремонтного и мусоросжигательного заводов, в августе – около промышленных предприятий и в контроле.

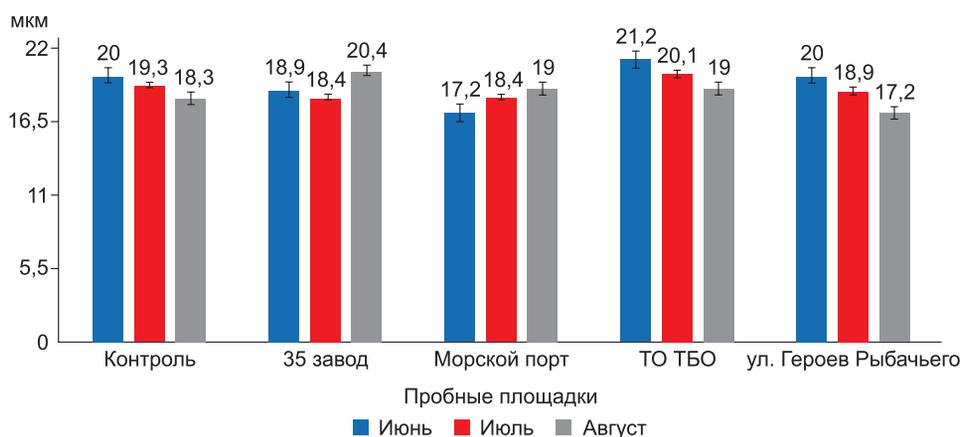


Рис. 9. Динамика изменения длины клеток палисадного мезофилла *Betula nana* (мкм).

Fig. 9. The dynamics of change of cell length of the palisade mesophyll of *Betula nana*, µm.

Исследования показали, что соотношение палисадной и губчатой паренхимы изменяется в онтогенезе листьев *B. nana*. В окрестностях судоремонтного и мусоросжигательного заводов, ул. Героев Рыбачьего и в контроле выявлено уменьшение толщины палисадного мезофилла к концу августа. Это подтверждается снижением индекса палисадности (соотношение толщины палисадной и губчатой ткани) в процессе онтогенетического развития листа (см. таблицу).

Изменение пространственной структуры мезофилла листа является основой формирования адаптивных реакций [34, 35]. У различных видов растений в ответ на действие одних и тех же экологических факторов изменяются разные структурные параметры мезофилла [35]. Результаты исследований *B. nana* в Мурманске во многом отличаются от данных по другим видам берез в импактных районах [10, 36, 37]. В окрестностях комбината «Североникель» у *B. czerepanovii* происходит утолщение палисадного мезофилла и увеличение индекса палисадности [10]. В Башкортостане у *B. pendula* на отвалах горно-обогатительных комбинатов выявлено увеличение

толщины листа за счет столбчатого и губчатого мезофилла [36, 37]. Аналогичные результаты получены для *B. pendula* на золоотвалах Среднеуральской ГРЭС (г. Екатеринбург) [38]. В то же время, Н.Н. Егоровой [36] показано, что в онтогенезе листьев *B. pendula* в зоне воздействия тяжелых металлов в Предуралье на некоторых экспериментальных площадках происходило утолщение губчатой паренхимы почти в 2 раза.

Изучение параметров палисадных клеток *B. nana* показало, что в июне и июле в окрестностях Мурманского морского порта и судоремонтного завода их рост в длину ингибирован. В образцах листьев карликовой березы с пробной площадки «ТО ТБО» значения параметра выше, чем в контроле (рис. 9). В результате обработки данных однофакторным дисперсионным анализом получено, что техногенное загрязнение влияет на длину палисадных клеток листа *B. nana* в июне и июле ( $p \leq 0,0005$ ) и не оказывают воздействия в августе ( $p \leq 0,1$ ).

Ширина палисадных клеток листа *B. nana* в июньских пробах составляет 5,2–5,7 мкм, в июле

### Индекс палисадности листьев *Betula nana* в г. Мурманск

#### The palisade index of leaves of *Betula nana* in Murmansk

Месяц / Month	Контроль / Control	35 завод / 35 Plant	Морской порт / Sea Port	ТО ТБО / Incineration Plant	Улица Героев Рыбачьего / Geroev Rybachego Street
Июнь	0,75	0,84	0,7	0,66	0,6
Июль	0,65	0,67	0,56	0,56	0,64
Август	0,51	0,53	0,63	0,57	0,57

5,2–5,7 мкм, в августе 6,1–6,7 мкм. Получено, что различия между площадками по данному показателю не достоверны ( $p \leq 2$ ).

Длина губчатых клеток листьев *B. pana* в июне варьирует по площадкам г. Мурманск в диапазоне 11,0–11,7 мкм, в июле 10,6–12,6 мкм, в августе 10,6–12,6 мкм. Дисперсионный анализ показал, что различия между пробными площадками не достоверны ( $p \leq 0,7$ ). Ширина губчатых клеток в июне варьирует в диапазоне 6,4–6,9 мкм, в июле 6,6–6,7 мкм, в августе 5,9–6,3 мкм. В течение июня и июля величина показателя во всех пробах близка к контрольным значениям. Техногенный стресс не оказывает воздействия на ширину губчатых клеток в июне и июле ( $p \leq 0,5$ ). В августе диаметр губчатых клеток снижается на всех площадках, включая контроль ( $p \leq 0,0001$ ).

Изменение структурных параметров мезофилла листа растений разных экологических групп генетически детерминировано и может быть связано с содержанием ДНК в клетке [33, 39]. Однако, размеры клеток паренхимы листа изменяются в окрестностях промышленных предприятий [10, 12]. В импактной зоне комбината «Североникель» выявлено утолщение листьев *Betula czerepanovii* за счет удлинения палисадных и губчатых клеток, что подтверждено высокими значениями коэффициентов корреляции между длиной клеток и содержанием в них никеля и меди [10]. В листьях *Vaccinium myrtillus* из окрестностей мусоросжигательного завода г. Мурманск увеличение длины клеток столбчатой паренхимы составило 22–25 % и губчатой 40–50 % по сравнению с контролем [12]. Поскольку в г. Мурманск не выявлено достоверного увеличения параметров клеток листьев *B. pana*, то, по-видимому, утолщение листьев и губчатого мезофилла в окрестностях промышленных предприятий происходит за счет увеличения числа слоев губчатой паренхимы и объема межклетников. Микрофиллия и утолщение листьев являются характерным признаком арктических растений, что связано с увеличением периклиальных делений клеток мезофилла [5]. Число антиклинальных делений в листьях многих видов растений Севера, в частности представителей рода *Betula*, значительно меньше, чем у растений умеренного климата [2]. В то же время количество периклиальных делений в ряде случаев увеличивается, соответственно возрастает и число слоев клеток мезофилла. По мнению

Е.А. Мирославова [2], это свидетельствует о неспецифичности структурной реакции растений арктических широт на экстремальные условия окружающей среды.

### Заключение

Онтогенетические реакции мезофилла листьев *B. pana* впервые изучены в условиях морского климата и промышленного загрязнения среды арктической урбанизированной территории. Под воздействием техногенного стресса у карликовой березы отмечены признаки ксероморфной структуры ассимилирующих органов, повышающие устойчивость растений к загрязнению среды: утолщение верхней и нижней эпидермы, листовой пластинки, губчатого мезофилла. В онтогенезе листьев *B. pana* выявлено уменьшение толщины палисадного мезофилла и снижение индекса палисадности. Структурные изменения листьев карликовой березы являются адаптивными реакциями на техногенный стресс, обеспечивая уменьшение транспирации и оптимальный фотосинтез в условиях загрязнения среды арктического города. Аналогичные данные получены для видов рода *Betula* Ю.В. Гамалеем [40] в экстремальных условиях произрастания, что, как считает автор, свидетельствует о неспецифической реакции ассимиляционного аппарата берез на действие стрессовых факторов. Необходимы дальнейшие исследования особенностей развития мезоструктуры листьев гипоарктических видов древесных растений и кустарников в условиях загрязнения городской среды. Карликовая береза может быть использована как объект биомониторинга качества окружающей среды промышленных территорий Арктики и Субарктики.

### Литература / References

1. Abakumov E., Shamilishviliy G., Yurtaev A. Soil polychemical contamination on Belyi island as key background and reference plot for Yamal region. *Polish Polar Research Journal*. 2017;30:313–332. DOI: 10.1515/popore-2017-0020
2. Мирославов Е.А., Вознесенская Е.В., Котева Н.К. Сравнительная характеристика анатомии листа растений арктической и бореальной зон. *Ботанический журнал*. 1998;83(3):21–27.  
[Miroslavov E. A., Voznesenskaya E. V., Koteeva N. K. Comparative characteristics of the leaf anatomy of plants of the arctic and boreal zones. *Botanicheskii Zhurnal*. 1998;83(3):21–27. (In Russ.)]

3. Kudo G., Suzuki S. Warming effects on growth, production, and vegetation structure of alpine shrubs: a five-year experiment in northern Japan. *Oecologia*. 2003; 135:280–287. DOI:10.1007/s00442-003-1179-6
4. Thorsson Æ.Th., Palsson S., Sigurgeirsson A., Ananthawat-Jonsson K. Morphological variation among *B. nana* (diploid), *Betula pubescens* (tetraploid) and their triploid hybrids in Iceland. *Annals of Botany*. 2007;99: 1183–1193. DOI:10.1093/aob/mcm060
5. Василевская Н. В. *Экология растений Арктики*. Мурманск: МГПУ; 2014. 184 с.  
[Vasilevskaya N. V. *Plant Ecology of the Arctic*. Murmansk: MGPU; 2014. 184 p. (In Russ.)]
6. Schollert M. *Arctic vegetation under climate change – biogenic volatile organic compound emission and leaf anatomy*. PHD Thesis. Copenhagen; 2015. 213 p.
7. Schollert M., Kivimäenpää M., Valolahti H. M., Rinnan R. Climate change alters leaf anatomy but has no effects on volatile emissions from arctic plants. *Plant, Cell and Environment*. 2015;38:2048–2060. DOI: 10.1111/pce.12530
8. Kravkina I.M., Miroslavov E.A. Effect of atmospheric pollutants on the dynamics of mitochondria and chloroplast in the chlorenchyma cells of Scots pine needles. *Aerial pollution in Kola Peninsula*. Apatity; 1993:233–235.
9. Lamppu J., Roito M., Tikkanen S. Indication of pollution-induced stress on forest trees and lichens in Lapland. *Aerial pollution in Kola Peninsula*. Apatity; 1993:266–267.
10. Лукина Ю.М., Василевская Н.В. Воздействие промышленного загрязнения на строение листа *Betula czerepanovii* (Betulaceae). *Растительные ресурсы*. 2012;48(1):51–58.  
[Lukina Yu.M., Vasilevskaya N.V. Impact of industrial pollution on the leaf structure of *Betula czerepanovii* (Betulaceae). *Rastitelnye Resursy*. 2012;48:51–58. (In Russ.)]
11. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч. 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата. *Биосфера*. 2021;13 (3):86–100. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.578  
[Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Technogenesis and structure-functional reactions of tree species: damage, adaptations, strategies. Part 1. Influence on the macro- and micromorphology of the assimilation apparatus. *Biosfera*. 2021;13(3):86–100. DOI: 10.24855/biosfera.v13i3.578 (In Russ.)]
12. Яковлев А.П. Мониторинг роста и развития *Vaccinium myrtillus* L. в окрестностях завода по термической обработке твердых бытовых отходов г. Мурманска. *Естественнонаучные проблемы Арктического региона*. Мурманск; 2007:87–88.  
[Yakovlev A.P. Monitoring of the growth and development of *Vaccinium myrtillus* L. in the vicinity of the plant for the thermal treatment of municipal solid waste in the city of Murmansk. *Natural Science Problems of the Arctic Region*. Murmansk; 2007:87–88. (In Russ.)]
13. Плюснина С.Н., Загирова С.В. Структура фотосинтетического аппарата *Betula nana* (Betulaceae) на Северном и Приполярном Урале. *Ботанический журнал*. 2016;3:261–274.  
[Plyusnina S.N., Zagirova S.V. Structure of the photosynthetic apparatus of *Betula nana* (Betulaceae) in the Northern and Subpolar Urals. *Botanicheskii Zhurnal*. 2016;3:261–274. (In Russ.)]
14. Плюснина С.Н., Панюков А.Н. Вариабельность структурных параметров листа *Betula nana* L. в кустарничковых сообществах северных гипоарктических тундр. *Систематические и флористические исследования северной Евразии*. М.: МГПУ; 2018:181–184.  
[Plyusnina S.N., Panyukov A.N. Variability of structural parameters of the leaves of *Betula nana* L. in shrub communities of the northern hypoarctic tundras. *Systematic and Floristic Studies of the Northern Eurasia*. Moscow: MGPU; 2018:181–184. (In Russ.)]
15. *Флора Мурманской области*. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1956. Вып. 3. 449 с.  
[*Flora of the Murmansk Region*. Moscow; Leningrad; 1956. Iss. 3. 449 p. (In Russ.)]
16. Jadwiszczak K.A., Kłowski S., Zalewska I., Banaszek A., Chrzanowska A. Genetic diversity and sexual reproduction in relict populations of *Betula nana*. *Silva Fennica*. 2017;51:18 p. DOI:10.14214/sf.5643
17. Borrell J.S., Zohren J., Nichols R.A., Buggs R.J.A. Genomic assessment of local adaptation in dwarf birch to inform assisted gene flow. *Evolutionary Applications*. 2020;13:161–175. DOI:10.1111/eva.12883
18. *Арктическая флора СССР*. М.; Л.: Наука; 1966:5. *Salicaceae–Portulacaceae*. 206 с.  
[*Arctic Flora of the USSR*. Moskva; Leningrad: Nauka, 1966;5. Salicaceae – Portulacaceae. 206 p. (In Russ.)]
19. Provan J., Bennett K.D. Phylogeographic insights into cryptic glacial refugia. *Trends in Ecology and Evolution*. 2008;23:564–571. DOI: 10.1016/j.tree.2008.06.010
20. Eidesen P.B., Alsos I.G., Brochmann C. Comparative analyses of plastid and AFLP data suggest different colonization history and asymmetric hybridization between *Betula pubescens* and *B. nana*. *Molecular Ecology*. 2015;24:3993–4009. DOI: 10.1111/mec.13289
21. Heikkilä M., Fontana S.L., Seppä H. Rapid Lateglacial tree population dynamics and ecosystem changes in the eastern Baltic region. *Journal of Quaternary Science*. 2009;24:802–815. DOI: 10.1002/jqs.1254
22. Palme A.E., Su Q., Palsson S., Lascoux M. Extensive sharing of chloroplast haplotypes among European birches indicates hybridization among *Betula pendula*, *Betula pubescens* and *B. nana*. *Molecular Ecology*. 2004; 13:167–178. DOI: 10.1046/j.1365-294x.2003.02034.x

23. Eriksson G., Jonsson A. A review of the genetics of *Betula*. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1986;1:421–434. DOI:10.1080/02827588609382434
24. Koropachinskiy Yu.I. Natural hybridization and taxonomy of birches in North Asia. *Contemporary problems of Ecology*. 2013;6:350–369.
25. Jarvinen P., Palme A., Morales L.O., Lannenpa M., Keinanen M., Sopanen T., Lascoux M. Phylogenetic relationships of *Betula* species (Betulaceae) based on nuclear ADH and chloroplast mat K sequences. *American Journal of Botany*. 2004;91:1834–1845. DOI:10.3732/ajb.91.11.1834
26. Thorsson Æ.Th., Palsson S., Lascoux M., Anamthawat-Jonsson K. Introgression and phylogeography of *Betula nana* (diploid), *B. pubescens* (tetraploid) and their triploid hybrids in Iceland inferred from cp DNA haplotype variation. *Journal of Biogeography*. 2010;37:2098–2110. DOI:10.1111/j.1365-2699.2010.02353.x
27. Демин В.И. Основные климатические тенденции на Кольском полуострове за период инструментальных метеорологических измерений. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2012;1:99–110.  
[Demin V.A. Main climatic trends on the Kola Peninsula during the period of instrumental meteorological measurements. *Trudy Kolskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2012;1:99–110. (In Russ.)]
28. Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Myazin V.A. Geochemical features of lakes located in an urbanised area of the Russian Arctic (Murmansk region). *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:511–512. DOI: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-511
29. Dineva S.B. Development of the leaf blades of *Acer platanoides* in industrially contaminated environment. *Dendrobiology*. 2006;55:25–32.
30. Скорбач В.В., Жилиякова М.Н. Влияние загрязнения окружающей среды на основные эпидермальные клетки липы сердцевидной, или мелколистной (*Tilia cordata* Mill) на примере г. Белгорода. *Научные ведомости*. 2009;66(11):40–44.  
[Scorbach V.V., Zhilyakova M.N. Environmental contamination influence on main epidermal cells of the small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill) on the example of Belgorod. *Nauchnye Vedomosti*. 2009;11(66):40–44. (In Russ.)]
31. Larcher W. *Physiological Plant Ecology. Eco-physiology and Stress Physiology of Functional Groups*. New York: Springer. 513 p.
32. Hovenden M.I., Vander Schoor J.K. Nature vs nurture in the leaf morphology of Southern Beech, *Nothofagus cunninghamii* (Nothofagaceae). *New Phytologist*. 2003;161:521–590. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00931.x
33. Pyankov V.I., Ivanova L.A., Lambers H. Quantitative anatomy of photosynthetic tissues of plant species of different functional types of boreal vegetation. *Inherent Variations in Plant Growth: Physiological Mechanisms and Ecological Consequences*. Leiden: Backhuys Publishers; 1998:71–87.
34. Иванова Л.А., Пьянков В.И. Влияние экологических факторов на структурные показатели мезофилла листа. *Ботанический журнал*. 2002;87:17–28.  
[Ivanova L.A., Pyankov V.I. Influence of environmental factors on the structural parameters of the leaf mesophyll. *Botanicheskii Zhurnal*. 2002;87:17–28. (In Russ.)]
35. Иванова Л.А., Иванов Л.А., Ронжина Д.А., Пьянков В.И. Структурные параметры мезофилла листа при затенении растений различных функциональных типов. *Физиология растений*. 2008;55(2):230–239.  
[Ivanova L.A., Ivanov L.A., Ronzhina D.A., Pyankov V.I. Structural parameters of leaf mesophyll during shading of plants of various functional types. *Plant Physiology*. 2008;55:230–239. (In Russ.)]
36. Егорова Н.Н., Кулагин А.А. Анатомические и морфологические особенности ассимиляционного аппарата и проводящих тканей древесных растений в экстремальных лесорастительных условиях. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2008;10(2):310–324.  
[Egorova N.N., Kulagin A.A. Anatomical and morphological features of the assimilation apparatus and conductive tissues of woody plants in extreme forest conditions. *Izvestia Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2008;10:310–324. (In Russ.)]
37. Егорова Н.Н., Нафикова А.Т. Изменчивость признаков анатомического строения ассимилирующих органов березы повислой и тополя бальзамического в экстремальных лесорастительных условиях. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(5):165–168.  
[Egorova N.N., Nafikova A.T. Variability of traits of the anatomical structure of the assimilating organs of *Betula pendula* Roth. and *Populus balsamifera* L. in extreme forest vegetation conditions. *Izvestia Samarskogo Nauchnogo Tsentra RAN*. 2011;13:165–168. (In Russ.)]
38. Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Файрузова А.И., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности листьев *Betula pendula* Roth на золототвалах Среднего Урала. *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2016;159(6):68–75.  
[Chukina N.V., Filimonova E.I., Fayruzova A.I., Borisova G.G. Morphological and physiological features of *Betula pendula* Roth growing on the ash dumps of the Middle Urals. *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2016;6:68–75 (In Russ.)]
39. Мокронос А.Т. Онтогенетический аспект фотосинтеза. М.: Колос, 1981. 196 с.  
[Mokronosov A.T. *Ontogenetic Aspect of Photosynthesis*. Moscow: Kolos; 1981. 196 p. (In Russ.)]
40. Гамалей Ю.В. *Транспортная система сосудистых растений*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004. 424 с.  
[Gamaley Yu.V. *Transport System of Vascular Plants*. Saint Petersburg: SPB GU; 2004. 424 p. (In Russ.)]

*Об авторах*

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, e-mail: [n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

СТРУЖКО Валерия Викторовна, магистр биологии, <https://orcid.org/0000-0002-2931-0307>, e-mail: [lera.struzhko@mail.ru](mailto:lera.struzhko@mail.ru)

*Аффилиация*

Мурманский арктический государственный университет, 183038, Мурманск, ул. Капитана Егорова, 15, Российская Федерация.

*About the authors*

VASILEVSKAYA Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biology), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, [n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

STRUZHKO Valeria Viktorovna, Master of Biology, <https://orcid.org/0000-0002-2931-0307>, [lera.struzhko@mail.ru](mailto:lera.struzhko@mail.ru)

*Affiliation*

Murmansk Arctic State University, 15 Kapitana Egorova Str., Murmansk 183038, Russia Federation.

*Поступила в редакцию / Submitted 18.05.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2022*

*Принята к публикации / Accepted 23.06.2022*

УДК 574.5

[https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-434–438](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-434-438)

## Чужеродные виды рыб в бассейне реки Лена

А. Ф. Кириллов

*Якутский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
рыбного хозяйства и океанографии», г. Якутск, Российская Федерация*

✉ [afkirillov@yandex.ru](mailto:afkirillov@yandex.ru)

### Аннотация

Приводятся сведения по составу чужеродных видов рыб в бассейне р. Лена, годы обнаружения и векторы их вселения в водоём. В экосистему Лены в разные годы были интродуцированы девять чужеродных видов рыб: стерлядь, европейская ряпушка, байкальский омуль, лещ, белый амур, амурский сазан, белый толстолобик, обыкновенный судак и ротан-головешка. В целом инвазийные виды рыб в бассейне Лены представлены видами: 1 – преднамеренно интродуцированными (стерлядь, европейская ряпушка, байкальский омуль, лещ, белый амур, амурский сазан, белый толстолобик, обыкновенный судак); 2 – саморасселяющимися (лещ, амурский сазан). В последние годы амурский сазан и лещ стали встречаться в среднем и нижнем участках реки; 3 – случайными интродуцентами (ротан-головешка). Определяющим вектором инвазии является преднамеренная интродукция. Акклиматизация леща и сазана прошла успешно. Ротан распространился до устья Олекмы (ноябрь 2021 г.), преодолев за 10 лет от места первого обнаружения 1350 км. Мигрантная активность составила 135 км/год. Возможность успешной натурализации ротана – высокоинвазийного вида, не вызывает сомнений. Происходящее в настоящее время распространение леща, амурского сазана, ротана-головешки, а также щуки, язя, плотвы и окуня вниз по течению Лены связано с общим потеплением климата в Арктической зоне, что создает благоприятные условия для расселения рыб. Саморасселение чужеродных видов рыб в бассейне Лены подпадает под определение биологической инвазии и может вызвать осложнение межвидовых пищевых конкурентных отношений, занесение новых патогенных для рыб организмов и перестройку паразитарных сообществ. Процесс формирования ихтиофауны бассейна реки Лены продолжается.

**Ключевые слова:** река Лена, инвазия, чужеродный вид, интродуценты, рыбы

**Для цитирования:** Кириллов А.Ф. Чужеродные виды рыб в бассейне реки Лена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):434–438. [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-434–438](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-434-438)

## Non-native freshwater fish species in the Lena River basin

A. F. Kirillov

*Yakutsk Branch of the Federal State Budget Scientific Institution  
«Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography», Yakutsk, Russian Federation*

✉ [afkirillov@yandex.ru](mailto:afkirillov@yandex.ru)

### Abstract

The article provides the data on composition of the non-native fresh water species in the basin of the Lena River. We indicate the years they have been discovered and describe the vectors of their invasion into the water reservoir. In different years, 9 non-native freshwater species have been introduced into the Lena River ecosystem: sterlet, European cisco, Arctic cisco, bream, Chinese carp, Amur carp, silver carp, European pike-perch and Amur sleeper. In general, the invasion of fish species in the Lena River basin is characterized by the following vectors: 1 – deliberately introduced (sterlet, European cisco, Arctic cisco, bream, Chinese carp, Amur carp, silver carp, European pike-perch); 2 – selfdispersing (bream, Amur carp). In recent years, Amur carp and bream have been encountered in the river's middle and lower reaches; 3 – accidentally introduced (Amur sleeper). We identify deliberate introduction as the key invasion vector in the basin of the Lena River. Bream and carp have acclimatized successfully. Moreover, Amur sleeper has spread to the estuary of the Olyokma River (November 2021), having passed 1350 km in 10 years. Its migrant capacity made 135 km/year. Thus, being a highly invasive species, Amur sleeper can naturalize successfully. Current downstream dispersal of bream, Amur carp, Amur sleeper, as well as pike, ide, roach and perch is associated with general

climate warming in the Arctic area, which creates favorable conditions for the fish dispersal. Self-dispersal of nonnative species in the Lena River basin meets the definition of biological invasion and may create complications in interspecies competitive food relationships, bring new pathogenic organisms and rearrange parasitic communities. We conclude that the formation of the Lena River basin ichthyofauna is in progress.

**Keywords:** Lena River, invasion, non-native species, introduced species, freshwater fish

**For citation:** Kirillov A.F. Non-native freshwater fish species in the Lena River basin. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):434–438. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-434-438>

## Введение

Естественная ихтиофауна бассейна Лены состояла из 43 видов рыб [1], большинство из которых (26 видов, или 60,5 %) – промысловые. Начиная с 1954 г. в бассейн реки были интродуцированы 9 видов рыб, ранее в гидросистеме Лены отсутствующие [2–15]: стерлядь *Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758, европейская ряпушка (рипус) *Coregonus albula* (Linnaeus, 1758), байкальский омуль *Coregonus migratorius* (Georgi, 1775), лещ *Abramis brama* (Linnaeus, 1758), белый амур *Stenopharyngodon idella* (Valenciennes, 1844), амурский сазан *Cyprinus carpio rubrofasciatus* La Cèpède, 1803, белый толстолобик *Hypophthalmichthys molitrix* (Valenciennes, 1844), обыкновенный судак *Stizostedion lucioperca* (Linnaeus, 1758) и ротан-головешка *Percottus glenii* Dubowski, 1877. Акклиматизационные работы проводились в Еравнинской системе озер, расположенных в бассейне правого притока р. Лена – р. Витим, в Вилюйском водохранилище (бассейн р. Вилюй) и в водохранилище (водоем-охладитель) Нерюнгринской ГРЭС (бассейн р. Алдан).

Целью данной работы является исследование современного состава чужеродных видов рыб в бассейне реки Лены.

## Материалы и методы исследования

В статье на основании литературных данных и собственных материалов рассматриваются история проникновения и современная картина распространения чужеродных видов рыб в бассейне Лены. Номенклатура таксонов приводятся с учетом последних сводок [16–18]. Виды к фаунистическим комплексам отнесены согласно схеме, предложенной Никольским [19].

## Результаты и обсуждение

В настоящее время известно о девяти чужеродных видах рыб в бассейне Лены.

**Стерлядь.** В 1960, 1962, 1963 гг. была интродуцирована личинками в озеро Б. Еравное в количестве 6346 тыс. экз. Все личинки погибли и интродукция успехов не принесла.

**Европейская ряпушка.** В 1954–1963 гг. 7 млн личинок были интродуцированы в Еравно-Харгинские озера. В 1970-х годах встречалась в приловах в оз. Большое Еравное. Предпринятые попытки интродукции ряпушки не дали результата, в настоящее время сведения об обитании данного вида отсутствуют.

**Байкальский омуль.** Интродуцирован личинками в оз. Гунда (Еравнинской системы озер) в 1951 г. в количестве 700 тыс. экз.; в оз. Б. Еравное – в 1960 г. в количестве 1,0 млн экз.; в Вилюйское водохранилище – в 1999 г. в количестве 20 млн экз. и 10,7 млн лич. в ряд озер бассейна среднего течения Лены. Опыт оказался неудачным, отмечались только единичные случаи поимки в первые годы зарыбления.

**Лещ.** На протяжении 12 лет (1955, 1962–1965, 1968, 1969 гг.) в оз. Б. Еравное было выпущено 19096 экз. разновозрастных лещей. Из Еравно-Харгинских озер лещ путем естественного расселения по р. Холой (правый приток р. Витим) заселил р. Витим до его нижнего течения и связанные с рекой озера. В настоящее время лещ начал расселяться в русловой части среднего течения р. Лена. Интенсивность его расселения достаточно высока, и в июле–августе 2007 г. несколько лещей были пойманы в реке у г. Олекминск и в 30 км выше г. Якутск.

**Белый амур.** 17 производителей этого вида в 1954 г. были вселены в оз. Б. Еравное. В последующие годы данных о поимке белого амура нет.

**Амурский сазан.** В конце 1990-х гг. сазан был успешно интродуцирован в систему Еравно-Харгинских озер.

В 1984, 1986 и в 1989 гг. амурского сазана личинками завезли для выращивания в садках в водохранилище (водоем-охладитель) Нерюнгринской ГРЭС, расположенное на р. Олонгоро в бассейне Алдана. В 1992 г. от 11 половозрелых самок получено 37 тыс. личинок и выращено 10 тыс. сеголетков сазана. В 1994 г. садковое хозяйство было ликвидировано, а остатки посадочного материала выпущены в водоем-охладитель, где сазан начал размножаться в естественных условиях

и достиг высокой численности. Во время плановых попусков воды из водохранилища ГРЭС в 1997 г. сазаны вышли из водоема-охладителя и скатились в р. Алдан. За 8 лет сазан распространился в среднем течении Лены на 400 км выше устья Алдана и ниже его устья до устья Вилюя, по которому поднялся более чем на 300 км. Судя по темпу роста и упитанности, амурские сазаны не испытывают недостатка в корме.

**Белый толстолобик.** Вселение этого растительноядного вида оказалось неэффективным, в уловах не встречается.

**Обыкновенный судак.** Интродукция данного пелагического хищника была признана нежелательной при его совместном выращивании с сиговыми видами рыб и прекращена.

**Ротан-головешка.** Впервые обнаружен в безымянном озере системы р. Куанда (бассейн Витима) в 2011 г. Предполагаемая причина появления – занос человеком, относится к группе случайных интродуцентов.

В целом инвазийные виды рыб, по классификации Н.Л. Болотовой с соавторами [20], в бассейне Лены представлены видами:

– преднамеренно интродуцированными (стерлядь, европейская ряпушка, байкальский омуль, лещ, белый амур, амурский сазан, белый толстолобик, обыкновенный судак);

– саморасселяющимися (лещ, амурский сазан). В последние годы амурский сазан и лещ стали встречаться в среднем и нижнем участках реки. К этой категории относятся и виды естественной ихтиофауны Лены: щука, язь, плотва и окунь, расселившиеся до дельты;

– случайные интродуценты (ротан-головешка).

Акклиматизация леща и сазана прошла успешно. Лещ достиг высокой численности и стал в местах выпуска одним из основных промысловых видов – уловы достигали 200 т.

Уловы акклиматизированного сазана, до вспышки аэромоноза в 2002 г., когда практически весь сазан погиб, достигали 10 т ежегодно. В настоящее время вселение сазана возобновилось.

Ротан распространился до устья Олекмы (ноябрь 2021 г.), преодолев за 10 лет от места первого обнаружения 1350 км. Мигрантная активность составила 135 км/год. Возможность успешной натурализации ротана – высокоинвазийного вида, не вызывает сомнений.

Происходящее в настоящее время распространение леща (бореально-равнинный фаунистический комплекс), амурского сазана, ротана-голо-

вешки (сино-индийский фаунистический комплекс), а также щуки *Esox lucius*, язя *Leuciscus idus*, плотвы *Rutilus rutilus* и окуня *Perca fluviatilis* вниз по течению Лены связано с общим потеплением климата в Арктической зоне, что создает благоприятные условия для расселения рыб. Чрезвычайную опасность для ихтиофауны р. Лена представляет ротан, способный выжить в неблагоприятных условиях – пересыхающих летом и промерзающих зимой водоемах, питающийся любой доступной пищей. А раннее созревание, охрана самцом кладки и личинок способствуют стремительному увеличению численности и широкому освоению ротаном как речных, так и озерных водоемов.

Саморасселение чужеродных видов рыб в бассейне Лены подпадает под определение биологической инвазии [21] и может вызвать осложнение межвидовых пищевых конкурентных отношений, занесение новых патогенных для рыб организмов [22] и перестройку паразитарных сообществ [23]. Вместе с этим, расширение ареала лимнофильных амурского сазана и леща, носящее пассивный характер, может сопровождаться потерями их генетического разнообразия в результате пошагового расселения [24]. Сходство стратегий жизненного цикла плотвы и леща увеличивает вероятность сосуществования этих видов [25], и в этом отношении у леща есть несомненные преимущества по сравнению с амурским сазаном для расширения своего ареала.

### Выводы

В экосистему р. Лена в разные годы были интродуцированы девять чужеродных видов рыб: стерлядь, европейская ряпушка, байкальский омуль, лещ, белый амур, амурский сазан, белый толстолобик, обыкновенный судак и ротан-головешка. Успешно акклиматизировались лещ, сазан и ротан. Определяющим вектором инвазии является преднамеренная интродукция. Саморасселение чужеродных видов рыб подпадает под определение биологической инвазии и может вызвать осложнение межвидовых пищевых конкурентных отношений, занесение новых патогенных для рыб и человека организмов и перестройку паразитарных сообществ. Инвазийные процессы связаны с общим потеплением климата в Арктической зоне, что создает благоприятные условия для расселения рыб. Процесс формирования ихтиофауны бассейна р. Лена продолжается.

### Список литературы / References

1. Кириллов А.Ф., Книжин И.Б. Современный состав и история формирования ихтиофауны реки Лена (бассейн моря Лаптевых). *Вопросы ихтиологии*. 2014;54(4):413–425.  
[Kirillov A.F., Knizhin I.B. Sovremennyi sostav i istoriya formirovaniya ihtiofauny reki Lena (bassejn morya Laptevuyh). *Voprosy ihtologii*. 2014;54(4):413–425. (In Russ.)]
2. Борисов П.Г. Рыбы реки Лены. Труды Комиссии по изучению Якутской республики. Л.: Изд-во АН СССР;1928:181.  
[Borisov P.G. *Ryby reki Leny. Trudy Komissii po izucheniyu Yakutskoy respubliki*; 1928:181. (In Russ.)]
3. Асхаев М.Г. Итоги акклиматизации промысловых рыб в водоемах юга Вост. Сибири. *Вопросы рыбного хозяйства Восточной Сибири*. 1969:80–87.  
[Askhaev M.G. Itogi akklimatizatsii promyslovykh ryb v vodoemah yuga Vost. Sibiri. *Voprosy rybnogo hozyajstva Vostochnoy Sibiri*. 1969:80–87. (In Russ.)]
4. Кириллов Ф.Н. Рыбы Якутии. М.: Наука; 1972:360.  
[Kirillov F.N. *Ryby Yakutii*. М.: Nauka; 1972:360. (In Russ.)]
5. Карасев Г.Л. Реконструкция фауны рыб в водоемах Забайкалья. *Вопросы ихтиологии*. 1974;14(2):191–210.  
[Karasev G.L. Rekonstruktsiya fauny ryb v vodoemah Zabaikal'ya. *Voprosy ihtologii*. 1974;14(2):191–210. (In Russ.)]
6. Карасев Г.Л., Демин А.И., Егоров А.Г. Рыбы Еравно-Харгинских озер. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та; 1983. 236 с.  
[Karasev G.L., Demin A.I., Egorov A.G. *Ryby Eravno-Harginских озер*. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta; 1983:236. (In Russ.)]
7. Карасев Г.Л. Рыбы Забайкалья. Новосибирск: Наука;1987. 295 с.  
[Karasev G.L. *Ryby Zabajkal'ya*. Novosibirsk: Nauka;1987:295. (In Russ.)]
8. Егоров А.Г. Рыбы водоемов юга Восточной Сибири (карпообразные, трескообразные, окунеобразные). Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та; 1988:328.  
[Egorov A.G. *Ryby vodoemov yuga Vostochnoy Sibiri (karpoobraznye, treskoobraznye, okuneobraznye)*. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta; 1988:328 (In Russ.)]
9. Иванова В.Е. Отработать биотехнологию разведения сазана на теплых водах Нерюнгринской ГРЭС. *Отчет ВостСибрыбНИИпроект*. Якутск: 1992. 16 с.  
[Ivanova V.E. Otrabotat' biotekhnologiyu razvedeniya sazana na teplykh vodah Neryungrinskoy GRES. *Otchet VostSibrybNIIProekt*: Yakutsk:1992:16. (In Russ.)]
10. Мамонтов А.М. Акклиматизация рыб в Байкале. *Труды кафедр зоологии позвоночных*. 2001;1:224–239.  
[Mamontov A.M. Akklimatizatsiya ryb v Bajkale. *Trudy kafedry zoologii pozvonochnyh*. 2001;1:224–239. (In Russ.)]
11. Матвеев А.Н., Самусенок В.П., Рожкова Н.А. и др. *Биота Витимского заповедника: структура биоты водных экосистем*. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео»; 2006. 256 с.  
[Matveev A.N., Samusenok V.P., Rozhkova N.A. i dr. *Biota Vitimskogo zapovednika: struktura bioty vodnykh ekosistem*. Novosibirsk: Akadem. izd-vo «Geo»; 2006:256. (In Russ.)]
12. Кириллов А.Ф. Промысловые рыбы Якутии. М.: Научный мир; 2002. 194 с.  
[Kirillov A.F. *Promyslovye ryby Yakutii*. М.: Nauchny mir;2002:194. (In Russ.)]
13. Кириллов А.Ф. О поимке амурского сазана *Cyprinus carpio haematopterus Temminck et Schlegel* в реке Лене. *Наука и образование*. 2007;(2):29–31.  
[Kirillov A.F. O poimke amurskogo sazana *Cyprinus carpio haematopterus Temminck et Schlegel* v reke Lene. *Nauka i obrazovanie*. 2007;(2):29–31. (In Russ.)]
14. Андреев Р.С., Матвеев А.Н., Самусенок В.П., Юр'ев А.Л., Юр'ев И.И., Вокин А.И., Родченко О.П. Первая находка ротана-головешки (*Percottus glenii* Dybowski, 1877) в бассейне верхнего течения реки Лены. *Изв. ИркутГУ. Сер. Биология и экология*. 2011; 4(4):143–145.  
[Andreev R. S., Matveev A. N., Samusenok V. P., Yur'ev A. L., Yur'ev I. I., Vokin A.I., Rodchenko O. P. Pervaya nahodka rotana-golovyoshki (*Percottus glenii* Dybowski, 1877) v basseine verhnego techeniya reki Leny. *Izv. IrkutGU. Ser. Biologiya i ekologiya*. 2011; 4(4):143–145. (In Russ.)]
15. Бобкова Е.А., Соколов А.В. Рыбохозяйственное использование Еравно-Харгинской системы озер. *Вестник ВСГУТУ*. 2013(3):168–172.  
[Bobkova E.A., Sokolov A.V. Rybohozyaystvennoe ispol'zovanie eravno-hargin'skoy sistemy ozer. *Vestnik VSGUTU*. 2013(3):168–172. (In Russ.)]
16. *Атлас пресноводных рыб России = Atlas of Russian Freshwater Fishes* : В 2 т. Ю.С. Решетников. М.: Наука; 2002:378.  
[Atlas of Russian Freshwater Fishes. Yu.S. Reshetnikov. М.: Nauka; 2002:378 (In Russ.)]
17. Нельсон Дж.С. Рыбы мировой фауны. М.: Либроком; 2009. 880 с.  
[Nel'son Dzh.S. *Ryby mirovoy fauny*. М.: Librokom; 2009:880. (In Russ.)]
18. Eschmeyer W.N. (ed.). *Catalog of fishes: genera, species, references*. URL: <http://research.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>; (дата обращения: 28 февраля 2022)
19. Никольский Г.В. Основные закономерности формирования и развития речной ихтиофауны. *Очерки по общим вопросам ихтиологии*. Г.У. Линдберг. М.; Л.: Изд-во АН СССР;1953:77–90.  
[Nikol'skij G.V. Osnovnye zakonomernosti formirovaniya i razvitiya rechnoy ihtiofauny. *Ocherki po obshchim voprosam ihtologii*. G.U. Lindberga. М.; Л.: Izd-vo AN SSSR;1953:77–90. (In Russ.)]
20. Болотова Н.Л., Коновалов А.Ф. Перестройки рыбной части сообществ крупных мелководных озер

Вологодской области. *Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: сборник материалов IV (XXVII) Международной конференции. Часть I.* Вологда; 2005:71–75.

[Bolotova N.L., Konovalov A.F. Perestroiki rybnoy chasti soobshchestv krupnyh melkovodnyh ozer Volgodskoy oblasti. *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennih vodoemov Evropejskogo Severa: sbornik materialov IV (XXVII) Mezhdunarodnoj konferencii. Chast' I.* Vologda; 2005:71–75. (In Russ.)]

21. Дгебуадзе Ю.Ю. Национальная стратегия, состояние, тенденции, исследования, управление и приоритеты в отношении инвазий чужеродных видов на территории России. *Инвазии чужеродных видов в голарктике. Материалы российско-американского симпозиума по инвазийным видам.* Борок; 2003:26–34.

[Dgebuadze Yu.Yu. Nacional'naya strategiya, sostoyaniye, tendencii, issledovaniya, upravlenie i priorityty v otnoshenii invazii chuzherodnyh vidov na territorii Rossii. *Invazii chuzherodnyh vidov v golarktike. Materialy rossijsko-amerikanskogo simpoziuma po invazijnym vidam.* Borok; 2003: 26–34. (In Russ.)]

22. Тютин А.В. Новые примеры обмена паразитами между вселившимися и аборигенными видами рыб в экосистеме Верхней Волги (Россия). *Инвазии чужеродных видов в голарктике. Материалы российско-американского симпозиума по инвазийным видам.* Борок; 2003:301–306.

[Dgebuadze Yu.Yu. Nacional'naya strategiya, sostoyaniye, tendencii, issledovaniya, upravlenie i priorityty v otnoshenii invazij chuzherodnyh vidov na territorii Rossii. *Invazii chuzherodnyh vidov v golarktike. Materialy rossijsko-amerikanskogo simpoziuma po invazijnym vidam.* Borok; 2003:301–306. (In Russ.)]

*jsko-amerikanskogo simpoziuma po invazijnym vidam.* Borok; 2003:301–306 (In Russ.)]

23. Русинек О.Т. *Паразиты рыб озера Байкал (фауна, сообщества, зоогеография, история формирования).* М.: Товарищество научных изданий КМК; 2007. 571 с.

[Rusinek O.T. *Parazity ryb ozera Bajkal (fauna, soobshchestva, zoogeografiya, istoriya formirovaniya).* М.: Tovarishchestvo nauchnyh izdaniy KMK; 2007:571. (In Russ.)]

24. Слынько Ю.В., Лапушкина Е.Е. Генетические стратегии ареальной экспансии пелагических видов рыб в речной экосистеме. *Инвазии чужеродных видов в голарктике. Материалы российско-американского симпозиума по инвазийным видам,* Борок; 2003: 281–288.

[Slyn'ko Yu.V., Lapushkina E.E. Geneticheskie strategii areal'noj ekspansii pelagicheskikh vidov ryb v rechnoy ekosisteme. *Invazii chuzherodnyh vidov v golarktike. Materialy rossijsko-amerikanskogo simpoziuma po invazijnym vidam.* Borok; 2003:281–288. (In Russ.)]

25. Фенева И.Ю., Будаев С.В. Моделирование инвазионных процессов в условиях эксплуатационной конкуренции. *Инвазии чужеродных видов в голарктике. Материалы российско-американского симпозиума по инвазийным видам,* Борок; 2003: 35–48

[Feneva I.Yu., Budaev S.V. Modelirovanie invazionnyh processov v usloviyah ekspluatacionnoj konkurencii. *Invazii chuzherodnyh vidov v golarktike. Materialy rossijsko-amerikanskogo simpoziuma po invazijnym vidam,* Borok; 2003:35–48. (In Russ.)]

#### Об авторе

КИРИЛЛОВ Александр Федорович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: afkirillov@yandex.ru

#### Аффилиация

Якутский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», 677018, г. Якутск, ул. Ярославского, 32/3, Российская Федерация.

#### About the author

KIRILLOV, Alexander Fyodorovich, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, e-mail: afkirillov@yandex.ru

#### Affiliation

Yakutsk branch of the Federal State Budget Scientific Institution «Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography», 32/3 Yaroslavskogo st., Yakutsk 677018, Russian Federation.

Поступила в редакцию / Submitted 18.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 17.06.2022

Принята к публикации / Accepted 22.07.2022

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.742

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

### Поверхностная обработка армирующих наполнителей смесью фенилметана и полибутадиена для повышения адгезии с эластомером

А. Е. Марков<sup>\*1</sup>, М. М. Копырин<sup>1</sup>, А. А. Дьяконов<sup>1,2</sup>, А. Г. Туисов<sup>1</sup>,  
А. А. Охлопкова<sup>2</sup>, Н. Н. Лазарева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉ \*aital.markov@gmail.com

#### Аннотация

Актуальной задачей в материаловедении при получении композитных эластомеров является применение высоко-модульных волокон, обладающих повышенными технологическими и эксплуатационными свойствами. Наиболее известные армирующие наполнители – базальто-, стекло- и углеволокна, обладающие высокой химической инертностью. Поэтому с введением данных наполнителей в эластомер встает вопрос о повышении их сцепления с резиновой матрицей, что позволит повысить надежность и долговечность материала при эксплуатации. В работе приводится метод повышения адгезии между адгезивом и субстратом за счет поверхностной обработки армирующих тканей резиновой смесью, предварительно растворенной в фенилметане (толуол). Полученные материалы исследовали на упругопрочностные свойства, износостойкость, твердость и величину адгезии. Также было проведено изучение микроструктуры в объеме материала, поверхности трения и места расслоения. По результатам проведенных испытаний на растяжение наблюдается общая тенденция по повышению значений пределов прочности до 1,6 раза и снижению показателей относительного удлинения до 2 раз. Проведенные испытания на износостойкость показали снижение значений на 10–20 % у образцов с поверхностной обработкой ткани растворенной смесью, при этом наблюдается повышение значений твердости. Поверхностная обработка тканей приведенным методом перед вулканизацией позволила повысить значения адгезии от 1,2 до 3 раз.

**Ключевые слова:** эластомер, базальтоволокно, углеволокно, стекловолокно, высокомодульный материал, адгезия, гибридный материал, композитный эластомер

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке МОН РФ по Государственному заданию № FSRG-2020-0017 и № FWRS-2022-0001.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность М.П. Лебедеву и А.К. Кычкину за оказанные поддержку и содействие при выполнении работы.

**Для цитирования:** Марков А.Е., Копырин М.М., Дьяконов А.А., Туисов А.Г., Охлопкова А.А., Лазарева Н.Н. Поверхностная обработка армирующих наполнителей смесью фенилметана и полибутадиена для повышения адгезии с эластомером. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):439–449. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

### Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene to increase adhesion with elastomer

А. Е. Markov<sup>\*1</sup>, М. М. Kopyrin<sup>1</sup>, А. А. Dyakonov<sup>1,2</sup>, А. G. Tuisov<sup>1</sup>,  
А. А. Okhlopko<sup>2</sup>, N. N. Lazareva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Yakut Scientific Centre SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉ \*aital.markov@gmail.com

#### Abstract

The use of high-modulus fibers with improved technological and operational properties in production of the composite elastomers is an urgent task in Materials Science. The widespread reinforcing fillers are basalt, glass and carbon fibers,

which have a high chemical inertness. Therefore, the introduction of these fillers into the elastomer requires an increase of their adhesion to the rubber matrix, which further improves the reliability and durability of the material in operation. This paper presents a method for increasing the adhesion between the adhesive and the substrate due to the surface treatment of reinforcing fabrics with a rubber mixture previously dissolved in phenylmethane (toluene). We investigated the obtained materials for elastic-strength properties, wear resistance, hardness and adhesion. We also studied the microstructure in the volume of the material, the friction surface and the place of delamination. The results of the tensile tests showed a general tendency in increasing of the tensile strength values up to 1.6 times and decreasing of the relative elongation values up to 2 times. The tests for wear resistance showed a decrease in values by 10–20 % for samples with the surface treatment of fabric with a dissolved mixture, along with an increase in their hardness values. Surface treatment of fabrics by proposed method before vulcanization increased adhesion values from 1.2 to 3 times.

**Keywords:** elastomer, basalt fiber, carbon fiber, glass fiber, high modulus material, adhesion, hybrid material, composite elastomer

**Funding.** This study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the State Assignment (project number FSRG-2020-0017 and FWRS-2022-0001).

**Acknowledgements.** The authors are grateful to M.P. Lebedev and A.K. Kychkin for their support and assistance in carrying out this work.

**For citation:** Markov A.E., Kopyrin M.M., Dyakonov A.A., Tuisov A.G., Okhlopko A.A., Lazareva N.N. Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene to increase adhesion with elastomer. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):439–449. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-439-449>

## Введение

За последние годы полимерно-композиционные материалы (ПКМ) нашли широкое применение в различных отраслях: автомобилестроении, судостроении, микроэлектронике, медицине, текстильной промышленности, сельском хозяйстве и т. д. Это связано с их хорошими эксплуатационными, физико-механическими свойствами и низкой стоимостью. Дополнительным преимуществом данной группы материалов является возможность модифицирования полимерной матрицы путем комбинирования наполнителей, создания многослойных изделий, введения модификаторов в объем матрицы и т. д. [1, 2].

Одной из важных эксплуатационных характеристик эластомерных материалов, эксплуатирующихся в климатических условиях Арктики и Субарктики, является высокая морозостойкость. Известно, что данной характеристикой обладают эластомеры на основе бутадиеновых, изопреновых, силиконовых, бутадиен-нитрильных каучуков с низким содержанием акрилонитрильных групп и т. д. [3–8].

При создании высокомодульных ПКМ, способных эксплуатироваться в Арктических регионах Севера, на основе морозостойких каучуков возможно применение различных видов армирующих компонентов, которые используются в конструкционных композитах, удовлетворяющих ряду технологических требований [9–11]. К ним относятся требования по прочности, жесткости, плотности, стабильности свойств в ши-

роком температурном интервале, химической стойкости и т. п. Основными современными и доступными армирующими наполнителями для получения ПКМ с повышенными физико-механическими показателями являются ткани на основе базальто-, стекло- и углеволокна [12–17]. Например, предел прочности при растяжении базальтового волокна варьируется от 1,3 до 4,0 ГПа, а модуль упругости от 78 до 90,3 ГПа [18]; у стекловолокон предел прочности варьируется от 1,5 до 5,0 ГПа, а модуль упругости от 50 до 90 ГПа [19]; прочность на растяжение углеволокон доходит до 6–7 ГПа, а модуль упругости – до 600 ГПа [20–23].

Данная группа армирующих материалов обладает повышенной химической стойкостью к растворам кислот и щелочей. Повышенная химическая стойкость к сильным растворам кислот и щелочей базальтовых волокон обусловлена быстрой адсорбцией и частичным растворением базальта, образуется защитная пленка, что приводит к замедлению старения материалов [24, 25]. Воздействие сильных кислот и щелочей на стекловолокно происходит в несколько стадий. Основным механизмом является адсорбция воды и агрессивной среды, параллельно протекают более медленные реакции, которые приводят к растворению оксидных компонентов. Таким образом, защитная пленка не образуется, а сразу превращается в высокопористый кремнезем [26, 27]. Углеродное волокно при нормальных условиях и в отсутствие катализаторов хи-

мически инертно к воздействию кислот и щелочей [28, 29].

Однако, при введении данных наполнителей необходимо учитывать их взаимодействие с полимерной матрицей, а именно процессы сцепления субстрата с адгезивом. Литературный анализ показал, что на данный момент самым распространенным методом повышения адгезии является нанесение или смачивание поверхности волокна различными химическими растворами. Например, в работе Etcheverry и Barbosa [30] использовались различные методы химического травления волокон для улучшения адгезии стекловолокна с полимерной матрицей. В исследовании [31] повысили адгезию между стекловолокном и стирол-бутадиенвинилпиридиновым эластомером путем предварительной пропитки стекловолокна раствором, содержащим  $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилан, глицерин и воду. В работе [32] авторы модифицировали поверхность волокна плазмохимическим процессом.

Целью данной работы является исследование свойств высокомодульных материалов и влияния поверхностной обработки армирующего наполнителя на адгезионное взаимодействие с эластомерной матрицей.

#### Методы и материалы исследования

Объектами исследования являются эластомерные материалы, армированные усиливающей тканью методом послойной укладки. В качестве армирующего слоя использовали ткани из: базальтового волокна (БТ) марки БТ-11 (100) (Фабрика технических тканей, Россия) с поверхностной плотностью  $351 \text{ г/м}^2$  и саржевым переплетением 5/3; стекловолокна (СТ) марки ТР-560-30А (100) (ПолоцкСтекловолокно, Беларусь) с поверхностной плотностью  $560 \text{ г/м}^2$  и саржевым

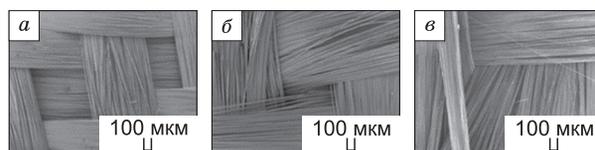


Рис. 1. Микрофотографии тканей: а – БТ; б – СТ; в – УТ.

Fig. 1. Microphotographs of fabrics: a – BF; б – GF; в – CF.

переплетением 2/2; углеволокна (УТ) марки 2/2-1000-12К-400 (Препрег-СКМ, Россия) с плотностью  $407 \text{ г/м}^2$  и саржевым переплетением 2/2. Микрофотографии тканей приведены на рис. 1.

На микрофотографиях видно, что базальтовая ткань имеет более плотное переплетение между пучками волокон относительно стеклоткани и углеткани. Предположительно, это можно объяснить соотношением количества промежуточных переплетений волокон базальтовой ткани – 5 к 3, тогда как у стеклоткани и углеткани – 2 к 2.

В качестве эластомерной матрицы использовали резиновую смесь на основе морозостойкого бутадиенового каучука марки СКД-В (Сибур, Россия) [33]. Смешение ингредиентов производили на лабораторных вальцах открытого типа PL-2200 (Brabender, Германия) в течение 20 мин. Рецепттура и время введения ингредиентов в резиновую смесь приведены в табл. 1.

Для повышения сцепления волокон с эластомерной матрицей на поверхность армирующих наполнителей наносили слой растворенной резиновой смеси на основе СКД-В в фенилметане (толуол, ТУ 2631-020-92804628-2010). Данную растворенную смесь (РС) наносили на армирующую ткань и высушивали в сушильном шкафу в течение 15 минут. Массовое соотношение резиновой смеси СКД-В и растворителя составляло 1:2.

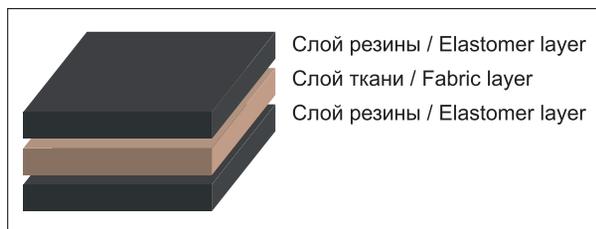
Таблица 1

Рецептура резиновой смеси на основе СКД-В и время введения

Table 1

Recipe and time of introduction of rubber compound ingredients

Ингредиент / Ingredient	Масс.ч. / Mass fraction	Время введения, мин / Introduction time, min
СКД-В / SKD-V	100,0	0
Стеариновая кислота / Stearic acid	2,0	0
ТУ N550 / Technical Carbons N550	50,0	2
Оксид цинка / Zinc oxide	3,0	5
Сульфенамид Ц / Sulfenamide C	0,9	10
Сера / Sulfur	1,5	12



**Рис. 2.** Изображение армированного материала: слой эластомера–слой армирующей ткани–слой эластомера.

**Fig. 2.** Reinforced material: elastomer layer–reinforcing fabric layer–elastomer layer.

Изготовление опытных образцов осуществляли методом послойной укладки: резиновая смесь–армирующий слой ткани–резиновая смесь. Схематическое изображение укладки образцов приведено на рис. 2.

Вулканизацию гибридных эластомерных композитов осуществляли в гидравлическом прессе ПКМВ-100 (Импульс, Россия) при 155 °С в течение 20 мин под давлением 10 МПа.

Определение упругопрочностных свойств армированных эластомеров проводили на испытательной машине Autograph AGS-JSTD (Shimadzu, Япония) по стандарту ISO 37-2020; износостойкость определяли на машине трения МИ-2 (Полимермаш групп, Россия) при использовании абразивной поверхности зернистостью 150 согласно ISO 4649-85; твердость определяли по методу Шор А согласно стандарту ISO 7619-1-2009; определение значений адгезии проводили согласно стандарту ISO 36-2017. Исследование микроструктуры низкотемпературных сколов и поверхности трения образцов проводили на растровом электронном микроскопе JSM-7800F

(JEOL, Япония) при низком ускоряющем напряжении в режиме вторичных электронов.

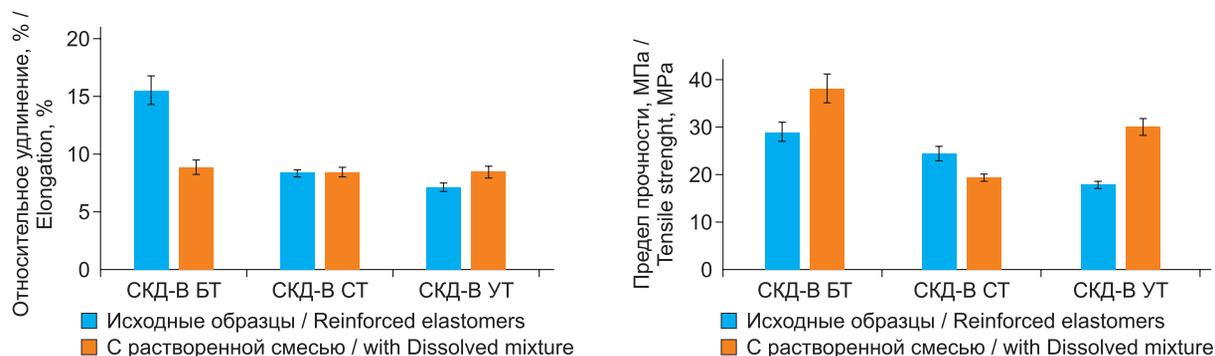
### Результаты исследования

На рис. 3 приведены диаграммы сравнения относительного удлинения и предела прочности эластомеров, армированных слоями БТ, СТ и УТ, и эластомеров, армированных слоями таких же тканей предварительно обработанные раствором резиновой смеси на основе СКД-В.

Из диаграммы относительного удлинения видно, что результаты существенно не изменились, кроме образца с БТ, пропитанного резиновой смесью. Так, относительное удлинение образца СКД-В БТ с растворенной смесью уменьшается в 2 раза и составляет 8,4 % по сравнению с исходным образцом. Пропитка РС армирующих слоев БТ и УТ позволяет увеличить предел прочности образцов: у БТ с 29,0 до 38,1 МПа, у УТ с 18,0 до 30,1 МПа. Это позволяет сделать вывод об увеличении взаимодействия между БТ, УТ и эластомерной матрицей в ходе совместной вулканизации.

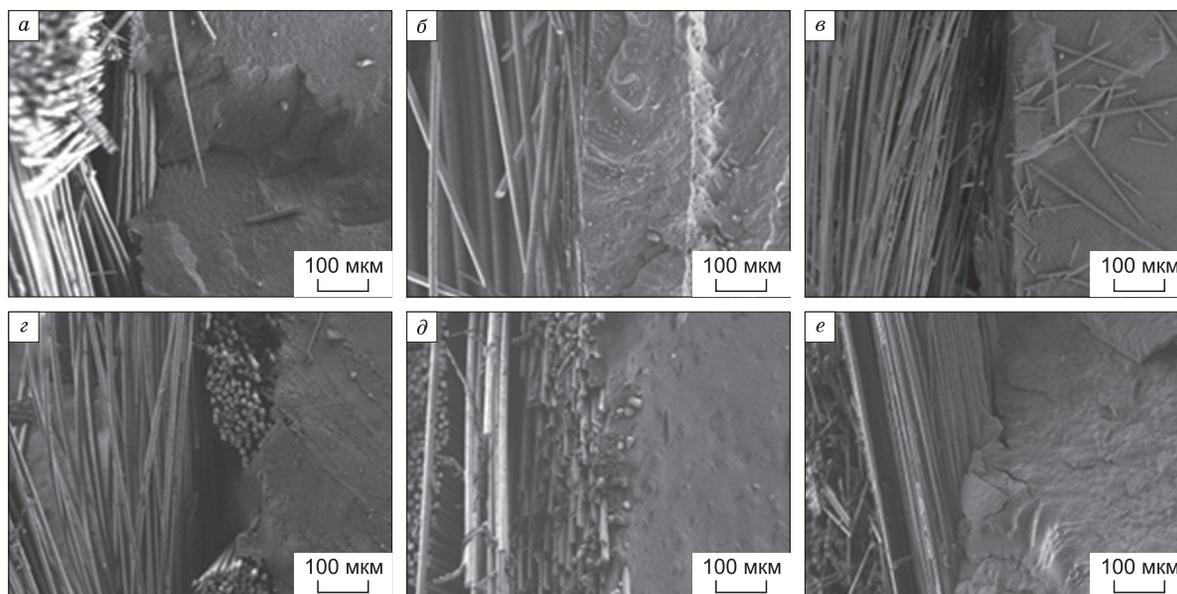
Таким образом, пропитка РС армирующего слоя БТ и УТ и их последующее введение в эластомер повышают прочностные характеристики и сопротивление материалов к деформациям. Снижение показателя прочности у образца СКД-В, армированного СТ, обработанной РС, предположительно, связано с растворением замасливателя волокон в толуоле во время обработки поверхности ткани, что снижает прочностные свойства самих армирующих наполнителей в полученном ПКМ.

На рис. 4 представлены микрофотографии хрупких сколов эластомеров СКД-В и компо-



**Рис. 3.** Диаграммы физико-механических свойств эластомеров на основе каучука СКД-В с БТ, СКД-В с СТ, СКД-В с УТ, СКД-В с БТ/РС, СКД-В с СТ/РС, СКД-В с УТ/РС.

**Fig. 3.** Physical and mechanical properties (left – Elongation; right – Tensile strength) of elastomers based on rubber SKD-V BF, SKD-V GF, SKD-V CF, SKD-V BF with a dissolved mixture (d. m.), SKD-V GF with a d. m., SKD-V CF with a d. m.



**Рис. 4.** Микрофотографии сколов образцов: *a* – СКД-В с БТ; *б* – СКД-В с СТ; *в* – СКД-В с УТ; *г* – СКД-В с БТ/РС; *д* – СКД-В с СТ/РС.; *е* – СКД-В с УТ/РС.

**Fig. 4.** Microphotographs of specimen cleavages: *a)* SKD-V BF; *б)* SKD-V GF; *в)* SKD-V CF; *г)* SKD-V BF with a d. m.; *д)* SKD-V GF with a d. m.; *е)* SKD-V CF with a d. m.

зитных эластомеров с добавлением армирующего слоя.

Из рис. 4 видно, что образцы с армирующими наполнителями, пропитанные РС, плотнее контактируют с эластомерной матрицей. На рис. 4, *д*, *е* волокна более структурированы между собой, тогда как на рис. 4, *б*, *в* волокна разошлись друг от друга. На микрофотографиях образцов с БТ также наблюдается более плотный контакт, заметны места сцепления поверхности волокон с резиновой матрицей (см. рис. 4, *г*).

В табл. 2 приведены результаты исследования твердости по Шор А эластомеров с армирующими слоями.

Из полученных результатов видно некоторое повышение твердости у образцов с БТ и УТ, подвергшихся обработке РС, по сравнению с исходными образцами. Наибольшим показателем твердости обладает образец эластомера с УТ пропитанный РС, его показатели выше на 6,4 % по сравнению с исходным образцом. Предположительно, увеличение твердости образцов, обработанных РС, происходит из-за того, что растворенная резиновая смесь проникает в свободное пространство между волокнами армирующей ткани и вулканизируется с основной эластомерной матрицей, образуя более плотное соединение. Снижение показателя твердости у образцов эластомера, армированных СТ с поверхностной об-

работкой по сравнению с исходным образцом можно связать с растворением, замасливателя в толуоле и, соответственно, снижением жесткости ткани.

На рис. 5 приведена диаграмма износостойкости исходных эластомеров, армированных слоем ткани и с предварительной обработкой РС.

По результатам испытания на износостойкость установлено снижение показателей у армированных образцов, пропитанных РС, по сравнению с исходными образцами. Возможно, это связано с тем, что РС проникает вглубь между армирую-

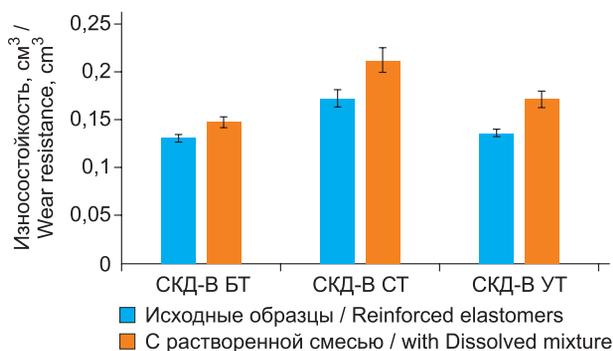
Таблица 2

**Твердость по Шор А эластомеров на основе каучука**

Table 2

**Hardness according to Shore A of elastomers based on rubber**

Образец / Sample	Шор А, усл.ед. / Hardness Shore A
СКД-В+БТ / SKD-V+BF	66,5
СКД-В+СТ / SKD-V+GF	66,5
СКД-В+УТ / SKD-V+CF	66,0
СКД-В+БТ/РС / SKD-V+BF/DC	69,5
СКД-В+СТ/РС / SKD-V+GF/DC	65,0
СКД-В+УТ/РС / SKD-V+CF/DC	70,5



**Рис. 5.** Диаграмма износостойкости эластомеров на основе каучука СКД-В с БТ, СКД-В с СТ, СКД-В с УТ, СКД-В с БТ/РС, СКД-В с СТ/РС, СКД-В с УТ/РС.

**Fig. 5.** The diagram of wear resistance of elastomers based on rubber SKD-V BF, SKD-V GF, SKD-V CF, SKD-V BF with a d. m., SKD-V GF with a d. m., SKD-V CF with a d. m.

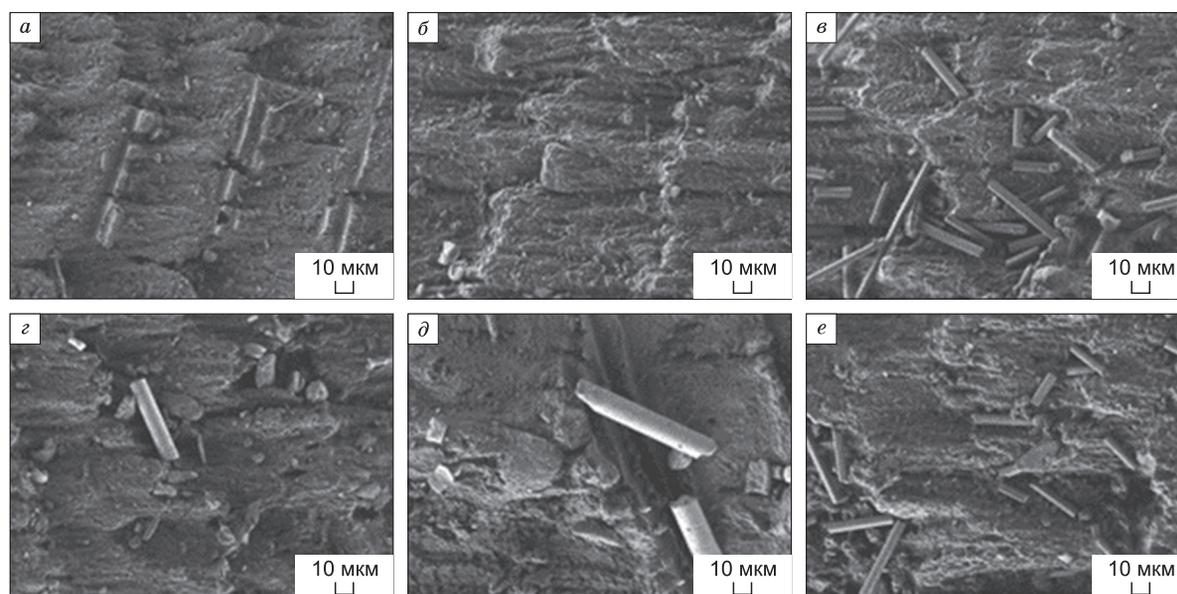
щими тканями и увеличивает площадь контакта эластомерной матрицы с волокнами. Вследствие этого в процессе трения образцов об абразивную поверхность происходит отрыв самих армирующих тканей с частями резины от основной эластомерной матрицы. Результаты испытания показали, что износостойкость снижается на 10–20 %.

На рис. 6 приведены микрофотографии поверхности образцов после испытаний на абразивостойкость.

На рис. 6 видны микрофотографии сравнения исходных образцов (а–в) и образцов, пропитанных РС (г–е). На рис. 6, г–е видно, что поверхность образцов после испытания на абразивостойкость более рыхлая, что подтверждает предположение об отрыве не только армирующих тканей, но и части резины. Кроме того, зафиксированы частицы волокон на рис. 6, в–е.

На рис. 7 приведена диаграмма адгезии композитных эластомеров, с добавлением слоя исходных армирующих тканей и обработанных РС. На рис. 7 видно, что пропитывание армирующих тканей РС повышает адгезию между материалами. Композит, армированный обработанным в резиновой смеси УТ, обладает наибольшей адгезионной прочностью, так, наблюдается увеличение адгезии обработанных материалов по сравнению с исходными образцами с 0,91 до 2,61 Н/мм. При сравнении результатов между двумя образцами, где используется БТ в качестве армированной ткани, наблюдается незначительное повышение значения адгезии. Этот факт можно объяснить тем, что у базальтовой ткани более плотный тип переплетения пучков волокон. По общим результатам расслоения образцов можно прийти к выводу, что пропитка армированной ткани РС повышает адгезию между материалами.

На рис. 8 представлены микрофотографии образцов ПКМ после испытания на расслоение.



**Рис. 6.** Микрофотографии образцов после испытаний на износостойкость: а – СКД-В с БТ; б – СКД-В с СТ; в – СКД-В с УТ; г – СКД-В с БТ/РС.; д – СКД-В с СТ/РС; е – СКД-В с УТ/РС

**Fig. 6.** Microphotographs of samples: а) SKD-V BF; б) SKD-V GF; в) SKD-V CF; г) SKD-V BF with a d. m.; д) SKD-V GF with a d. m.; е) SKD-V CF with a d. m. after wear test

На рис. 8 наблюдаются частицы волокон после испытания на расслоение. Однако, на рис. 8, з–е можно наблюдать мелкие оставшиеся волокна в эластомерной матрице, предположительно, из-за увеличения взаимодействия между материалами при расслоении происходит их разрушение. Из этого следует, что проникновение растворенной резиновой смеси в глубь волокон способствует лучшему взаимодействию армированной ткани к эластомерной матрицей, что приводит к повышению адгезии эластомера с армирующими тканями (см. рис. 7). Данное изменение структуры коррелирует с результатами испытаний на адгезию. Наиболее сильное изменение структуры наблюдается у образца СКД-В с УТ, пропитанной РС.

### Заключение

В работе армирующие наполнители из базальто-, стекло- и углеткани обрабатывали РС. После чего путем послойной укладки и последующей вулканизации были получены высокомолекулярные эластомерные материалы, обладающие повышенной деформационной прочностью и устойчивостью к сдвиговым разрушениям. По результатам физико-механических испытаний армированных эластомеров, обработанных РС, было установлено, что:

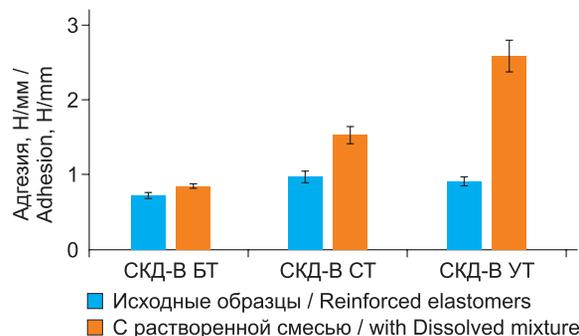


Рис. 7. Диаграмма расслоения эластомеров на основе каучука СКД-В с БТ, СКД-В с СТ, СКД-В с УТ, СКД-В с БТ/РС, СКД-В с СТ/РС, СКД-В с УТ/РС.

Fig. 7. The diagram of adhesion of elastomers based on rubber SKD-V BF, SKD-V GF, SKD-V CF, SKD-V BF with a d. m., SKD-V GF with a d. m., SKD-V CF with a d. m.

- обработка армирующей ткани РС приводит к повышению адгезии между эластомером и УТ в 3 раза;
- упругопрочностные испытания показали незначительное снижение эластичности материалов и повышение прочностных свойств в 1,3–1,7 раза у образцов с БТ и УТ, обработанных РС, а у композитов с СТ наблюдается снижение показателя прочности;
- образование поверхностного слоя из РС на армирующих тканях приводит к ухудшению из-

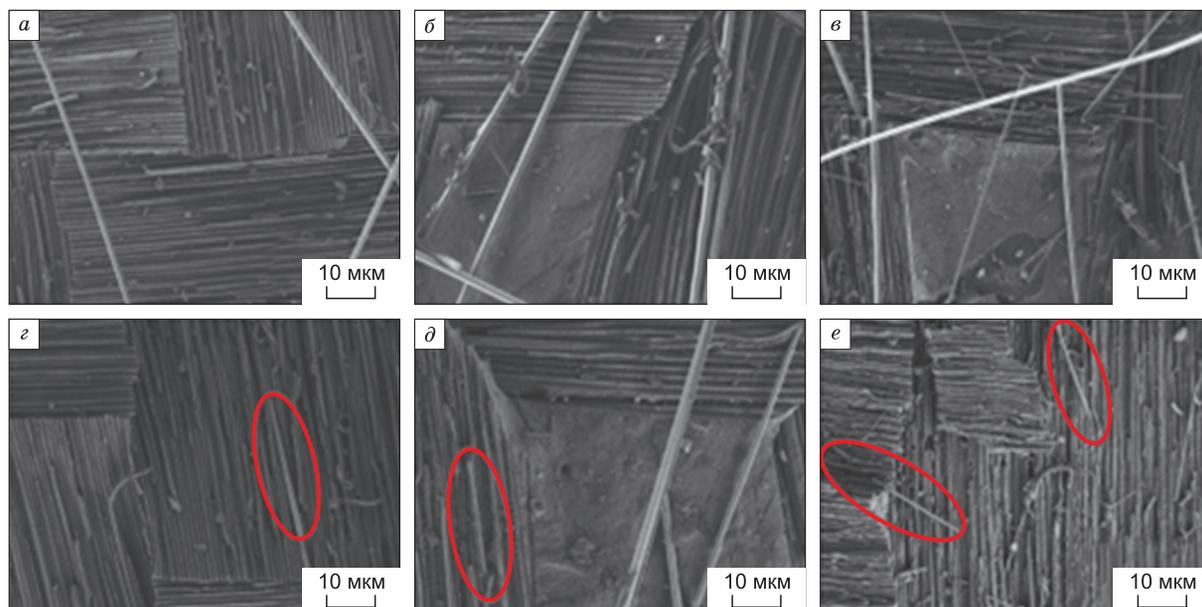


Рис. 8. Микрофотографии образцов после испытаний адгезии со стороны слоя эластомера: а – СКД-В с БТ; б – СКД-В с СТ; в – СКД-В с УТ; г – СКД-В с БТ/РС; д – СКД-В с СТ/РС; е – СКД-В с УТ/РС.

Fig. 8. Microphotographs of samples after adhesion tests from the elastomer layer: а) SKD-V BF; б) SKD-V GF; в) SKD-V CF; г) SKD-V BF with a d. m.; д) SKD-V GF with a d. m.; е) SKD-V CF with a d. m.

носостойкости за счет отрыва волокон с частями резины с основной эластомерной матрицы;

– микроструктурные исследования армированных эластомерных материалов показали, что армирующие ткани плотнее контактируют с поверхностью эластомера после обработки РС.

Таким образом, обработка поверхности армирующих наполнителей смесью фенолметана и полибутадиена оказывает влияние на упруго-прочностные характеристики, твердость, износостойкость и повышает адгезионное взаимодействие между субстратом и адгезивом.

### Литература / References

1. Сокольская М.К., Колосова А.С., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов А.С. Связующие для получения современных полимерных композиционных материалов. *Фундаментальные исследования*. 2017;10(2):290–295.

[Sokolskaya M.K., Kolosova A.S., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov A.S. Binders to obtain the modern polymer composite materials. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2017;10(2):290–295. (In Russ.)]

2. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов. *Фундаментальные исследования*. 2017;10(3):459–465.

[Kolosova A.S., Sokolskaya M.K., Vitkalova I.A., Torlova A.S., Pikalov A.S. Fillers to modify the modern polymer composite materials. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2017;10(3):459–465. (In Russ.)]

3. ИТС 32-2017. «Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых».

[ITS 32-2017. Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Proizvodstvo polimerov, v tom chisle biorazlagaemykh. (In Russ.)]

4. Корнев А.Е., Бобров А.П., Кузин В.С., Звезденков К.А. Использование неодимовых каучуков в резинах протекторов и боковин шин. *Каучук и резина*. 2004;6:7–10.

[Kornev A.Y., Bobrov A.P., Kuzin V.S., Zvezdenkov K.A. The use of neodymium rubbers in tire treads and sidewalls. *Kauchuk i rezina*. 2004;6:7–10. (In Russ.)]

5. Алексеев А.Г. и др. *Большой справочник резинщика. Ч. 1. Резины и резинотехнические изделия*. Под ред. С.В. Резниченко, Ю.Л. Морозова. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012; 735 с.

[Alekseev A.G. et al. *The big guide of the rubber worker. Part 1. Rubbers and rubber products*. Pod red. S.V. Reznichenko, Yu.L. Morozova. M.: ООО «Izdatelskiy tsentr «Tekhinform» MAI», 2012; 735 p. (In Russ.)]

6. Литвинов М.Ю. Анализ микроструктуры цис-бутадиеновых каучуков с помощью спектроскопии ЯМР. *Вестник современных исследований*. 2018; 9.1(24):2472–50.

[Litvinov M.Y. Analysis of the microstructure of cis-butadiene rubbers using NMR spectroscopy. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2018; 9.1(24):247–250. (In Russ.)]

7. Ильин В.М., Резова А.К. Бутадиеновый каучук: мощности и фирменная структура производства в мире. *Каучук и резина*. 2015;5:46–51.

[Ilin V.M., Rezova A.K. Butadiene rubber: capacities and corporate structure of production in the world. *Kauchuk i rezina*. 2015;5:46–51. (In Russ.)]

8. Яковлев В.А., Гавриленко И.Ф., Бондаренко Г.Н., Чаусова О.В. Полимеризация бутадиена под влиянием неодимовых катализаторов, нанесенных на оксидные носители. *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2006;48 (8):1519–1522.

[Yakovlev V.A., Gavrilenko I.F., Bondarenko G.N., Chausova O.V. Polymerization of butadiene initiated by neodymium catalysts applied on oxide supports. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya B*. 2006;48(8):1519–1522. (In Russ.)]

9. Панкратьева У.В., Кудяков К.Л. Опыт применения стекловолокна и стеклокомпозитов для армирования бетонных конструкций. Томск: *Избранные доклады 65-й Юбилейной университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Сборник докладов*; 2019:90–92.

[Pankratyeva U.V., Kudyakov K.L. Experience in the use of fiberglass and glass composites for reinforcing concrete structures. Tomsk: *Izbrannyye doklady 65-yu Yubileynoy universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh. Sbornik докладov*; 2019:90–92. (In Russ.)]

10. Коренец А.М., Братошевская В.В. Использование углеволокна в современном строительстве. *Научное обеспечение агропромышленного комплекса. Сборник статей по материалам 76-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2020 год*. Краснодар; 2021:99–100.

[Korenets A.M., Bratoshevskaya V.V. Use of carbon fiber in modern construction. Krasnodar: *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa. Sbornik statey po materialam 76-y nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov po itogam NIR za 2020 god*. Krasnodar; 2021: 99–100. (In Russ.)]

11. Сопин Д.М., Богусевич Г.Г., Богусевич В.А., Чэнь В. Армирование бетона дисперсным базальтовым волокном. *Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции*. Белгород; 2020:385–389.

[Sopin D.M., Bogusevich G.G., Bogusevich V.A., Chen V. Reinforcement of concrete with dispersed basalt fiber. *Nauka i innovatsii v stroitelstve: Sbornik докладov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Belgorod; 2020:385–389. (In Russ.)]

12. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. *Композиционные материалы: Справочник*. М.: Машиностроение. 1990; 512 с.  
[Vasilyev V.V., Protasov V.D., Bolotin V.V. *Composite materials: Reference*. M.: Mashinostroenie. 1990; 512 p. (In Russ.)]
13. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высоко-температурные волокна для металлических и керамических композиционных материалов. *Труды ВИАМ*. 2013;(2).  
[Kablov Ye.N., Shchetanov B.V., Ivakhnenko Yu.A., Balinova Yu.A. Perspective reinforcing high-temperature fibres for metal and ceramic composite materials. «*Trudy VIAM*» («*Proceedings of VIAM*»). 2013;(2). (In Russ.)]
14. Курносое А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения. *Труды ВИАМ*. 2015;(8):55–59.  
[Kurnosov A.O., Melnikov D.A., Sokolov I.I. Fiberglass for structural purposes for the aircraft industry. *Trudy VIAM* («*Proceedings of VIAM*»). 2015;(8):55–59. (In Russ.)]
15. Озкан С.Ж., Карпачева Г.П., Дзидзигури Э.Л., Чернавский П.А., Бондаренко Г.Н. Полимер-металл-углеродные наноматериалы на основе поли-3-амино-7-метиламино-2-метилфеназина и наночастиц магнетита, закрепленных на одностенных углеродных нанотрубках. *V Международная конференция-школа по химической технологии: сборник тезисов докладов сателлитной конференции «XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. Волгоград; 2016: 70–73.  
[Ozkan S.Zh., Karpacheva G.P., Dzidziguri E.L., Chernavskiy P.A., Bondarenko G.N. Polymer-metal-carbon nanomaterials based on poly-3-amino-7-methylamino-2-methylphenazine and magnetite nanoparticles fixed on single-walled carbon nanotubes. *V Mezhdunarodnaya konferentsiya-shkola po khimicheskoy tekhnologii: sbornik tezisov dokladov satelлитной konferentsii «XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. Volgograd; 2016:70–73. (In Russ.)]
16. Дьяконов А.А., Аммосов С.С., Тарасова П.Н., Охлопкова А.А., Слепцова С.А., Петрова Н.Н., Кычкин А.К., Кычкин А.А., Туйсов А.Г. Исследование композиционных полимерных материалов армированных базальтовой тканью. *Ползуновский вестник*. 2021;(2):175–181. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.024.  
[Dyakonov A.A., Ammosov S.S., Tarasova P.N., Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Petrova N.N., Kichkin A.K., Kichkin A.A., Tuisov A.G. Research of composite polymer materials reinforced with basalt fabric. *Polzunovskiy vestnik*. 2021;(2):175–181. (In Russ.)] DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.024.
17. Молчанов Б.И., Гудимов М.М. Свойства углепластиков и области их применения. *Авиационная промышленность*. 1997;(3–4):58–60.  
[Molchanov B.I., Gudimov M.M. Properties of carbon fiber plastics and their applications. *Aviation History*. 1997;(3-4):58–60. (In Russ.)]
18. Тростянская Е.Б. *Армированные пластики. Справочное пособие*. Под ред. Г.С. Головкина, В.И. Семенова. М.: МАИ; 1997; 268 с.  
[Trostyanskaya Y.B. *Reinforced plastics. Reference manual*. Pod red. G.S. Golovkina, V. I. Semenova. Moscow: MAI; 1997; 268 p. (In Russ.)]
19. Ибатуллина А.Р. Обзор производителей и сравнение свойств сверхпрочных высокомодульных волокон. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014;17(19):136–139.  
[Ibatullina A.R. Overview of manufacturers and comparison of properties of heavy-duty high-modulus fibers. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014; 17(19):136–139. (In Russ.)]
20. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносое А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind. И Toho Tenax. *Авиационные материалы и технологии*. 2018;3(52):18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.  
[Gunyaeva A.G., Sidorina A.I., Kurnosov A.O., Klimenko O.N. Polymeric composite materials of new generation on the basis of binder vse-1212 and the filling agents alternative to ones of Porcher Ind. And Toho Tenax. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*. 2018;3(52):18–26. (In Russ.)] DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26.
21. Симамура С., Синдо А., Коцука К. *Углеродные волокна*. Пер. с яп. Ю. М. Товмасына. Под ред. Э.С. Зеленского. М.: Мир; 1987; 304.  
[Simamura S., Sindo A., Kotsuka K. *Carbon fibers*. Per. s yap. Yu. M. Tovmasyana. Pod red. E. S. Zelenskogo. Moscow: Mir; 1987; 304. (In Russ.)]
22. Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*. 2009; 2(4): 2369–2403. DOI:10.3390/ma2042369.
23. Newcomb B.A. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;91:262–282.
24. Dalinkevich A.A., Gumargalieva K.Z., Sukhanov A.V., Aseev A.V. *COBRAE Conference «Bridge engineering with Polymer Composites»*. Dubendorf: EMPA; 2005.
25. Калинин В.А., Макаров М.С. *Намотанные стеклопластики*. М.: Химия; 1986; 268.  
[Kalinchev V.A., Makarov M.S. *Wound fiberglass*. Moscow: Khimiya; 1986; 268. (In Russ.)]
26. Асланова М.С., Колесов Ю.И., Хазанов В.Е. *Стекланные волокна*. М.: Химия; 1979; 597 с.  
[Aslanova M.S., Kolesov Y.I., Khazanov V.Y. *Glass Fibers*. Moscow: Khimiya; 1979; 597 p. (In Russ.)]
27. Пашенко А.А., Сербин В.П., Паславская А.П., Глуховский В.В., Бирюкович Ю.Л., Солодовник А.Б. *Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами*. М.: Стройиздат; 1988; 200 с.

[Pashchenko A.A., Serbin V.P., Paslavskaya A.P., Glukhovskiy V.V., Biryukovich Yu.L., Solodovnik A.B. *Reinforcement of inorganic binders with mineral fibers*. М.: Stroyizdat; 1988; 200 p. (In Russ.)]

28. Бабаевский П.Г. *Пластики конструкционного назначения (реактопласты)*. Под ред. Е. Б. Тростянской. Москва: Химия. 1974; 303 с.

[Babayevskiy P.G. *Structural plastics (reactoplasts)*. Pod red. Y. B. Trostyanskoj. Moscow: Khimiya, 1974; 303 p. (In Russ.)]

29. Мелешко А.И., Половников С.П. *Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты*. М.: САЙНС-ПРЕСС; 2007; 92 с.

[Meleshko A.I., Polovnikov S.P. *Carbon, Carbon fibers, carbon composites*. М.: SAYNS-PRESS; 2007; 92 p. (In Russ.)]

30. Etcheverry M., Barbosa S.E. Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement. *Materials*. 2012;5(12): 1084–1113. DOI:10.3390/ma5061084.

31. Авторское свидетельство № 326775 СССР, МПК С08Л 9/04, С08К 5/04, С08К 5/20. Способ повышения адгезии стекловолокна к резинам:

№ 1345942/23-5 : заявл. 07.07.1969 : опубл. 19.01.1972 / М. Кунио, Н. Сабура, О. Сатору [и др.].

[Avtorskoe svidetelstvo № 326775 SSSR, МПК С08Л 9/04, С08К 5/04, С08К 5/20. Sposob povysheniya adgezii steklovolokna k rezinam: № 1345942/23-5: zayavl. 07.07.1969 : opubl. 19.01.1972 / М. Kunio, N. Sabure, O. Satoru [et al.]. (In Russ.)]

32. Cech V., Knob A., Hosein H.A., Babik A., Lepcio P., Ondreas F., Drzal L.T. Enhanced interfacial adhesion of glass fibers by tetravinylsilane plasma modification. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;58:84–89. DOI:10.1016/j.compositesa.2013.12.003.

33. Мухин В.В., Петрова Н.Н., Капитонов Е.А., Афанасьев А.В. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков. *Вестник СВФУ*. 2016;6(56):41–50.

[Mukhin V.V., Petrova N.N., Kapitonov E.A., Afanasyev A.V. Development of aircraft synthetic oil resistant rubbers based on mixture of nitrile and diene rubbers. *Vestnik SVFU*. 2016;6(56):41–50. (In Russ.)]

#### Об авторах

<sup>1</sup>МАРКОВ Айтал Еремеевич, инженер-исследователь, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, Researcher ID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

<sup>1</sup>КОПЫРИН Михаил Михайлович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>, Researcher ID: AAI-8876-2021, e-mail: mkopyrin91@gmail.com

<sup>1,2</sup>ДЬЯКОНОВ Афанасий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, Researcher ID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

<sup>1</sup>ТУИСОВ Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, Researcher ID: ABA-4930-2020, tuisovag@gmail.com

<sup>2</sup>ОХЛОПКОВА Айтилина Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, Researcher ID: A-6594-2014, okhlopkova@yandex.ru

<sup>2</sup>ЛАЗАРЕВА Надежда Николаевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лаб., <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, Researcher ID: E-5063-2014, lazareva-nadia92@mail.ru

#### Аффилиация

<sup>1</sup>Якутский научный центр СО РАН, Лаборатория композиционных материалов Арктики Субарктики, 677000, г. Якутск, ул. Петровского, 2, Российская Федерация

<sup>2</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Институт естественных наук, 677000, г. Якутск, ул. Белинского 58, Российская Федерация

#### About the authors

<sup>1</sup>MARKOV, Aital Eremeevich, Research Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>, Researcher ID: ACF-8819-2022, e-mail: aital.markov@gmail.com

<sup>1</sup>KOPYRIN, Mikhail Mikhailovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>, Researcher ID: AAI-8876-2021, e-mail: mkopyrin91@gmail.com

<sup>1,2</sup>DYAKONOV, Afanasy Alekseevich, Cand. Sci. (Engineering), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6959-368X>, Researcher ID: E-5710-2014, e-mail: afonya71185@mail.ru

*A. E. Markov et al. ♦ Surface treatment of reinforcing fillers with a mixture of phenylmethane and polybutadiene...*

<sup>1</sup>TUISOV, Aleksei Gennadevich, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>, Researcher ID: ABA-4930-2020, e-mail: [tuisovag@gmail.com](mailto:tuisovag@gmail.com)

<sup>2</sup>OKHLOPKOVA, Aitalina Alekseevna, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, Researcher ID: A-6594-2014, e-mail: [okhlopkova@yandex.ru](mailto:okhlopkova@yandex.ru)

<sup>2</sup>LAZAREVA, Nadezhda Nikolaevna, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Head of the Laboratory, <http://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, Researcher ID: E-5063-2014, e-mail: [lazareva-nadia92@mail.ru](mailto:lazareva-nadia92@mail.ru)

#### *Affiliation*

<sup>1</sup>The Yakut Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Composite Materials of the Arctic Subarctic, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russian Federation

<sup>2</sup>Ammosov North-Eastern Federal University, Institute of Natural Science, 58 Belinsky st., Yakutsk 677000, Russian Federation

*Поступила в редакцию / Submitted 22.06.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 19.07.2022*

*Принята к публикации / Accepted 03.08.2022*

## Перспективы применения природного сырья для строительства временных сооружений в северных и арктических условиях

С. Н. Попов\*, О. Н. Буренина, А. В. Андреева, М. Е. Саввинова

*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

✉ \*savvapopov49@mail.ru

### Аннотация

В связи с интенсификацией промышленного освоения Арктики возобновлен интерес к возможностям применения наиболее распространенных в северных районах природных материалов (снега и льда) при строительстве временных зданий и сооружений. Технические характеристики снега и льда (прочность, теплопроводность) соответствуют аналогичным показателям многих строительных материалов и в арктических условиях могут эксплуатироваться в течение достаточно продолжительного времени. В предлагаемой статье представлены результаты исследований по разработке технологии производства строительных блоков из природного сырья (снега), прочностные характеристики которых достаточны для возведения временных малоэтажных сооружений (складов, гаражей, ангаров, капониров и т. п.). Прочность замороженных снеговодяных блоков обеспечивается на уровне 3,1–6,4 МПа, теплопроводность – 1,38 Вт/(м·°С). Для внешнеармированных снеговых блоков натурными испытаниями показана достаточная прочность для сооружения одноэтажных зданий. Технологической особенностью изготовления блоков является возможность их производства без использования специализированного оборудования. Определены технологические режимы формования блоков и их теплофизические и прочностные характеристики. Проведены испытания блоков на стойкость к потеплению в весенний период, а также макета одноэтажного здания размерами 3×4,2×2,3 м, показавшие возможность широкого применения предлагаемых технологий в условиях Севера и Арктики.

**Ключевые слова:** строительство, снег, композит, блок, прочность, теплопроводность

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

**Для цитирования:** Попов С.Н., Буренина О.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е. Перспективы применения природного сырья для строительства временных сооружений в северных и арктических условиях. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):450–458. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-450-458>

## Prospects for the use of natural raw materials for temporary constructions in northern and arctic conditions

S. N. Popov\*, O. N. Burenina, A. V. Andreeva, M. E. Savvinova

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

✉ \*savvapopov49@mail.ru

### Abstract

The industrial development of the Arctic has increased interest in the use of the most common natural materials (snow and ice) for the construction of temporary buildings in northern regions. The technical characteristics of the snow and ice (strength, thermal conductivity) correspond to similar properties of other construction materials. These characteristics allow to use them in the Arctic conditions for a long period of time. We studied the strength characteristics of building blocks made from natural raw materials (snow), which are sufficient for the construction of temporary low-rise buildings (warehouses, garages, hangars, caponiers, etc.). The strength of frozen snow-water blocks is provided at 3.1–6.4 MPa, while heat content at 1.38 W/(m·°C). Full-scale tests of the externally reinforced snow blocks prove their sufficient strength for the construction of one-story buildings. Technological features of the blocks allow their

production without specialized equipment. We determined technological modes for blocks forming, their thermo-physical and strength characteristics. The units were tested for their resistance to the warming in spring. We also tested one-story building model (size 3×4,2×2,3 m). The results of both tests showed the possibility of widespread use of the technology in the North and the Arctic.

**Keywords:** construction, snow, composite, block, robustness, thermal conductivity

**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 (number 122011100162-9). We used the scientific equipment of the Center for Collective Use of the Federal Research Center of the SB RAS.

**For citation:** Popov S.N., Burenina O.N., Andreeva A.V., Savvinova M.E. Prospects for the use of natural raw materials for temporary constructions in northern and arctic conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022; 27(3):450–458. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-450-458>

## Введение

В настоящее время в северных и арктических регионах в связи с удаленностью от основных промышленных центров и высокой стоимостью завозимых строительных материалов вновь возник интерес к инженерным сооружениям из льда и снега – практически единственных природных материалов, которые имеются в неограниченном количестве и могут заготавливаться с минимальными затратами. Северные и арктические климатические условия позволяют эксплуатировать сооружения из льда и снега в течение достаточно продолжительного периода (до 10 месяцев). По истечении срока эксплуатации сооружения самоликвидируются, что может являться их дополнительным преимуществом.

Основные особенности льда как строительного материала обобщены в работах К.Ф. Войтковского [1–3], И.С. Песчанского [4], Б.А. Савельева [5] и др. Вопросами получения композитов с ледяной матрицей и их использования в строительстве занимаются не одно десятилетие. Подавляющее большинство исследований ориентировано на разработку и изучение армированных композитов для строительства зимних дорог, ледовых переправ, плотин и дамб [6–8]. В результате проведенных исследований для армирования льда и уплотненного снега было предложено использовать всевозможные материалы: рисовую солому, ветки, стекловолокно, целлюлозу, пластмассовые прутья, стальные тросы, пульпу из газетной бумаги, листы пергамента и т. п. Во многих публикациях, посвященных армированию льда, отмечается положительный эффект, заключающийся в повышении несущей способности и долговечности.

В настоящее время разработкой и исследованием физико-механических свойств композитов с ледяной матрицей занимаются во ВНИИ авиационных материалов совместно со специалистами

ми Национального исследовательского Томского государственного университета, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Института лазерных и информационных технологий и др. Однако предлагаемые перечисленными организациями композиты отличаются сложностью состава, включающего дорогостоящие наполнители, в том числе полимерные, и химические модификаторы [9, 10]. Известны работы по армированию пресного льда наполнителями природного происхождения [11]. При этом разрабатываемые композиты предназначены для строительства как зданий и сооружений, так и зимних автомобильных дорог и ледовых переправ.

Следует отметить, что предлагаемые различными авторами технологии производства композитов на ледяной основе достаточно трудоемки, что в значительной мере понижает производительность работ по изготовлению строительных материалов. Возможность производства и применения композитов на основе снега для формирования мелкоштучных строительных материалов проведенный анализ научно-технической литературы и патентной информации не выявил. Также отсутствуют сведения о технологиях и применении снеговых блоков во внешних армирующих оболочках.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка легко реализуемых технологий производства стеновых материалов на основе снега для строительства временных сооружений в северных и арктических климатических условиях.

## Методы и материалы исследования

При проведении лабораторных исследований для изготовления опытных образцов была использована водопроводная вода согласно ГОСТ Р 51232 [15], снег и опилки древесины хвойных пород, а также полипропиленовая мешкотара.

Определение прочности для опытных образцов проводилось согласно ГОСТ 8462-85 [16] на испытательном прессе ИТ-1А-1000, измерения теплопроводности осуществлялись по ГОСТ 7076-87 [17] на измерителе теплопроводности ИТП-МГ 4 «100». Изготовление опытных образцов мелкоштучных строительных блоков размерами 200×200×400 мм и 250×300×600 мм осуществлялось в деревянных прессформах. Продолжительность выдержки опытных образцов перед прочностными испытаниями и измерениями теплопроводности составляла после изготовления 7 суток.

Для проведения исследований были изготовлены три типа материалов:

- замораживаемая снеговодяная смесь с содержанием снега от 10 до 70 %;
- снеговодяная смесь с добавлением опилок с соотношением массовых частей вода/ снег/ опилки от 5/5/1 до 5/5/4;
- внешнеармированные снеговые блоки.

### Результаты и обсуждение

Для исследования прочностных свойств снеговодяных смесей были изготовлены образцы кубической формы размером 100×100×100 мм. Снеговодяные образцы изготавливались следующим образом. В полиэтиленовую форму заливалась вода, добавлялся снег и перемешивался с водой до получения однородной массы. Затем смесь слегка уплотнялась, поверхность разравнивалась, образец извлекался из формы и замо-

раживался в свободном состоянии при температуре окружающего воздуха от –15 °С до –25 °С. Продолжительность выдержки в этих условиях до испытаний составляла 7 суток. При добавлении в воду снега его температура понижается практически до 0 °С, что способствует заметному ускорению получения замороженного образца.

Результаты прочности при сжатии полученных образцов при температуре –20 °С представлены в табл. 1.

После извлечения из формы при содержании снега 40–60 % геометрические размеры снеговодяных блоков практически не изменяются, изделие свободно извлекается из формы, что обеспечивает возможность замораживания в свободном состоянии. При содержании снега более 60 % и менее 40 % после выемки из формы геометрические размеры блоков не сохраняются и замораживание в свободном состоянии практически исключается.

Измерения геометрических размеров полученных образцов блоков после замораживания показали достаточную стабильность. Разброс геометрических размеров образцов не превышает 1,5 %, что соответствует требованиям по точности размеров кирпичей или бетонных блоков и полублоков, предусмотренным ГОСТ 503-2012 и ГОСТ 21520-89 [17,18].

Показатели прочности при сжатии образцов, содержащих по массе от 40 до 60 % снега, составляют от 3,1 до 6,4 МПа, что вполне достаточно для строительства малоэтажных сооружений.

Таблица 1

### Прочность образцов из снеговодяных смесей

Table 1

#### Strength of samples from snow-water mixtures

Состав смеси вода/снег, масс. % / The composition of the mixture water/snow, weight%	Прочность при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa	Сохраняемость формы блока / Block shape persistence
90/10	0,45	Форма не сохраняется
80/20	0,68	Форма не сохраняется
60/40	3,3	Образец сохраняет форму
55/45	3,3	Образец сохраняет форму
50/50	6,4	Образец сохраняет форму
45/55	5,0	Образец сохраняет форму
40/60	3,1	Образец сохраняет форму
30/70	–	Форма не сохраняется

**Прочность при сжатии и теплопроводность  
наполненных древесными опилками снеговодяных образцов**

Table 2

**Compression strength and thermal conductivity snow-water samples filled with wood sawdust**

Состав смеси вода/снег/опилки, масс. частей / The composition of the mixture water / snow / sawdust, in mass parts	Теплопроводность, Вт/(м °С) / Thermal conductivity, W / (m °C)	Прочность при сжатии, МПа / Compressive strength, MPa
5/5/1	1,5076	7,99
5/5/1,5	1,1505	5,97
5/5/2	1,5182	6,43
5/5/2,5	0,7906	5,57
5/5/3	0,7859	4,41
5/5/4	0,5259	3,67

Для определения коэффициента теплопроводности снеговодяных материалов по описанной выше технологии были изготовлены образцы размером 100×100 мм, толщиной 10 мм.

Результаты экспериментов показали, что теплопроводность снеговодяного материала несколько ниже, чем у пресноводного льда (2,2–3,5 Вт/(м·°С), и составляет от 1,38 Вт/(м·°С) при одинаковом содержании воды и снега. Для изучения возможности повышения теплозащитных свойств в снеговодяную смесь добавляем опилки древесины.

Состав снеговодяной смеси содержал по пять массовых частей воды и снега, в который добавлялось от одной до четырех массовых частей опилок древесины хвойных пород. Дисперсность частиц опилок составляла 2,5 мм. При добавке более четырех частей опилок образец при вынимании из формы не сохранял геометрические размеры.

Измерения теплопроводности показали, что добавка древесных опилок существенно повышает теплозащитные свойства композиционного материала. Если минимальная теплопроводность у снеговодяных смесей при одинаковом соотношении масс воды и снега устанавливается на уровне 1,38 Вт/(м·°С), то при добавлении в такую смесь четырех массовых частей древесных опилок с теплопроводностью 0,07 Вт/(м·°С) коэффициент теплопроводности снижается до 0,526 Вт/(м·°С). Следует отметить, что при введении в снеговодяную смесь опилок с увеличением их содержания прочность композиционного материала монотонно снижается, т. е. эффекта упрочнения не наблюдается. Возможно, это свя-

зано с понижением прочности отдельных частиц древесины после воздействия режущего инструмента. Однако, прочность снеговодяного материала с добавками менее четырех массовых частей опилок не ниже 3,67 МПа и достаточна для строительства малоэтажных сооружений.

Как указывалось выше, для повышения прочности и теплозащитных свойств получаемых из снеговодяной смеси ледяных блоков возможно дополнительное введение в их состав армирующих и теплоизолирующих добавок, но эта операция для ледовых материалов весьма затруднительна. При добавлении в воду снега вязкость смеси значительно увеличивается и при дополнительном введении ингредиентов обеспечивается их равномерное распределение после смешивания. Возможность такого подхода показана на примере изготовления снеговодяных смесей с добавкой древесных опилок в количестве от одной до пяти массовых частей. Фрактографический анализ срезов образцов показал достаточно равномерное распределение опилок в снеговодяной смеси.

Исследования прочностных свойств и теплопроводности снеговодяных замороженных образцов после семисуточной выдержки привели к результатам, представленным в табл. 2.

Для проведения натурных испытаний и определения стойкости к весеннему потеплению из льда и снеговодяных смесей, включающих опилки, были изготовлены блоки, размеры которых и другие характеристики приведены в табл. 3. Всего было изготовлено три вида материалов – блоки из замороженной в формах водопроводной воды, блоки из снеговодяной смеси с содер-

## Характеристики ледовых и снеговодяных блоков

Table 3

## Characteristics of ice and snow-water blocks

Состав блока / Block composition	Габаритные размеры, мм / Overall dimensions, mm	Вес, кг / Weight, kg	Объем, дм <sup>3</sup> / Volume, dm <sup>3</sup>	Плотность, г/см <sup>3</sup> / Density, g/cm <sup>3</sup>
Лед	180×200×400	13,66	14,4	0,975
Снеговодяная смесь	200×200×400	11,46	16	0,716
Снеговодяная смесь с опилками	200×200×400	11,94	16	0,746

жанием 50 % воды и 50 % снега, а также снеговодяные блоки, содержащие 5 массовых частей воды, 5 массовых частей снега и 1 массовой части древесных (сосновых) опилок.

Из изготовленных блоков были построены три макета стеновых ограждающих конструкций длиной 1, высотой 1, толщиной 0,2 м. Длинные стороны макетов были обращены на юг. Фотографии макетов приведены на рис. 1.

Испытания макетов были начаты в начале весны и продолжались практически до полного растаивания конструкций. Наименьшую долговечность показали конструкции из снеговодяных блоков, содержащих древесные опилки. Несмотря на их более низкую теплопроводность, интенсивность их таяния, по нашему мнению, больше зависит от степени черноты композиционного материала.

Технология изготовления мелкоштучных строительных блоков полностью идентична технологии изготовления опытных образцов. Для изготовления форм возможно применение древесины, объем формы не должен превышать 30 л, так как допустимый предел поднятия и переноса тяжестей по действующим правилам и нормам охраны труда – 30 кг. С целью исключения примерзания и прилипания снеговодяной массы к стенкам формы рекомендуется нанесение на ее внутреннюю поверхность покрытия из полиэтиленовой пленки. По сравнению с блоками, получаемыми после замораживания воды в формах, у снеговодяных блоков практически полностью отсутствует коробление в процессе ледообразования, и изделия получают строго прямоугольными с плоскими поверхностями. Выемка легко осуществляется при переворачивании формы и ее легком потряхивании.

Несмотря на простоту и доступность технологии производства снеговодяных блоков, ее характеризуют два недостатка – продолжительность

заморозки и необходимость использования воды. Кроме того, желательно дополнительное снижение трудоемкости, повышение производительности и улучшение теплозащитных характеристик.

Как известно, у североамериканских индейцев для строительства временного жилья ранее широко использовались снеговые блоки, выпиливаемые из естественно уплотненного снежного покрова. Однако, прочность таких блоков очень низкая и составляет 0,5–0,8 МПа [1–3].

Значительное повышение прочности снеговодяных блоков можно обеспечить при внешнем армировании подтрамбованного снега даже мягкими оболочками, изготовленными из полимерных тканей, например полипропиленовых, с достаточно высокой прочностью [13]. Осуществляется это следующим образом. Мягкую оболочку, например мешкотару, помещают в деревянную прямоугольную форму и, периодически подтрамбовывая, заполняют снегом, закупоривают (завязывают горловину), извлекают из формы и получают готовый строительный блок, который можно сразу укладывать в стену строящегося сооружения.



Рис. 1. Макеты стеновых конструкций из снеговодяных (справа) и снеговодяных с добавкой опилок (слева) блоков.

Fig. 1. Models of wall structures made of snow-water (right) and snow-water (left) blocks with the addition of sawdust.



Рис. 2. Общий вид макета одноэтажного сооружения.

Fig. 2. General view of the layout of a one-story building.

Герметизация стыков блоков при этом может осуществляться незамерзшей снеговодяной смесью. При завершении зимнего сезона остатки подтаявшего снега и талой воды из оболочки удаляются, и после сушки она может в следующий сезон использоваться повторно.

Теплозащитные свойства такого рода ограждений определяются теплопроводностью уплотненного снега, составляющей около  $0,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ , что значительно ниже, чем у ледовых и снеговодяных материалов.

Для проведения испытаний были изготовлены внешнеармированные снеговые блоки размерами  $250 \times 300 \times 600 \text{ мм}$ , из которых построен макет одноэтажного здания площадью  $4,2 \times 3 \text{ м}$  с высотой  $2,3 \text{ м}$  и внутренним объемом  $30 \text{ м}^3$  (рис. 2). Толщина стен –  $0,6 \text{ м}$ , толщина потолка –  $0,25 \text{ м}$ , перекрытие потолка – сосновые доски толщиной  $40 \text{ мм}$ . Сооружение было построено на грунтовом основании, теплозащита которого не предусматривалась. Отопление макета осуществлялось обогревателем ГИИ-3,65 «Сибирячка» с номинальной тепловой мощностью  $3650 \text{ Вт}$ .

Проведенные испытания показали следующее. При температуре окружающего воздуха и начальной температуре внутри помещения  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  и включении обогревателя через  $6 \text{ ч}$  температура в сооружении стабилизируется и достигает под потолком  $9-10 \text{ }^\circ\text{C}$ , в метре от пола  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ , на поверхности пола  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$ . По результатам испытаний в дальнейшем рекомендуется усиление теплозащиты потолочного перекрытия или увеличение мощности нагревательного оборудования.

Прочность внешнеармированных снеговых блоков достаточна для строительства одноэтаж-

ных сооружений. За время испытаний с начала декабря по апрель не выявлено ни одного дефектного блока с нарушением внешней армировки. С течением времени при воздействии постоянной нагрузки наблюдается постепенное проседание и некоторое уменьшение высоты сооружения вследствие уплотнения снега в блоках.

Дополнительно проведенные эксперименты по исследованию деформативности снеговых блоков при воздействии постоянной нагрузки показали следующее. При нагрузках  $91,2 \text{ кг}$  и  $190 \text{ кг}$  на поверхность блока площадью  $1800 \text{ см}^2$  уменьшение высоты блока наблюдается в течение одной недели и затем прекращается. Величины уменьшения высоты составляют  $2 \text{ мм}$  и  $4 \text{ мм}$ . При среднем весе одного блока  $16 \text{ кг}$  указанные нагрузки соответствуют стенам высотой  $1,4 \text{ м}$  и  $2,9 \text{ м}$ .

Фактическое значение усадки макета по высоте в процессе  $5$  месяцев испытаний составило  $25 \text{ мм}$ , что вполне согласуется с результатами эксперимента с учетом понижения нагрузки в выше расположенных блоках. По результатам испытаний на широте г. Якутск эксплуатация сооружения из внешнеармированных снеговых блоков возможна до середины апреля. Севернее, на более высоких широтах, эксплуатация может быть продлена до мая.

### Обсуждение

Ледяные блоки являются одним из наиболее дешевых материалов для строительства временных сооружений в северных и арктических условиях, но их извлечение из ледовых покровов водоемов является весьма трудоемким процессом и осложняется необходимостью обеспечения необходимой размерной точности. Замораживание воды в формах характеризуется продолжительностью замерзания воды, сложностью извлечения блока при его примерзании к поверхности формы и возможностью ее разрушения из-за объемного расширения при ледообразовании. При этом ледяные блоки имеют достаточно высокую теплопроводность, которая может быть снижена за счет введения теплоизоляционных наполнителей, которые одновременно будут являться армирующими компонентами.

Однако, изготовление ледяных блоков путем замораживания смеси воды с армирующими и теплоизоляционными элементами затрудняется сложностью обеспечения равномерного распределения в объеме льда армирующих компонентов, связанной с всплыванием веществ с низким

удельным весом на поверхность воды и погружением на дно формы армирующих ингредиентов с плотностью более плотности воды. Технология изготовления ледяных блоков значительно упрощается при использовании в качестве сырья снеговодяных смесей [12]. Так, применение в качестве матрицы снеговодяной смеси, характеризующейся высокой вязкостью, может обеспечить равномерное распределение армирующих компонентов в объеме.

Несмотря на определенные преимущества, в том числе обеспечение достаточной прочности и существенное улучшение теплозащитных свойств (снижение коэффициента теплопроводности льда от 2,2–3,5 Вт/(м·°С) до 0,5–1,5 Вт/(м·°С) у снеговодяных с добавками древесных опилок), технология получения таких блоков остается достаточно сложной. В основном это касается необходимости доставки в арктические районы древесных опилок и трудоемкости смешения их со снегом и водой.

Наиболее рациональной из рассмотренных, на взгляд авторов, является технология изготовления внешнеармированных строительных блоков из подтрамбованного снега. Теплопроводность уплотненного снега составляет 0,4 Вт/(м·°С), что значительно ниже, чем у ледовых и снеговодяных смесей с древесными опилками. Для внешней армировки целесообразно использовать полипропиленовую техническую ткань или применять готовую мешкотару, выпускаемую по ГОСТ 32522-2013 [19].

Изготовление внешнеармированных снеговых блоков не требует никакого специального технологического оборудования и может быть освоено неквалифицированным техническим персоналом. Согласно опыту, полученному при сооружении экспериментального объекта, одним работником за рабочий день возможно изготовление до 5 м<sup>3</sup> строительных блоков. Такая производительность является достаточно высокой и может обеспечить оперативное строительство необходимых временных сооружений – утепленных гаражей, складов, капониров и других необходимых объектов.

Следует отметить, что применение «мокрого» снега (по терминологии В.Л. Серошевского [20]) для повышения эффективности теплозащиты жилья и сельскохозяйственных построек использовалось якутами издревле. Такая же информация известна из трудов Р.К. Маака [21], где «мокрый» снег в те же времена использовался в виде обмазки, наносимой на внешние стены.

В настоящее время возможно возвращение к давно забытым технологическим решениям, но по новым технологическим принципам.

### Выводы

1. Разработана технология производства снеговодяных мелкоштучных строительных материалов, включающая подготовку смеси воды и снега в формах, выемку отформованных изделий и замораживание в свободном состоянии. Наиболее оптимальным является состав, содержащий в одинаковых по массе количествах воду и снег, обеспечивающий прочность при сжатии 6,4 МПа с коэффициентом теплопроводности 1,38 Вт/(м·°С). Показана возможность добавки в снеговодяную смесь дополнительных ингредиентов для понижения теплопроводности и улучшения теплозащитных свойств. При добавке древесных опилок возможно снижение теплопроводности в 2–2,5 раза, интенсивность таяния таких блоков в весенний период повышается.

2. Разработана технология производства блоков из утрамбованного снега, отличающаяся тем, что снег уплотняют в помещенной в форму мягкой оболочке, создающей его внешнюю армировку. Прочность внешнеармированных снеговых блоков достаточна для строительства одноэтажных зданий и сооружений. Теплопроводность понижается до 0,4 Вт/(м·°С).

3. Натурные испытания макетов стеновых сооружений и одноэтажного здания, изготовленных из замороженных снеговодяных блоков и блоков из уплотненного внешнеармированного снега, позволяют рекомендовать их для строительства временных зданий и сооружений в арктических условиях.

### Список литературы / References

1. Войтковский К.Ф. *Механические свойства льда*. М.: Изд-во АН СССР; 1960. 100 с.  
[Voytkovskiy K.F. *Mechanical properties of ice*. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1960. 100 p. (In Russ.)]
2. Войтковский К.Ф. Реология льда и снега. *Тр. Первого Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов*. Ереван: Изд-во Ереван. ун-та; 1973. 292 с.  
[Voytkovskiy K.F. Rheology of ice and snow. *Tr. Perвого Vsesoyuznogo simpoziuma po reologii gruntov*. Yerevan: Izd-vo Yerevan. un-ta; 1973. 292 p. (In Russ.)]
3. Войтковский К.Ф. *Механические свойства снега*. М.: Наука; 1977. 126 с.  
[Voytkovskiy K.F. *Mechanical properties of ice*. Moscow: Nauka; 1977. 126 p. (In Russ.)]
4. Песчанский И.С. *Ледоведение и ледотехника*. Л.: Гидрометеиздат; 1975. 461 с.

[Peschanskiy I.S. *Ice science and ice engineering*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. 461 p. (In Russ.)]

5. Савельев Б.А. *Строение, состав и свойства ледяного покрова морских и пресных водоемов*. М.: Изд-во МГУ; 1963. 541 с.

[Savelev B.A. *Structure, composition and properties of the ice cover of marine and freshwater reservoirs*. Moscow: Izd-vo MGU; 1963. 541 p. (In Russ.)]

6. Васильев Н.К. Ледокомпози́ты, их свойства и технология получения. *Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 1994;228:28–36.

[Vasilev N.K. Ice composites, their properties and production technology. *Proceedings of the VNIIG*. 1994; 228:28–36. (In Russ.)]

7. АС № 1600406 СССР МКИ E02B7/06. Способ возведения грунтовой плотины мерзлого типа / Васильев Н.К., Разговорова Е.Л., Шаталина И.Н., Портнягин Л.Г., Сидоров М.П. № 4616750 заявл. 05.12.88; зарегистр. 15.06.90.

[АС № 1600406 USSR МКИ E02B7/06. Method of a frozen-type soil dam construction. Vasilev N.K., Razgovorova Ye.L., Shatalina I.N., Portnyagin L.G., Sidorov M.P. № 4616750 appl. 05.12.88; registr. 15.06.90. (In Russ.)]

8. Способ изготовления водонепроницаемого экрана в низкотемпературных грунтовых материалах элементов гидротехнического сооружения: пат. 2276703 Рос. Федерация: E02B3/16/ Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Стасьева Л.А., Долгих С.Н., Мельник Г.А.; заявитель и патентообладатель Акционерная компания «АЛРОСА» (закрытое акционерное общество) (АК «АЛРОСА» (ЗАО) (RU), Институт химии нефти СО РАН (ИХН СО РАН) (RU). № 2004131314/03; заявл. 25.10.2014, опубл. 20.05.2006 Бюл. № 14.

[Method for water-tight screen forming in low-temperature ground substance of hydraulic structure members: pat. 2276703 Russian Federation: E02B3/16/ Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Staseva L.A., Dolgikh S.N., Melnik G.A.; zayavitel i patentoobladatel Aktsionernaya kompaniya “ALROSA” (zakrytoe aktsionernoe obshchestvo) (AK “ALROSA” (ZAO) (RU), Institut khimii nefi SO RAN (IKhN SO RAN) (RU). - № 2004131314/03; appl. 25.10.2014, publ. 20.05.2006 Bul. № 14. (In Russ.)]

9. Бузник В.М., Ландик Д.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А., Черепанин Р.П., Новиков М.М., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д., Разомасова Т.С., Устюгова Т.Г. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе ледяной матрицы. *Материаловедение*. 2017;2:33–40.

[Buznik V.M., Landik D.N., Yerasov V.S., Nuzhnyy G.A., Cherepanin R.P., Novikov M.M., Goncharova G.Yu., Razomasov N.D., Razomasova T.S., Ustyugova T.G. Physical-mechanical properties of ice matrix based composite materials. *Materialovedenie*. 2017;2: 33–40. (In Russ.)]

10. Черепанин Р.П., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, ар-

мированных волокнами РУСАР-С. *Материаловедение*. 2017;7:38–44.

[Cherepanin R.P., Nuzhnyy G.A., Razomasov N.A., Goncharova G.Yu., Buznik V.M. Physical-mechanical properties of glacial composite materials reinforced by RUSAR-S fibers. *Materialovedenie*. 2017;7:38–44. (In Russ.)]

11. Сыромьятникова А.С., Алексеева А.В. Армирование композиционных материалов на основе пресного льда наполнителями природного происхождения. *EURASTRENCOLD-2018: Тр. VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, посвященные 80-летию академика В.П. Ларионова*. Якутск: 2018;402–407.

[Syromyatnikova A.S., Alekseeva A.V. Reinforcing of composite materials based of fresh ice, using natural origin fillers. *EURASTRENCOLD-2018: Tr. VIII Yevraziyskogo simpoziuma po problemam prochnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata, posvyashchennyye 80-letiyu akademika V.P. Larionova*. Yakutsk, 2018:402–407. (In Russ.)]

12. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. М.: 2019; 16 с.

[ГОСТ 23732-2011 Water for concrete and mortar. Moscow: 2019; 16 p. (In Russ.)]

13. ГОСТ 8462-85 Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. М.: 7 с.

[ГОСТ 8462-85 Wall materials. Methods for determining compressive and bending strength limits. Moscow: 7 p. (In Russ.)]

14. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном режиме. М.: 27 с.

[ГОСТ 7076-99 Construction materials and products. Method for determining thermal conductivity and thermal resistance in stationary mode. Moscow; 27 p. (In Russ.)]

15. ГОСТ 503-2012 Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. М.: 2012; 31 с.

[ГОСТ 503-2012 Brick and stone are ceramic. General technical conditions. Moscow: 2012; 31 p. (In Russ.)]

16. ГОСТ 21520-89 Блоки из ячеистых бетонов стеновые мелкие. Технические условия. М.: 1990; 7 с.

[ГОСТ 21520-89 Blocks of cellular concrete wall small. Technical conditions. Moscow: 1990; 7 p. (In Russ.)]

17. Способ изготовления блочного (мелкоштучного) строительного материала из снега: пат. 2714543 Рос. Федерация E04B 1/00, E04C 2/54 / Андреева А.В., Бочкарев В.Н., Буренина О.Н., Новгородов В.А., Попов С.Н., Саввинова М.Е., Слепцов С.Г.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». № 2018144885; заявл. 17.12.2018, опубл. 18.02.2020 Бюл. № 5.

[Method of making block (small-piece) construction material from snow: pat. 2714543 Russian Federation E04B 1/00, E04C 2/54 / Andreeva A.V., Bochkarev V.N., Burenina O.N., Novgorodov V.A., Popov S.N., Savvinova M.Ye., Sleptsov S.G.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». № 2018144885; appl. 17.12.2018, publ. 18.02.2020 Bul. № 5. (In Russ.)]

18. Способ изготовления блочного (мелкоштучного) строительного материала на ледяной основе: пат. 2685386 Рос. Федерация: E04B 1/00, E04C 2/54 / Андреева А.В., Буренина О.Н., Даваасенгэ С.С., Давыдова Н.Н., Попов С.Н., Саввинова М.Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». № 2018107523; заявл. 28.02.2018, опубл. 17.04.2019. Бюлл. № 11.

[Method of manufacturing block (small piece) construction material on ice basis. pat. 2685386 Russian Federation: E04B 1/00, E04C 2/54 / Andreeva A.V., Burenina O.N., Davaasenge S.S., Davydova N.N., Popov S.N., Savvinova M.Ye.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». № 2018107523; appl. 28.02.2018, publ. 17.04.2019. Bull. № 11. (In Russ.)]

19. ГОСТ 32522-2013 Мешки тканые полипропиленовые. Общие технические условия. М., 2019. 22 с.

[GOST 32522-2013 Woven polypropylene bags. General technical conditions. Moscow, 2019. 22 p. (In Russ.)]

20. Серошевский В.Л. Якуты. Опыт этнографического исследования. М.; 1993. 736 с.

[Seroshevskiy V.L. Yakuty. Opyt etnograficheskogo issledovaniya. Moscow; 1993. 736 p. (In Russ.)]

21. Маак Р.К. Вилюйский округ. М., Яна; 1994. 592 с. [Maak R.K. Vilyuykiy okrug. Moscow, Yana; 1994. 592 p. (In Russ.)]

#### Об авторах

ПОПОВ Савва Николаевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3187-2632>, Researcher ID: A-5245-2014, e-mail: savvapopov49@mail.ru

БУРЕНИНА Ольга Николаевна, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, <https://orcid.org/0000-0003-1712-6892>, Researcher ID: A-6446-2014, e-mail: bon.ipng@mail.ru

АНДРЕЕВА Айталиа Валентиновна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0890-531X>, Researcher ID: D-6053-2014, e-mail: aita1973@mail.ru

САВВИНОВА Мария Евгеньевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2793-2014>, Researcher ID: D-4605-2014, maria\_svv@yandex.ru

#### Аффилиация

Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН, 677007, г. Якутск, Автодорожная, 20, Российская Федерация.

#### About the authors

POPOV, Savva Nikolaevich, Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3187-2632>, Researcher ID: A-5245-2014, e-mail: savvapopov49@mail.ru

BURENINA, Olga Nikolaevna, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1712-6892>, Researcher ID: A-6446-2014, e-mail: bon.ipng@mail.ru

ANDREEVA, Aytalina Valentinovna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0890-531X>, Researcher ID: D-6053-2014, e-mail: aita1973@mail.ru

SAVVINOVA, Mariya Evgenyevna, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2793-2014>, Researcher ID: D-4605-2014, e-mail: maria\_svv@yandex.ru

#### Affiliation

Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avto-dorozhnaya str., Yakutsk 677007, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 21.04.2022

Поступила после рецензирования / Revised 26.05.2022

Принята к публикации / Accepted 08.06.2022

## Электронные свойства вертикально уложенной гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>

Ю. М. Григорьев<sup>1,2,\*</sup>, Е. П. Шарин<sup>1</sup>, Н. Я. Муксунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Российская Федерация.

✉ \*grigyum@yandex.ru

### Аннотация

Монослойные дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) в качестве новых двумерных полупроводниковых материалов открывают новые возможности для оптоэлектроники благодаря превосходным возможностям захвата света и фотодетекции. Фотоприемники на основе ДПМ стали важными компонентами систем зондирования, визуализации и связи, способны воспринимать и преобразовывать оптические сигналы в электрические. Актуальной и нерешенной проблемой является поиск способов разработки высококачественных однослойных и гетерослойных электронных устройств на основе дихалькогенидов переходных металлов с длительным сроком службы, таких как оптоэлектронные устройства и полевые транзисторы. Одним из необходимых этапов таких поисков является управление шириной запрещенной зоны в гетероструктурах. В данной работе мы исследуем ширину запрещенной зоны в гетероструктуре MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> в зависимости от расстояния между слоями MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub>. Расчеты из первых принципов показали, что, в отличие от однородных бислоев, гетеропереход MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> имеет оптически активную запрещенную зону, меньшую, чем у однослойных MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub>. С увеличением межслойного расстояния в гетероструктурах MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> взаимодействие между слоями ослабляется. Это приводит к сдвигу уровня Ферми в состояние с более высокой энергией.

**Ключевые слова:** гетероструктура, ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, дихалькогениды переходных металлов, двумерные материалы, зонная структура, валентная зона, зона проводимости

**Для цитирования:** Григорьев Ю.М., Шарин Е.П., Муксунов Н.Я. Электронные свойства вертикально уложенной гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(3):459–465. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-459-465>

## Electronic properties of vertically stacked MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure

Yu. M. Grigor'ev<sup>1,2,\*</sup>, E. P. Sharin<sup>1</sup>, N. Ya. Muksunov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

✉ \*grigyum@yandex.ru

### Abstract

Monolayer transition metal dichalcogenides (TMD) as new two-dimensional semiconductor materials open new possibilities for optoelectronics due to their excellent light capture and photodetection capabilities. TMD-based photodetectors have become important components of sensing, visualization and communication systems, capable of receiving and converting optical signals into electrical ones. An urgent and unsolved task is the development of high-quality single-layer and heterolayer electronic devices based on transition metal dichalcogenides with a long service life, such as optoelectronic devices and field-effect transistors. The control of the band gap in heterostructures is one of the necessary steps in this development. We studied the band gap in the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure depending on the distance between the MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> layers. Ab initio calculations showed that, in contrast to homogeneous bilayers, the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterojunction has an optically active band gap smaller than that of single-layer MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub>. With an increase in the interlayer distance in the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructures, the interaction between the layers weakens. Thus, it results in a shift of the Fermi level to a state of higher energy.

**Keywords:** heterostructure, van der Waals heterostructures, transition metal dichalcogenides, two-dimensional materials, band structure, valence band, conduction band

**For citation:** Grigor'ev Yu.M., Sharin E.P., Muksunov N.Ya. Electronic properties of vertically stacked  $\text{MoS}_2/\text{WS}_2$  heterostructure. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(3):459–465. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-459-465>

### Введение

Открытие однослойного графена ведет к новой области исследований, которая вызывает большой интерес к двумерным структурам из-за их уникальных свойств. Помимо графена, существует семейство дихалькогенидов переходных металлов, которые обладают не менее интересными свойствами. Привлекательность этих 2D-материалов в основном обусловлена их превосходящими электрическими, механическими и оптическими свойствами, которые открывают большой потенциал для новых приложений, например, в таких устройствах, как светоизлучающие диоды (светодиоды) [1], транзисторы [2], датчики [3] и фотоприемники [4]. Монослои дихалькогенидов переходных металлов также обеспечивают фундаментальное требование для традиционных электронных устройств, таких как новые оптоэлектронные и фотоэлектрические приложения, из-за наличия прямой запрещенной зоны [5–11].

В последнее время исследования электронных и оптоэлектронных устройств на основе монослоя  $\text{MoS}_2$  получили дальнейшее развитие по следующим причинам. Во-первых, было обнаружено, что монослои  $\text{MoS}_2$  имеют прямую запрещенную зону 1,8 эВ с сильной фотолюминесценцией [12, 13], в отличие от объемного  $\text{MoS}_2$ , у которого непрягая запрещенная зона составляет 1,29 эВ. Во-вторых, на основе монослоя  $\text{MoS}_2$  были изготовлены полевые транзисторы с высокой подвижностью заряда [2]. В-третьих, сочетание гексагональной симметрии, большого спин-орбитального взаимодействия и отсутствия инверсионной симметрии приводит к образованию запрещенной зоны с двумя впадинами и сильной спин-долинной связью. Все это открывает новые возможности в развивающейся области долинотроники [14]. Другой перспективный материал – монослой  $\text{MoS}_2$ , который впервые получен в работе [15] и обладает свойствами, близкими к свойствам монослоя  $\text{MoS}_2$ . Все вышесказанное, естественно, побуждает исследовать электронные свойства многослойных дихалькогенидов переходных металлов.

Появление многослойных дихалькогенидов переходных металлов в качестве новых двумерных полупроводниковых материалов открывает новые возможности для теоретических и экспериментальных исследований [16, 17]. Огромный интерес представляют гетероструктуры на основе двумерных материалов с различными электронными характеристиками. В этих двумерных материалах атомные монослои также могут быть объединены для создания гетероструктур ван-дер-Ваальса [18, 19], где монослои из нескольких двумерных материалов укладываются вертикально слой за слоем или сшиваются вместе плавно в плоскости, образуя планарные гетеропереходы [19, 20]. Преимуществами ван-дер-ваальсовых гетероструктур являются относительно большая площадь контакта двух материалов и простота их формирования. Создаются такие гетероструктуры в основном с помощью механического отщепления слоев двумерных материалов от их объемной фазы и наложения отщепленных слоев друг на друга с использованием подходящих подложек. Основным недостатком такого способа формирования гетероструктур является невозможность масштабирования производства электронных устройств на их основе с хорошей воспроизводимостью результатов. Планарные гетероструктуры образуются из двумерных материалов, химический состав которых изменяется вдоль слоя. Преимуществом таких гетероструктур является возможность более тонкой настройки электронных свойств и параметров гетероперехода за счет более сильного перекрытия электронных облаков двух разных по составу материалов, а также за счет влияния морфологических особенностей. К недостаткам можно отнести меньшую площадь гетероперехода и технологическую сложность синтеза таких гетероструктур.

Для создания новых гетероструктур могут быть использованы вертикально уложенные ван-дер-ваальсовы гетероструктуры дихалькогенидов переходных металлов [19, 21–23]. Эти гетеропереходы имеют оптически активную запрещенную зону со связанными электронами и

дырками, локализованными в отдельных моно-слоях [24, 25], а их энергией и интенсивностью люминесценции можно управлять в зависимости от приложенного напряжения на затворе, интенсивности лазерного излучения и времени отжига [25, 26], а также можно управлять свойствами межслойного соединения, изменяя расстояние между слоями.

В этой работе, основываясь на расчетах теории функционала плотности (DFT), мы исследуем структурные и электронные свойства гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>. В отличие от известных публикаций в данной работе мы исследуем ширину запрещенной зоны в гетероструктуре MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> в зависимости от расстояния между слоями MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub>, чтобы найти способ разработки высококачественных однослойных и гетерослойных электронных устройств на основе дихалькогенидов переходных металлов с длительным сроком службы, таких как оптоэлектронные устройства и полевые транзисторы.

### Методика расчета

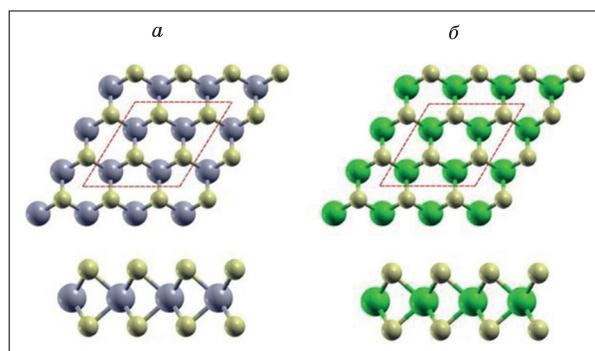
Все расчеты выполнены в рамках теории функционала плотности (DFT) с использованием метода псевдопотенциала на основе плоских волн, реализованного в пакете Quantum Espresso. При проведении расчетов по структурной оптимизации и вычисления зонных структур однослойных систем MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> и гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> обменные и корреляционные эффекты учитывались с помощью обобщенного градиентного приближения. Для учета взаимодействия между ионными ядрами и валентными электронами используется модель псевдопотенциалов Пердю–Берка–Эрнзергофа (PBE). В разложении волновой функции были учтены плоские волны с энергией до 60 Ry, которые обеспечивают хорошую сходимость полной энергии. Выборка электронных состояний в зоне Бриллюэна аппроксимируется с помощью наборов специальных k-точек, соответствующих сетке Монкхорста–Парка (12×12×1) для монослоя MoS<sub>2</sub> и монослоя WS<sub>2</sub>, а также сетки Монкхорста–Парка (9×9×1) для предлагаемой гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>. Чтобы минимизировать взаимодействия между двумя суперячейками данной гетероструктуры, суперячейки разделены вакуумным буферным пространством в 20 Å в направлении z, которое перпендикулярно плоскости гетерослоя. Равновесная структура определена минимизацией полной энергии относительно

параметров решетки, а внутренние параметры структуры оптимизированы с помощью сил Гельмана–Фейнмана. Процесс минимизации осуществлялся до тех пор, пока остаточные силы на атомах не станут ниже 0,03 эВ/А.

Расчеты проведены на вычислительных комплексах Академии наук РС(Я) и кафедры «Теоретическая физика» Северо-Восточного федерального университета, использован программный комплекс Quantum Espresso с открытым кодом.

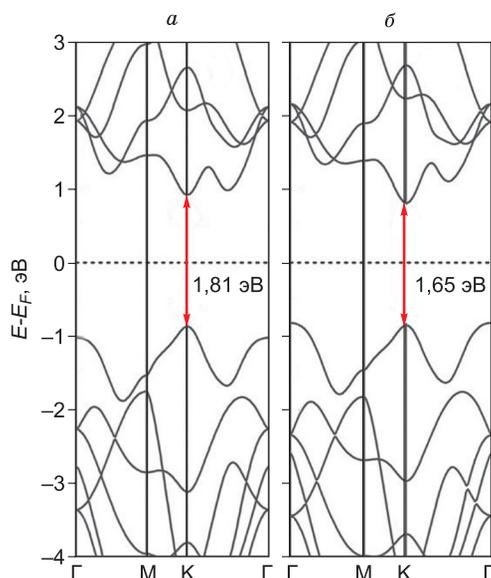
### Результаты и обсуждение

В дихалькогенидах переходных металлов MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> связи между атомами металла и халькогена преимущественно ковалентные. Атомы Mo (W) и S образуют двумерную гексагональную решетку. Дихалькогениды переходных металлов MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> состоят из слоев, каждый из которых представляет собой сэндвич из слоев атомов S, ковалентно связанных с промежуточным слоем атомов Mo (W) между ними. Такие структуры определяют сильную анизотропию вдоль и поперек слоев. Поскольку взаимодействие между слоями в рассматриваемых структурах слабое, свойства таких кристаллов в основном определяются свойствами решетки квазидвумерного сэндвича. На рис. 1 показаны оптимизированные кристаллические структуры однослойных MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub>. В этой работе мы рассматриваем структуры, состоящие из суперячеек размером 2×2, обозначенные красной линией. Кристаллическая структура монослоя MoS<sub>2</sub> (WS<sub>2</sub>) состоит из двух двумерных параллельных треугольных решеток атомов S, разделенных одной и той же решеткой из атомов Mo (W), смещенных на 1/3



**Рис. 1.** Оптимизированная кристаллическая структура: *a* – MoS<sub>2</sub>, *б* – WS<sub>2</sub>.

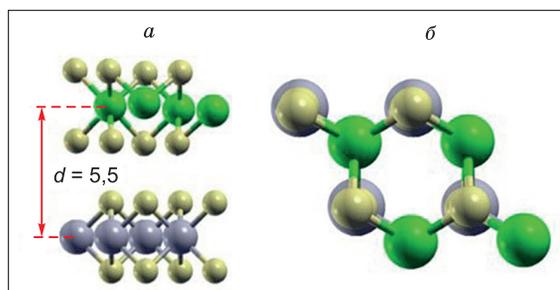
**Fig. 1.** Optimized geometric structures of (a) monolayer MoS<sub>2</sub>, (б) monolayer WS<sub>2</sub>.



**Рис. 2.** Зонные структуры монослоев MoS<sub>2</sub> (а), WS<sub>2</sub> (б).  
**Fig. 2.** Band structure of monolayers MoS<sub>2</sub> (a), WS<sub>2</sub> (b).

диагонали элементарной ячейки, с постоянной решетки  $a_{\text{MoS}_2} = 3,19 \text{ \AA}$  ( $a_{\text{WS}_2} = 3,20 \text{ \AA}$ ) [25]. Соответствующая зона Бриллюэна также гексагональна с двумя неэквивалентными точками **K** и **K'** (долинами). Соответствующие энергетические зоны показаны на рис. 2, они согласуются с предыдущими работами [24, 27, 28]. Оба монослоя являются полупроводниками с прямой запрещенной зоной с максимумом валентной зоны и минимумом зоны проводимости, расположенными в долинах **K** и **K'**. Ширины запрещенных зон составляют 1,81 и 1,65 эВ для MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> соответственно.

Далее рассмотрим гетероструктуру MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>, состоящую из двух монослоев, уложенных вертикально: монослоя MoS<sub>2</sub> и монослоя WS<sub>2</sub>. Для моделирования гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> мы построили суперячейку 2×2. В данной работе мы рассматриваем упаковку слоев типа AA, когда атомы Mo в нижнем слое находятся под атомами W в верхнем слое. Для MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> гетероструктуры используются примитивные ячейки MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> с незначительной деформацией, так как рассогласование решеток составляет всего 0,5 %. Расстояние между слоями, в которых находятся атомы Mo и W, варьировалось от  $d = 5,5$  до 10,5 Å. Оптимизированная кристаллическая структура суперячейки 2×2 гетерослоя MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>, когда расстояние между слоями  $d = 5,5 \text{ \AA}$ , показана на рис. 3. Расстояния между атомами Mo и S



**Рис. 3.** Оптимизированная геометрическая структура суперячейки 2×2 гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>: а – вид сбоку, б – вид сверху. Сиреневые, зеленые и желтые шары представляют собой атомы Mo, W и S соответственно.

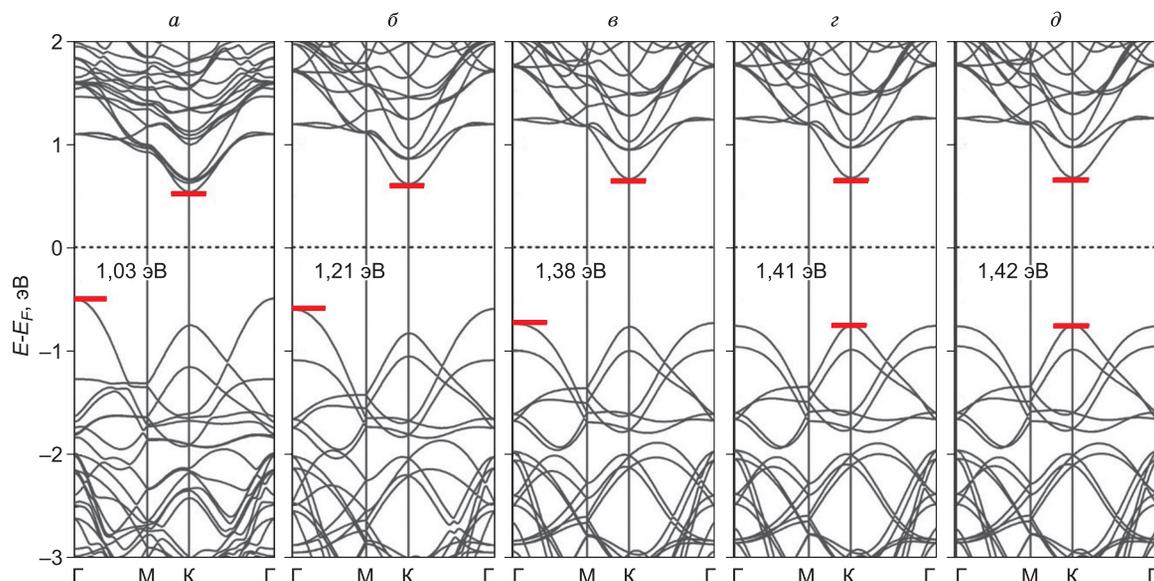
**Fig. 3.** Optimized geometric structure of the 2×2 supercell of the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure: (a) side view, (b) top view. The lilac, green, yellow balls represent the Mo, W and S atoms, respectively.

в нижнем слое варьируются от 2,417 до 2,420 Å, а расстояния между атомами W и S в верхнем слое изменяются от 2,375 до 2,496 Å. Кроме того, деформируется верхний слой, в котором расположены атомы W (см. рис. 3, а)

После определения структурных особенностей теперь представляем электронную зонную структуру MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>. Минимум зоны проводимости и максимум валентной зоны в точке **K** в основном состоят только из  $d_{z^2}$ -состояний атомов Mo или W.

Тогда как в минимуме зоны проводимости на  $\Gamma$ -**K** и в максимуме валентной зоны в  $\Gamma$  преобладают  $d_{z^2}$ -состояния атомов Mo или W и  $p$ -состояния атомов S [29].

Для детального изучения взаимосвязи между межслоевым расстоянием и щелью между валентной зоной и зоной проводимости были рассчитаны зонные структуры гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>, которые представлены на рис. 4. Интересно отметить, что при расстояниях между слоями  $d = 5,5, 6, 6,6$  и  $7,5 \text{ \AA}$  в гетероструктуре максимумы валентных зон находятся в точке  $\Gamma$  из-за взаимодействия между слоями (см. рис. 4, а, б). Это приводит к непрямому переходу от максимума валентной зоны в точке  $\Gamma$  к минимуму зоны проводимости в **K** точке. Он отличается от прямого перехода, расположенного в точке **K** однослойных дихалькогенидов переходных металлов. Максимумы валентной зоны в точке  $\Gamma$  становятся выше максимумов в точке **K** по мере уменьшения расстояния между слоями. Видно, что уменьшение расстояния между слоями эффективно изменяет значения максимума



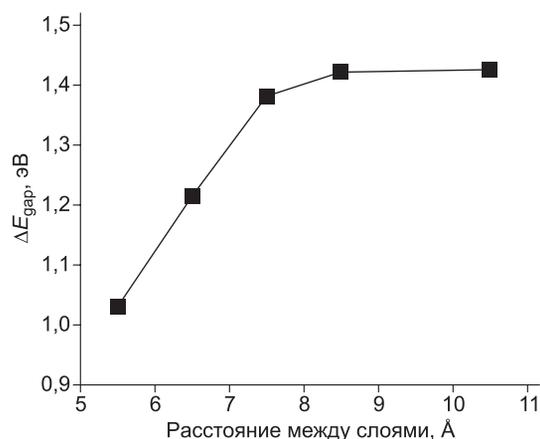
**Рис. 4.** Зонная структура гетероструктуры : *a* – зонная структура для MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>, когда расстояние между слоями равно  $d = 5,5 \text{ \AA}$ ; *б* –  $d = 6,5 \text{ \AA}$ ; *в* –  $d = 7,5 \text{ \AA}$ ; *г* –  $d = 8,5 \text{ \AA}$ ; *д* –  $d = 10,5 \text{ \AA}$ .

**Fig. 4.** Band structure of the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure: (*a*) – band structure for MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>, when the distance between the layers is  $d = 5,5 \text{ \AA}$ ; (*б*) –  $d = 6,5 \text{ \AA}$ ; (*в*) –  $d = 7,5 \text{ \AA}$ ; (*г*) –  $d = 8,5 \text{ \AA}$ ; (*д*) –  $d = 10,5 \text{ \AA}$ .

валентной зоны и минимума зоны проводимости в точках с высокой симметрией. Следует также отметить, что при увеличении расстояния между слоями от 5,5 до 7,5 Å щель между валентной зоной и зоной проводимости увеличивается (см. рис. 4, *a, б*). При расстояниях между слоями 8,5 и 10,5 Å система становится полупроводником с прямой запрещенной зоной, и она продолжает увеличиваться. На рис. 5 представлена зависимость величины щели от расстояния между слоями, содержащими атомы Mo и W.

### Заключение

В рамках метода теории функционала плотности мы изучили структурные и электронные свойства гетероструктуры MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>. Из расчетов зонной структуры мы пришли к выводу, что максимум валентной зоны (VBM) в точке Γ очень чувствителен к межслоевому взаимодействию в гетероструктурах, которое определяет расположение VBM в точке Γ или K. Обнаружено интересное явление, что с увеличением расстояния между слоями MoS<sub>2</sub> и WS<sub>2</sub> гетероструктура MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> превращается из полупроводника с непрямой запрещенной зоной в полупроводник с прямой запрещенной зоной. По всей видимости, это связано с тем, что с увеличением межслойного расстояния в гетероструктуре MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> взаимодействие между слоями ослабляется и уменьша-



**Рис. 5.** Зависимость величины щели от расстояния между слоями, содержащими атомы Mo и W в гетероструктуре MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub>.

**Fig. 5.** Dependence of the gap on the distance between layers containing Mo and W atoms in the MoS<sub>2</sub>/WS<sub>2</sub> heterostructure.

ется перенос заряда. При этом оптически активные состояния максимальной валентной зоны и минимальной зоны проводимости локализованы на противоположных монослоях, и, таким образом, электронно-дырочные пары с наименьшей энергией пространственно разделяются.

Полученные результаты подчеркивают важность межслойной связи в настройке светового излучения дихалькогенидов переходных металлов и предлагают общий способ подготовки тан-

демных структур дихалькогенидов переходных металлов большой площади для фундаментальных исследований, а также для электронных и фотоэлектрических приложений. В дальнейшем планируется исследовать оптические свойства гетероструктур на основе ДПМ для более детального изучения их применения для оптоэлектроники.

### Список литературы / References

- Sundaram R. S., Engel M., Lombardo A., Krupke R., Ferrari A. C., Avouris P., Steiner M. Electroluminescence in single layer MoS<sub>2</sub>. *Nano letters*. 2013; 13(4):1416–1421. DOI: 10.1021/nl400516a.
- Radisavljevic B., Kis A. Reply to ‘Measurement of mobility in dual-gated MoS<sub>2</sub> transistors’. *Nature nanotechnology*. 2013;8(3):147–148. DOI:10.1038/nnano.2013.30.
- Perkins F.K., Friedman A.L., Cobas E., Campbell P.M., Jernigan G.G., Jonker B.T. Chemical vapor sensing with monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano letters*. 2013;13(2):668–673. <https://doi.org/10.1021/nl3043079>.
- Yin Z. Y., Li H., Jiang L., Shi Y. M., Sun Y. H., Lu G., Zhang Q., Chen X. D., Zhang H. Single-Layer MoS<sub>2</sub> Phototransistors. *ACS nano*. 2012;6(1):74–80. <https://doi.org/10.1021/nn2024557>.
- Chhowalla M. et al. The chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenide nanosheets. *Nature chemistry*. 2013;5(4):263–275. DOI: 10.1038/nchem.1589.
- Li H., Wu J., Yin Z., Zhang H. Single-layer MoS<sub>2</sub>-based nanoprobe for homogeneous detection of biomolecules. *Accounts of chemical research*. 2014;47(4):1067–1075. DOI: 10.1021/ja4019572
- Huang X., Tan C., Yin Z., Zhang Z. Anniversary article: hybrid nanostructures based on two-dimensional nanomaterials. *Advanced Materials*. 2014; 26(14):2185–2204. DOI: 10.1002/sml.201002009.
- Jariwala D. et al. Emerging device applications for semiconducting two-dimensional transition metal dichalcogenides. *ACS Nano*. 2014;8(2):1102–1120. DOI: 10.1021/nn500064s.
- Britnell L. et al. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films. *Science*. 2013; 340(6138):1311–1314. DOI:10.1126/science.1235547.
- Yu W. J. et al. Highly efficient gate-tunable photocurrent generation in vertical heterostructures of layered materials. *Nature nanotechnology*. 2013;8(12):952–958. DOI: 10.1038/nnano.2013.219
- Lopez-Sanchez O. et al. Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nature nanotechnology*. 2013;8(7):497–501. DOI:10.1038/nnano.2013.100.
- Splendiani A. et al. Emerging photoluminescence in monolayer MoS<sub>2</sub>. *Nano letters*. 2010;10(4):1271–1275. DOI:10.1021/nl903868w.
- Mak K. F. et al. Atomically thin MoS<sub>2</sub>: a new direct-gap semiconductor. *Physical review letters*. 2010; 105(13):136805. DOI:10.1103/PhysRevLett.105.136805.
- Xiao D. et al. Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS<sub>2</sub> and other group-VI dichalcogenides. *Physical review letters*. 2012;108(19):196802. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.196802.
- Gutierrez H. et al. Extraordinary room-temperature photoluminescence in WS<sub>2</sub> monolayers. *arXiv.org*. 2012: 1208.1325. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1208.1325>
- Shih C.-K. Coherently strained in-plane atomic layer heterojunctions. *NPG Asia Materials*. 2015; 7 (12): e231. DOI:10.1038/am.2015.127.
- Huang C. et al. Lateral heterojunctions within monolayer MoSe<sub>2</sub>-WSe<sub>2</sub> semiconductors. *Nature materials*. 2014; 13(12):1096–1101. DOI:10.1038/nmat4064.
- Novoselov K. S. et al. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016;353(6298):aac9439. DOI: 10.1126/science.aac9439.
- Логинов А. Б. и др. Формирование наноструктурированных пленок MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub> и гетероструктур на их основе. *Журнал технической физики*. 2021; 91(10):1509. DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.10.51364.102-21>.
- Loginov A.B. et al. Formation of Nanostructured Films Based on MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub> and their heterostructures. *Journal of Applied Physics*. 2021;91(10):1509. (In Rus.) DOI: <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.10.51364.102-21>.
- Xie S. et al. Coherent, atomically thin transition-metal dichalcogenide superlattices with engineered strain. *Science*. 2018;359(6380):1131–1136. DOI: 10.1126/science.aac9439.
- Li D. et al. Multimodal nonlinear optical imaging of MoS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub>-based van der Waals heterostructures. *ACS Nano*. 2016;10:3766–3775. DOI:10.1021/acsnano.6b00371.
- Huo N. et al. Novel optical and electrical transport properties in atomically thin WSe<sub>2</sub>/MoS<sub>2</sub> p-n heterostructures. *Adv. Electron. Mater.* 2015;1(5):1400066. DOI: 10.1002/aelm.201400066.
- Hong T. et al. Anisotropic photocurrent response at black phosphorus-MoS<sub>2</sub> p-n heterojunctions. *Nanoscale*. 2015;7(44):18537–18541. DOI: <http://doi.org/10.1039/C5NR03400K>.
- Kosmider K., Fernández-Rossier J. Electronic properties of the MoS<sub>2</sub>-WS<sub>2</sub> heterojunction. *Phys. Rev.* 2013;B 87:075451. DOI:10.1103/PhysRevB.87.075451.
- Rivera P. et al. Observation of Long-Lived Interlayer Excitons in Monolayer MoSe<sub>2</sub>-WSe<sub>2</sub> Heterostructures. *Nat. Commun.* 2015; 6:6242. DOI:10.1038/ncomms7242.
- Tongay S. et al. Tuning interlayer coupling in large-area heterostructures with CVD-grown MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> monolayers. *Nano Lett.* 2014;14:3185–3190. DOI: 10.1021/nl500515q.
- Jiang H. Electronic band structures of molybdenum and tungsten dichalcogenides by the GW approach. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2012; 116(14):7664–7671. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp300079d>.

28. Ramasubramaniam A. Large excitonic effects in monolayers of molybdenum and tungsten dichalcogenides. *Physical Review B*. 2012;86(11):115409. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.115409>.

29. Wang F. et al. Tuning coupling behavior of stacked heterostructures based on MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub>. *Scientific reports*. 2017; 7(1):1–10. DOI: 10.1038/srep44712.

#### *Об авторах*

<sup>1,2</sup>ГРИГОРЬЕВ Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, зам. ректора, зав. кафедрой «Теоретическая физика», в.н.с., Author ID:14623701400, Researcher ID: K-8270-2016, <https://orcid.org/0000-0001-8001-9964>, e-mail: grigyum@yandex.ru

<sup>1</sup>ШАРИН Егор Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Author ID: 56291744200, Researcher ID: H-1093-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6346-3497>, e-mail: ep.sharin@s-vfu.ru

<sup>1</sup>МУКСУНОВ Никита Янович, студент, Физико-технический институт, e-mail: muksunov97@mail.ru

#### *Аффилиация*

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677891, Якутск, ул. Белинского, 58, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Академия наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, Российская Федерация.

#### *About the authors*

<sup>1,2</sup>GRIGOR'EV, Yuri Mikhailovich, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Deputy Rector, Head of the Theoretical Physics Department, Leading Researcher, Author ID: 14623701400, Researcher ID: K-8270-2016, <https://orcid.org/0000-0001-8001-9964>, e-mail: grigyum@yandex.ru

<sup>1</sup>SHARIN, Egor Petrovich, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Author ID: 56291744200, Researcher ID: H-1093-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6346-3497> e-mail: ep.sharin@s-vfu.ru

<sup>1</sup>MUKSUNOV, Nikita Yanovich, student, Institute of Physics and Technology, e-mail: muksunov97@mail.ru

#### *Affiliation*

<sup>1</sup>M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo st., Yakutsk 677891, Russian Federation;

<sup>2</sup>Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 41 Lenina pr., Yakutsk 677007, Russian Federation

*Поступила в редакцию / Submitted 27.06.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 20.07.2022*

*Принята к публикации / Accepted 29.07.2022*

---

## ДАТЫ, СОБЫТИЯ

---

### *«Геолог, учитель, директор» (к 90-летию со дня рождения Б. В. Олейникова)*

14 октября 2022 г. исполнилось бы 90 лет со дня рождения Бориса Васильевича Олейникова (14.10.1932–15.07.2000), талантливого геолога, организатора науки, доктора геолого-минералогических наук, профессора, действительного члена АН РС (Я), заслуженного деятеля науки Российской Федерации и Республики Саха (Якутия), с 1987 по 2000 г. возглавлявшего Институт геологии ЯФ СО РАН (ныне Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН).

Б.В. Олейников родился в г. Анжеро-Судженск Кемеровской области. По окончании в 1958 г. Томского политехнического института Б.В. Олейников был направлен в Енисейскую экспедицию СНИИГГИМСа, и с этого времени вся его жизнь была связана с геологией Сибири. В 1963 г. Б.В. Олейников защитил кандидатскую диссертацию «Контактные образования и их минералогия, связанные с трапповыми интрузиями» в Томском политехническом институте. В 1966 г. он был приглашен в Институт геологии ЯФ СО АН СССР и в 1968 г. возглавил лабораторию трапповой формации. В 1971 г. Б.В. Олейников был назначен заведующим геологическим музеем и оставался им до 1995 г. С 1973 по 1987 г. работал заместителем директора Института геологии, а с 1987 по 2000 г. – его директором.

Б.В. Олейников внес значительный вклад в решение одной из фундаментальных проблем геологии: эволюции базальтовых магм древних платформ в пространстве и времени. Им предложена модель пространственно-временной эволюции траппового магматизма; освещено поведение широкого круга элементов в разновозрастных интрузивных базитах при эволюции формирующих их расплавов и проведена геохимическая типизация базитов древних платформ в зависимости от их возраста и геодинамических обстановок; рассмотрена петролого-геохимическая сущность процессов докамерной эволюции базальтовых магм; оценены рудогенерирующие возможности различных этапов эволюции магмы платформенных базитов. В 1984 г. в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск) им была



защита докторская диссертация «Геохимия и рудогенез интрузивных траппов Сибирской платформы». Подтверждением предположений о роли флюидно-магматического взаимодействия базальтовых магм в восстановительных условиях стало нахождение в базитах минеральных видов самородных металлов: Pb, Sb, Cd, Zn, Sn и Al, а также их различных интерметаллических соединений. Б.В. Олейникову с учениками А.В. Округиным и О.Б. Олейниковым, наряду с московскими коллегами, принадлежит мировой приоритет в обосновании способности химических элементов с высоким сродством к кислороду находиться в природе в восстановленном состоянии.

Обладея широким кругозором, Б.В. Олейников как руководитель института инициировал многие научные исследования: чароитов, эолового золота, платины Якутии. Б.В. Олейников

## ДАТЫ, СОБЫТИЯ

был и главным инициатором геоэкологических исследований в бассейне р. Вилюй. Позднее, когда это направление приняло биологический и социальный уклон, Борис Васильевич постоянно напоминал, что первоосновой экологической аномальности любой экосистемы является состояние геологической среды во всем многообразии форм ее проявления. Как директор Борис Васильевич приложил много сил, чтобы создать в институте высококласную для своего времени аналитическую базу, позволяющую проводить исследования вывести на мировой уровень, и считал, что без полевых работ геологии и геологов быть не может. Б.В. Олейников был не только талантливым ученым, но и страстным пропагандистом геологических знаний. Будучи прекрасным лектором, он одинаково увлеченно знакомил с уникальной природой Якутии как школьников, так и маститых гостей Якутска, посещавших геологический музей. Благодаря его вниманию и поддержке, музей был одним из лучших просветительских центров Якутии.

Более 250 научных трудов, открытие трех новых минералов, утвержденных Комиссией по новым минералам Международной минералогической ассоциации (никельгексагидрит, самородные кадмий и алюминий), авторство в двух Тектонических картах – таково его научное наследие. При его участии описаны два новых метеорита, найденных на территории Якутии: Долгучан и уникальный высоконикелистый железный метеорит Онелло. Олейников Б.В. возглавлял направление по изучению различных проблем интрузивного магматизма Сибирской платформы, создав в г. Якутск научную школу по изучению глубинной эволюции базальтовых магм континентальных зон земной коры.

Абсолютная преданность науке, институту, принципиальность, редчайшая работоспособность, широта кругозора и исключительная скромность снискали ему уважение коллег, учеников и всех, кому довелось с ним общаться. Для всех нас Борис Васильевич был и останется примером служения делу.

*О.В. Королева, А.Г. Копылова, М.Д. Томшин, А.В. Округин*

Редактор *О.В. Уарова*  
Корректурa *З.А. Корнилова*  
Компьютерная верстка *З.И. Евсеев*  
Обложка *Б.В. Яковлев*

---

Дата выхода в свет 14.10.2022. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая  
Усл. п.л. 16,28. Тираж 100 экз. Заказ № 520. Цена свободная.

---

**Адрес редакции:**

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, <http://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](mailto: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](mailto:izd_sfera@mail.ru)