

# ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2023, Том 28, № 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:*

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

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

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

# ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2023, Vol. 28, No. 3

Founded in 1996  
4 issues per year

## Founders:

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

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

*Editor-in-Chief*

**L.N. Vladimirov**

Corresponding Member, RAS

*Deputy Editors-in-Chief:*

**V.Yu. Fridovsky**

Corresponding Member, RAS

**Yu.M. Grigoriev**

Dr. Sci. (Phys.-Math.)

*Executive Editor*

**Z.A. Kornilova**

*Editorial Office Address:*

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

<https://resar.elpub.ru>

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

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2023  
© Federal Research Centre “The Yakut  
Scientific Centre of SB RAS”, 2023  
© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2023  
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2023

#### Редакционный совет:

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

#### Редакционная коллегия:

##### Науки о Земле

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

##### Биологические науки

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

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 и химические технологии

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

#### Editorial Council:

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

#### Editorial Board:

##### Earth Sciences

N.A. Goryachev, *Academician, RAS, Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan, Russia*  
M.N. Grigoriev, *Dr. Sci. (Geogr.), Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*  
M.N. Zhelezniak, *Corresponding Member, RAS, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*  
I.I. Kolodeznikov, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., AS RS(Ya), Yakutsk, Russia*  
R.V. Kutugin, *Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*  
A.I. Matveev, *Dr. Sci. (Eng.), Chersky Inst. of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*  
N.P. Pokhilenko, *Academician, RAS, V.S. Sobolev Inst. of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*  
V.E. Romanovsky, *Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, Fairbanks, USA*  
A.V. Tolstov, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*  
V.Yu. Fridovsky, *Corresponding Member, RAS, Prof., Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*  
V.V. Shepelev, *Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Melnikov Permafrost Inst. SB RAS, Yakutsk, Russia*  
H.-V. Hubberten, *Dr., Prof., Alfred Wegener Inst. for Polar and Marine Research, Potsdam Research Unit, Potsdam, Germany*  
V.L. Yakovlev, *Corresponding Member, RAS, Inst. of Mining UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

##### Biological Sciences

George Archibald, *Dr., International Crane Foundation, Baraboo, USA*  
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 and Chemical Technologies

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. Okhlopkova, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia*  
M.H. Salakhov, *Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia*

## СОДЕРЖАНИЕ

### Науки о Земле

#### *Геология и полезные ископаемые*

- Макошин В.И., Кутыгин Р.В.* О брахиоподах нижней части перми разреза Хоспохчон, Южное Верхоянье ..... 367
- Томишин М.Д., Гоголева С.С.* Траппы бассейна реки Моркока и их морфология как реакция на возможное присутствие кимберлитов ..... 375
- Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Глянцева Ю.С., Лифшиц С.Х.* Геохимические особенности органического вещества нижнемеловых отложений ожогиной свиты (Индигино-Зырянский прогиб)..... 384

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

- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Балута В.И.* Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии ..... 398
- Стручкова Г.П., Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Тихонова С.А., Шейн Н.С., Капитонова Т.А.* Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных ..... 415

### Биологические науки

#### *Экология*

- Василевская Н.В., Сикалюк А.И.* Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark. .... 425
- Ренёв Н.О., Мальчевский В.А., Субботин А.М., Петров С.А.* Рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro* под влиянием метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород ..... 435
- Колосова О.Н., Кершенгольц Б.М., Соловьева Н.А.* Сезонные изменения профиля жирных кислот плазмы крови как механизм адаптации человека к экстремальным условиям Севера (На англ. яз.) ..... 443

#### *Биологические ресурсы*

- Самсонова И.В., Исаев А.П.* Недревесные пищевые ресурсы леса как важная составляющая лесоресурсного потенциала Республики Саха (Якутия) ..... 451
- Солоха А.В., Блохин Ю.Ю.* Сведения по охотничьему использованию ресурсов водоплавающих птиц в Якутии ..... 464
- Габышева Л. П.* Послепожарное лесовозобновление сосняков, прилегающих к тукулам Лено-Вилуйского междуречья..... 477

### Материаловедение и химические технологии

- Прокопьев А.Р., Неустроев Е.П.* Наноструктурированные углеродные пленки, полученные методом осаждения в плазме  $\text{CH}_4$  с последующей термообработкой: структурные особенности, их влияние на электрические и оптоэлектронные свойства..... 487

*Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С.* Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов ..... 495

Память

Чугунов Афанасий Васильевич ..... 507  
Григорьев Юрий Михайлович ..... 508

## CONTENTS

### Earth sciences

#### *Geology and mineral resources*

- Makoshin V.I., Kutugin R.V.* Brachiopods from the Lower Permian of the Khospokhchon Section in the Southern Verkhoyanie (Northeast Russia) ..... 367
- Tomshin M.D., Gogoleva S.S.* Traps of the Morkoka River Basin and their morphology as response to the possible presence of kimberlites ..... 375
- Zueva I.N., Chalaya O.N., Kashirtsev V.A., Glyaznetsova Yu.S., Lifshits S.Kh.* Geochemical features of organic matter in the Lower Cretaceous deposits of the Ozhoginskaya Suite (Indigiro-Zyryansky basin)..... 384

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

- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N., Baluta V.I.* Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia ..... 398
- Struchkova G.P., Krupnova T.G., Rakova O.V., Tikhonova S.A., Shein N.S., Kapitonova T.A.* Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data..... 415

### Biological sciences

#### *Ecology*

- Vasilevskaya N.V., Sikalyuk A.I.* Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of *Sorbus gorodkovii* Pojark. .... 425
- Renev N.O., Malchevskiy V.A., Subbotin V.A., Petrov S.A.* Growth and development of potato microplants *in vitro* under the influence of bacterial metabolites isolated from permafrost..... 435
- Kolosova O.N., Kershengolts B.M., Solovieva N.A.* Seasonal changes in the profile of blood plasma fatty acids as a mechanism of human adaptation to the extreme conditions of the North ..... 443

#### *Biological resources*

- Samsonova I.V., Isaev A.P.* Non-timber forest products as essential elements of the forest resource in the Republic of Sakha (Yakutia)..... 451
- Solokha A.V., Blokhin Yu. Yu.* Data on hunting use of waterfowl resources in Yakutia ..... 464
- Gabyshva L.P.* Post-fire reforestation of pine forests adjacent to the tukulans of the Lena-Vilyui interfluve ..... 477

### Materials science and chemical technologies

- Prokopev A.R., Neustroev E.P.* Nanostructured carbon films obtained by CH<sub>4</sub> plasma deposition and annealing at high temperature: structural features and their effects on electrical and optoelectronic properties ..... 487

*Solovev T.M., Isakova T.A., Pavlova V.V., Botvin G.V., Chirikov A.A., Petrov V.V., Petukhova E.S.* Mineral composition, physical and mechanical properties of mammoth tusks of different grades..... 495

Memory

Chugunov Afanasii Vasil'evich ..... 507  
Grigor'ev Yuri Mikhailovich ..... 508

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

### Геология, полезные ископаемые

УДК 564.82 (551.736.1)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-367-374>

Оригинальная статья

### О брахиоподах нижней части перми разреза Хоспохчон, Южное Верхоянье

В. И. Макошин✉, Р. В. Кутыгин

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

✉makoshin\_89@mail.ru; rkutygin@mail.ru

#### Аннотация

В пределах Северного и Западного Верхоянья наблюдается общее биостратиграфическое деление нижней части пермских отложений на брахиоподовые зоны *Jakutoproductus verkhoianicus*, *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi* и *Jakutoproductus rugosus*. По литературным источникам в Южном Верхоянье ранее уверенно устанавливался лишь комплекс нижнего биостратиграфического подразделения (зона *verkhoianicus*). Представители двух средних зон не отмечались, и лишь в южной части региона (басс. р. Юдома) указывалось присутствие вида-индекса зоны *rugosus*. Монографическое изучение коллекции брахиопод из верхнеольчанской подсвиты стратотипа ольчанской свиты (разрез Хоспохчон) позволило переосмыслить биостратиграфическое деление асельско-сакмарских отложений Южного Верхоянья. Брахиоподы верхнеольчанской подсвиты руч. Хоспохчон (басс. р. Менкюле) относятся к трем последовательным биостратиграфическим зонам: *verkhoianicus*, *insignis* и *terechovi*. Принимая во внимание сведения о присутствии в Южном Верхоянье представителей вида *Jakutoproductus rugosus* Ganelin, можно констатировать наличие в этом регионе всех четырех биостратиграфических зон асельско-сакмарских отложений Верхоянья, из которых три верхние (*insignis*, *terechovi* и *rugosus*) позволяют проводить прямую корреляцию с огонерским региональным горизонтом Омолонского массива по общим зональным видам. Новые результаты свидетельствуют о необходимости проведения комплексного изучения опорных разрезов ольчанской свиты с целью обоснования каменноугольно-пермской и асельско-сакмарской границ в Верхоянье с помощью био- и хемотратиграфических методов.

**Ключевые слова:** биостратиграфия, пермская система, ольчанская свита, хорокытский горизонт, эчийский горизонт, брахиоподы, *Jakutoproductus*, Верхоянье

**Финансирование.** Монографическое изучение южноверхоянских брахиопод выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10028, <https://rscf.ru/project/22-77-10028/>; биостратиграфическое деление нижней части перми Северного и Западного Верхоянья проводилось по госзаданию ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0002).

**Для цитирования:** Макошин В.И., Кутыгин Р.В. О брахиоподах нижней части перми разреза Хоспохчон, Южное Верхоянье. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):367–374. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-367-374>

Original article

### Brachiopods from the Lower Permian of the Khospokhchon Section in the Southern Verkhoyanie (Northeast Russia)

V. I. Makoshin✉, R. V. Kutugin

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

✉makoshin\_89@mail.ru; rkutygin@mail.ru

#### Abstract

A biostratigraphic division of the Lower Permian into brachiopod zones of *Jakutoproductus verkhoianicus*, *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi*, and *Jakutoproductus rugosus* is observed within the Northern and

Western Verkhoyanie. According to the literature, only the complex of the lower biostratigraphic unit (*Verkhoyanicus* Zone) was previously confidently established in the Southern Verkhoyanie. Meanwhile, representatives of the two middle zones were not observed, and the presence of the index species of the *Rugosus* zone was only indicated in the southern part of the region (Yudoma River Basin). A monographic study of the brachiopod collection from the Upper Olchan Subformation of the stratotype of the Olchan Formation (Khosposhchon section) allowed us to rethink the biostratigraphic division of the Asselian-Sakmarian deposits in the Southern Verkhoyanie. The brachiopods of the Upper Olchan Subformation of the Khosposhchon Creek (Menkule River Basin) belong to three successive biostratigraphic zones: *Verkhoyanicus*, *Insignis*, and *Terechovi*. Information on the presence of representatives of the species *Jakutoproductus rugosus* Ganelin in the Southern Verkhoyanie leads to the assumption that all four biostratigraphic zones of the Asselian-Sakmarian deposits of Verkhoyanie are present in this region. Three upper zones (*Insignis*, *Terechovi*, and *Rugosus*) demonstrated a direct correlation with the Ogonerian Regional Stage of the Omolon massif by their common zonal species. The new results indicate the need for a comprehensive study of the key sections of the Olchan Formation to substantiate the Carboniferous-Permian and Asselian-Sakmarian boundaries in Verkhoyanie using both biostratigraphic and chemostratigraphic methods.

**Keywords:** biostratigraphy, Permian, Olchan Formation, Khorokytian Regional Stage, Echian Regional Stage, brachiopods, *Jakutoproductus*, Verkhoyanie

**Funding.** The monographic study of the brachiopods of the Southern Verkhoyanie was conducted at the expense of the grant of the Russian Scientific Foundation (number 22-77-10028, <https://rscf.ru/en/project/22-77-10028/>); biostratigraphic division of the Lower Permian of the Northern and Western Verkhoyanie was conducted according to the state assignment for DPMGI SB RAS (number 0381-2019-0002).

**For citation:** Makoshin V.I., Kutygin R.V. Brachiopods from the Lower Permian of the Khosposhchon Section in the Southern Verkhoyanie (Northeast Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):367–374. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-367-374>

## Введение

Разрез по руч. Хоспохчон (басс. р. Менкюле) считается ключевым для стратиграфии среднего–верхнего карбона и нижней перми Южного Верхоянья [1–3] и является стратотипическим для ряда свит Томпонской структурно-фациальной зоны. Поскольку разрез обладает крайне сложным геологическим строением [4], материалы по нему требуют переосмысления, особенно касающиеся каменноугольного интервала.

В конце 50-х гг. прошлого века Б.С. Абрамов в пограничных каменноугольно-пермских отложениях хребта Сетте-Дабан Южного Верхоянья выделял кукканскую свиту, залегающую на экачанской свите среднего–верхнего карбона, однако оба стратона тогда относились к нижней перми [5]. Немногом позднее Б.С. Абрамов разделил кукканскую свиту на самостоятельные суркечанскую и джуптагинскую свиты [1], первая из которых была отнесена к верхнему карбону, а вторая – к нижней части перми. В 1978 г. Б.С. Абрамовым, А.И. Горбуновым и Л.Н. Ковалевым джуптагинская свита была разделена на две новые свиты – ольчанскую и побединскую [3].

Непосредственно к пограничным каменноугольно-пермским отложениям Сетте-Дабана относится ольчанская свита [6], которая в стратотипическом разрезе на руч. Хоспохчон разделена на три подсвиты общей мощностью 1033 м [3].

Нижнеольчанская подсвита (160 м) сложена алевролитами и аргиллитами с редкими пластами песчаников, в верхней части присутствует слой (7,4 м) крупнозернистых песчаников. Охарактеризована редкими брахиоподами *Neospirifer* sp. и *Linoproductus* sp. [3].

Среднеольчанская подсвита (339 м) в разрезе Хоспохчон представлена переслаивающимися алевролитами и аргиллитами. По материалам Б.С. Абрамова и А.Д. Григорьевой [3], в нижней части подсвиты здесь встречены *Jakutoproductus tajanae* Abramov et Grigorjeva и *J. cf. protoverkhoyanicus* Kashirtsev, в средней – *Tornquistia* sp., *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* Kashirtsev, а в верхней – *Jakutoproductus cf. crassus* Kashirtsev, *Jakutoproductus protoverkhoyanicus* Kashirtsev, *J. sp.*, *Canocrinella* sp. За исключением раннепермского *Jakutoproductus cf. crassus* Kashirtsev, приведенный комплекс характеризует кыгылтасский горизонт верхнего карбона.

В строении верхнеольчанской подсвиты (534 м) преобладают разнотипные алевролиты с маломощными прослоями и линзами окремненных пород. Подсвита отличается наибольшим разнообразием и обилием брахиопод. Согласно Б.С. Абрамову и А.Д. Григорьевой [3], для верхнеольчанской подсвиты характерны *Orbiculoidea?* sp., *Tornquistia* sp., *Quinquenella planconvexa* Abramov et Grigorjeva, *Jakutoproductus crassus*

Kashirtsev, *J. verkhojanicus* (Fredericks), *J. ex gr. verkhojanicus* (Fredericks), *J. parenensis* Zavodowsky, *J. cf. parenensis* Zavodowsky, *Anidanthus halinae* Kotlyar, *A. boikowi* (Stepanov), *Waagenoconcha irginaeformis* Stepanov, *Canocrinella* aff. *alazeica* Zavodowsky, *Rhynoleichus delenjaensis* Abramov et Grigorjeva, *Rhynchopora* cf. *lobjaensis* Tolmatschew, *Neospirifer chospochtchonicus* Abramov et Grigorjeva, *Crassispirifer jakuschewae* Abramov et Grigorjeva, *Spirelytha miloradovichi* Archbold et Thomas. Большинство приведенных таксонов характерно для хорокытского горизонта нижней перми.

В вышезалегающей побединской свите доминирующее значение приобретают двустворчатые моллюски, среди которых появляются первые представители иноцерамоподобных рода *Aphanaiia*. В разрезе побединской свиты по руч. Хоспохчон [3] встречены брахиоподы *Megousia* sp., *Canocrinella* aff. *grandis* Solomina, *Canocrinella* sp., *Buxtonia?* sp., *Linoproductus* sp., *Uraloproductus?* sp. Как видно, для этой свиты характерно полное обновление комплекса брахиопод, сравнительно с подстилающей верхнеольчанской подсвитой.

Ранее нами были изучены коллекции брахиопод из опорных разрезов нижней части перми Западного и Северного Верхоянья [7–10]. Установлено, что почти повсеместно для брахиопод характерна отчетливая вертикальная последовательность биостратиграфических комплексов, отнесенных к зонам *Jakutoproductus verkhojanicus*, *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi* и *Jakutoproductus rugosus*. При этом неоднозначные сведения касаются Южного Верхоянья. Бесспорным фактом здесь является наличие зоны *Jakutoproductus verkhojanicus*. Так, для верхнеольчанской подсвиты басс. р. Менкюле (в том числе и на руч. Хоспохчон) характерны виды *Jakutoproductus verkhojanicus* (Fredericks) и *J. crassus* Kashirtsev [3]. Однако широко распространенные в Северном и Западном Верхоянье комплексы зон *insignis* и *terechovi* в Южном Верхоянье известны не были. Последнее могло объясняться самыми разными причинами, например, слабой изученностью региона или возможным сокращением ареала верхоянского сообщества брахиопод в сакмарском веке. Вид *Jakutoproductus rugosus* Ganelin, характеризующий одноименную биостратиграфическую зону, в Южном Верхоянье ранее был известен лишь в

ханаличанской свите басс. р. Юдома [11, 12]. Из вышеизложенного складывается впечатление, что биостратиграфическое деление нижней части перми по брахиоподам рода *Jakutoproductus*, успешно проводившееся ранее в различных районах Северного и Западного Верхоянья [8], для южных разрезов неприменимо. Однако первые результаты нашего изучения ассельско-сакмарских брахиопод Южного Верхоянья свидетельствуют об обратном.

### Материал

Изученная коллекция каменноугольно-пермских брахиопод, насчитывающая более 60 экземпляров, была собрана в 1985 г. Н.Е. Давыдовым и Н.Н. Лебедевой в стратотипе ольчанской свиты на руч. Хоспохчон (басс. р. Менкюле) (рис. 1). К сожалению, у нас отсутствует точная информация о положении в разрезе конкретных образцов, но описание обнажений проводилось по мере изучения разреза снизу вверх. Судя по таксономическому составу, все рассмотренные в статье образцы брахиопод из обнажений 14, 15 и 16 характерны для верхней подсвиты ольчанской свиты в понимании Б.С. Абрамова [3].

### Результаты и обсуждение

Коллекция брахиопод из обнажения 14 (обр. 14-8/85) содержит десятки экземпляров хорошей сохранности, среди которых определены *Jakutoproductus verkhojanicus* (Fredericks) (рис. 2, а–е), *J. crassus* Kashirtsev (рис. 2, ж, з), *Anidanthus* sp. и *Tornquistia* sp. Наибольший интерес представляет вид *Jakutoproductus verkhojanicus* (Fredericks), являющийся видом-индексом одноименной зоны хорокытского горизонта Верхоянья [8], залегающей в основании пермской системы [13] и прослеживающейся по всему региону. Широкое распространение вида *Jakutoproductus verkhojanicus* (Fredericks) и сопутствующих ему элементов в Верхоянском бассейне происходило в начале обширной и продолжительной эчийской трансгрессии после крупного биотического кризиса позднекаменноугольных морских беспозвоночных региона [14], произошедшего на фоне кыгылтаской регрессии [15].

Из обнажения 15 (обр. 15-1/85 и 15-2/85), представляющего более высокие слои верхнеольчанской подсвиты, установлены единичные брахиоподы плохой сохранности, определенные как *Jakutoproductus* sp., *Rhynchopora* sp. и *Torn-*

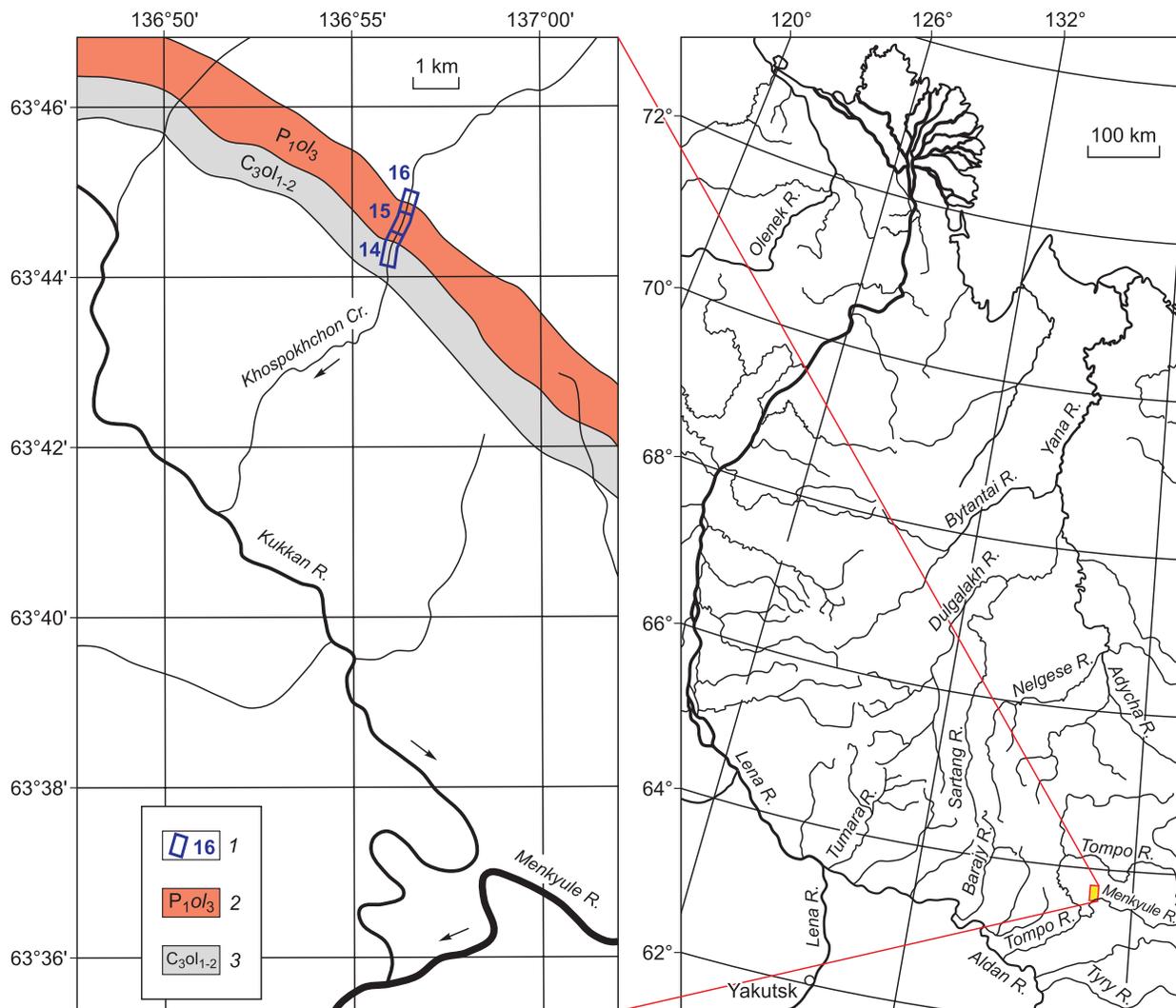


Рис. 1. Местоположение обнажений верхнеольчанской подсвиты руч. Хоспохчон: 1 – обнажения, 2 – верхняя подсвита ольчанской свиты, 3 – нижняя и средняя подсвиты ольчанской свиты

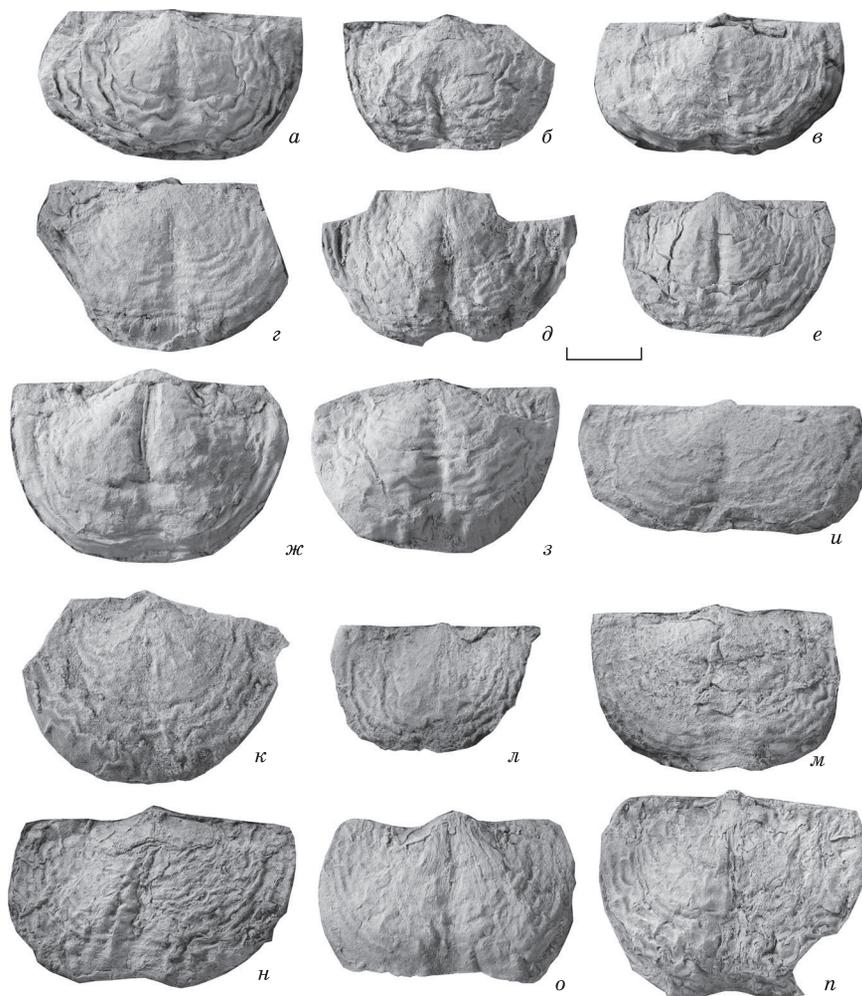
Fig. 1. Outcrop location of the Upper Olchan Subformation of the Khospokhchon Creek: 1 – outcrops, 2 – Upper Olchan Subformation, 3 – Lower and Middle Olchan Subformations

*quistia* sp., вероятно, относящиеся к верхней части зоны *Jakutoproductus verkhoianicus*.

Среди брахиопод из нижних слоев обнажения 16 (обр. 16-1/85 и 16-2/85) присутствуют редкие экземпляры *Jakutoproductus* sp. и *Anidanthus* sp. Выше из этого же обнажения определены единичные брахиоподы *Jakutoproductus* cf. *insignis* Abramov et Grigorjeva (рис. 2, u) и *Anidanthus* sp. (обр. 16-3/85). Вид *Jakutoproductus insignis* Abramov et Grigorjeva имеет большое значение для стратиграфии и корреляции нижнепермских отложений Северо-Востока России [16, 17]. В.Г. Ганелиным в нижней части огонерского горизонта Колымо-Омолонского региона установ-

лена лона *insignis*, которая хорошо прослеживается в регионе и за его пределами [18]. По первому появлению в разрезе вида *Jakutoproductus insignis* Abramov et Grigorjeva в Верхоянье устанавливается граница хорокытского и эчийского региональных горизонтов в литологически монотонных отложениях [8, 19], что позволяет рассматривать этот вид в качестве важного биостратиграфического маркера.

Еще более высокий уровень в обнажении 16 (обр. 16-4/85 и 16-5/85) представлен десятками раковин *Jakutoproductus terechovi* Zavodowsky (см.рис. 2, к-п) и единичными экземплярами *Anidanthus* sp. Вид *Jakutoproductus terechovi*



**Рис. 2.** Руководящие брахиоподы верхнеольчанской подсвиты разреза Хоспохчон, ядра брюшных створок: *a–e* – *Jakutopproductus verkhoianicus* (Fredericks), обр. 14-8/85; *ж, з* – *Jakutopproductus crassus* Kashirtsev, обр. 14-8/85; *u* – *Jakutopproductus* cf. *insignis* Abramov et Grigorjeva, обр. 16-3/85; *к, л* – *Jakutopproductus terechovi* Zavodowsky, обр. 16-4/85, *м–п* – *Jakutopproductus terechovi* Zavodowsky, обр. 16-5/85

**Fig. 2.** The index brachiopods of the Upper Olchan Subformation of the Khospokhchon section, natural casts of a ventral valves: *a–e* – *Jakutopproductus verkhoianicus* (Fredericks), sample 14-8/85; *ж, з* – *Jakutopproductus crassus* Kashirtsev, sample 14-8/85; *u* – *Jakutopproductus* cf. *insignis* Abramov et Grigorjeva, sample 16-3/85; *к, л* – *Jakutopproductus terechovi* Zavodowsky, samples 16-4/85, *м–п* – *Jakutopproductus terechovi* Zavodowsky, samples 16-5/85

Zavodowsky очень важен для стратиграфии и корреляции нижнепермских отложений Северо-Востока России. Он является видом-индексом одноименной зоны (лоны) в средней части огонерского горизонта Колымо-Омолонского региона [20] и второй биостратиграфической зоны (снизу) эчийского горизонта Верхоянья [8]. Ранее в Южном Верхоянье вид *Jakutopproductus terechovi* Zavodowsky не был известен, и его находка вызывает большой интерес, поскольку, с учетом указанного А.Г. Клецом [12] вида *Jakutopproductus rugosus* Ganelin из нижней перми р. Юдома, свидетельствует о полном наборе

биостратиграфических зон ассельско-сакмарских отложений в Южном Верхоянье.

Полученные данные позволяют провести прямую корреляцию ассельско-сакмарских отложений Южного Верхоянья с ранее изученными разрезами Северного и Западного Верхоянья по общим зональным видам.

В нижней части верхнеольчанской подсвиты установлена зона *Jakutopproductus verkhoianicus*, которая ранее выделялась в верхнекубалахской подсвите и нижней части туорасисской свиты низовьев р. Лена, мегенской свите бассейна р. Соболах-Маян (Северное Верхоянье), хорокытской

свите бассейнов рек Дянышка, Келе, Аллара-Хадарынья, Тумара, Барайы, а также в хорокытской свите и нижней части эчийской свиты Аркачан-Эчийского междуречья (Западное Верхоянье).

Выше в разрезе верхнеольчанской подсвиты может быть выделена зона *Jakutoproductus insignis*, характеризующая среднюю часть туорасисской свиты низовьев р. Лена и основание эчийской свиты бассейнов рек Соболах-Маян, Дянышка, Келе, Тумара, Барайы, а также верхнюю часть хорокытской свиты бассейна р. Аллара-Хадарынья и нижнюю часть эчийской свиты Аркачан-Эчийского междуречья.

Зона *Jakutoproductus terechovi*, перекрывающая зону *insignis*, известна в средней части туорасисской свиты низовьев р. Лена, в эчийской свите бассейнов рек Соболах-Маян, Келе, Тумара, Барайы, а также в кровле хорокытской свиты бассейна р. Аллара-Хадарынья.

### Заключение

Брахиоподы из стратотипа ольчанской свиты (верхняя подсвита), расположенного на руч. Хоспохчон Южного Верхоянья, относятся к трем последовательным биостратиграфическим зонам: *Jakutoproductus verkhoianicus*, *Jakutoproductus insignis*, *Jakutoproductus terechovi*. Принимая во внимание данные предшественников о присутствии в Южном Верхоянье представителей вида *Jakutoproductus rugosus* Ganelin, можно констатировать наличие здесь всех четырех биостратиграфических зон ассельско-сакмарских отложений Верхоянья, из которых три верхние (*insignis*, *terechovi* и *rugosus*) позволяют проводить прямую корреляцию с огонерским региональным горизонтом Омолонского массива по общим зональным видам. Новые результаты свидетельствуют о необходимости проведения комплексного изучения опорных разрезов ольчанской свиты с целью обоснования каменноугольно-пермской границы в Верхоянье био- и хемотратиграфическими методами.

### Список литературы / References

1. Абрамов Б.С. *Биостратиграфия каменноугольных отложений Сетте-Дабана (Южное Верхоянье)*. М.: Наука; 1970. 178 с.

Abramov B.S. *Biostratigraphy of the Sette-Daban Carboniferous deposits (Southern Verkhoyanie)*. Moscow: Nauka; 1970. 178 p. (In Russ.)

2. Абрамов Б.С., Григорьева А.Д. *Биостратиграфия и брахиоподы среднего и верхнего карбона Верхоянья*. М.: Наука; 1983. 168 с.

Abramov B.S., Grigorjeva A.D. *Biostratigraphy and brachiopods of the Middle and Upper Carboniferous in Verkhoyanie*. Moscow: Nauka; 1983. 168 p. (In Russ.)

3. Абрамов Б.С., Григорьева А.Д. *Биостратиграфия и брахиоподы перми Верхоянья*. М.: Наука; 1988. 204 с.

Abramov B.S., Grigorjeva A.D. *Biostratigraphy and brachiopods of the Permian in Verkhoyanie*. Moscow: Nauka; 1988. 204 p. (In Russ.)

4. Гурьев Г.А., Ганелин В.Г. Южное Верхоянье. *Диагностика и картирование чешичато-надвиговых структур*. СПб.: ВСЕГЕИ; 1994; 188 с.

Gurjev G.A., Ganelin V.G. Southern Verkhoyanie. *Diagnosis and mapping of squamous-thrust structures*. Saint Petersburg: VSEGEI; 1994; 188 p. (In Russ.)

5. Зимкин А.В. К стратиграфии пермских отложений Северо-Востока СССР. *Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР*. 1957; Магадан: Кн. изд-во. Вып. 11:31–64.

Zimkin A.V. On the stratigraphy of the Permian deposits of Northeast USSR. *Materials on geology and minerals of the North-East of the USSR*. 1957; Magadan: Magadanское Knizhnoe izd-vo. Issue 11:31–64. (In Russ.)

6. *Решения Третьего межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и мезозою Северо-Востока России*. Ред. Т.Н. Корень, Г.В. Котляр. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2009. 268 с.

*Resolutions of the Third Interdepartmental Regional Conference on the Stratigraphy of the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Northeastern Russia*. T.N.Koren' and G.V.Kotlyar. Eds. St. Petersburg: Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst.; 2009. 268 p. (In Russ.)

7. Макошин В.И., Кутыгин Р.В. Корреляция ассельско-сакмарских отложений Верхоянья по брахиоподам. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(3):5–22. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-1>

Makoshin V.I., Kutygin R.V. Correlation of the Asselian-Sakmarian deposits of the Northern and Western Verkhoyansk regions by brachiopods. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(3):5–22. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-3-1> (In Russ.)

8. Makoshin V.I., Kutygin R.V. Asselian–Sakmarian (Lower Permian) brachiopod zonation of the Verkhoyansk Region, Northeast Russia. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2020;28(7):716–744. <https://doi.org/10.1134/S0869593820040061>

9. Макошин В.И., Кутыгин Р.В. Биостратиграфия терминального карбона низовья реки Лены (Кубалахский разрез). *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естество.*

науки. 2021;163(3):406–413. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.3.406-413>

Makoshin V.I., Kutugin R.V. Biostratigraphy of the terminal Carboniferous of the lower reaches of the Lena River (Kubalakh section, Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2021;163(3):406–413. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.3.406-413> (In Russ.)

10. Makoshin V.I., Kutugin R.V. Asselian–Sakmarian brachiopod zonation of the left bank of the lower reaches of the Lena River, Northeast Russia. *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. 2022;164(4):577–589. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2022.4.577-589>

Makoshin V.I., Kutugin R.V. Asselian–Sakmarian brachiopod zonation of the left bank of the lower reaches of the Lena River, Northeast Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2022;164(4):577–589. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2022.4.577-589>

11. Клец А.Г. Зоны по брахиоподам, их значение при расчленении и корреляции отложений верхнего палеозоя Южного Верхоянья. *Пределы точности биостратиграфической корреляции*. М.: ПИН РАН; 1995:37–47.

Klets A.G. Brachiopod zones, their significance in the division and correlation of the Upper Paleozoic deposits of Southern Verkhoyanie. *Limits of accuracy of biostratigraphic correlation*. Moscow: Paleontological Institute RAS; 1995:37–47. (In Russ.)

12. Клец А.Г. *Верхний палеозой окраинных морей Ангариды*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2005. 239 с.

Klets A.G. *Upper Paleozoic of Marginal seas of Angarida*. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2005. (In Russ.)

13. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Сивчиков В.Е. Основные черты стратиграфии касимовско-гжельских и пермских отложений Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(4):5–29. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-1>

Kutugin R.V., Budnikov I.V., Sivtchikov V.E. The main features of the Kasimovian-Gzhelian and Permian stratigraphy in the Siberian platform and adjacent fold belts. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(4):5–29. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-1> (In Russ.)

14. Alekseev A.S., Nikolaeva S.V., Goreva N.V., Donova N.B., Kossovaya O.L., Kulagina E.I., Kuche-

va N.A., Kurilenko A.V., Kutugin R.V., Popeko L.I., Stepanova T.I. Russian Regional Carboniferous Stratigraphy. Lucas S.G., Schneider J. W., Wang X. and Nikolaeva S. (eds). *The Carboniferous Timescale*. Geological Society, London, Special Publications. 2022:49–117. <https://doi.org/10.1144/SP512-2021-134>

15. Budnikov I.V., Kutugin R.V., Shi G.R., Sivtchikov V.E., Krivenko O.V. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020; vol. 196; article 104365. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104365>

16. Ganelin V.G., Biakov A.S. The Permian biostratigraphy of the Kolyma–Omolon region, Northeast Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006;26(3-4):225–234.

17. Макошин В.И., Кутыгин Р.В. О выделении слюев с *Jakutoproductus insignis* в нижнепермских отложениях Западного Верхоянья. *Вестник СВФУ*. 2013;10(4):31–34.

Makoshin V.I., Kutugin R.V. About the selection of *Jakutoproductus insignis* Beds in the Lower Permian deposits of Western Verkhoyanie. *Vestnik of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University*. 2013;10(4):31–34. (In Russ.)

18. Ганелин В.Г., Бяков А.С., Караваева Н.И. Некоторые вопросы теории стратиграфии и стратиграфическая шкала перми Северо-Востока Азии. *Пути детализации стратиграфических схем и палеогеографических реконструкций*. М.: ГЕОС; 2001:194–209.

Ganelin V.G., Biakov A.S., Karavaeva N.I. Some questions of the theory of stratigraphy and the stratigraphic scale of Permian in Northeast Asia. *Toward detailed stratigraphic schemes and paleogeographic reconstructions*. Moscow: GEOS; 2001:194–209. (In Russ.)

19. Kutugin R.V., Biakov A.S., Makoshin V.I., Budnikov I.V., Peregoedov L.G., Krivenko O.V. Biostratigraphy and important biotic events in the Western Verkhoyansk Region around the Sakmarian–Artinskian boundary. *Palaeoworld*. 2020;29(2):303–324. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2018.10.001>

20. Ганелин В.Г. Таймыро-Колымская подобласть. *Основные черты стратиграфии пермской системы СССР*. Л.: Недра; 1984:111–123.

Ganelin V.G. Taimyr-Kolyma subregion. *Main features of the stratigraphy of the Permian system in the USSR*. Leningrad: Nedra; 1984:111–123. (In Russ.)

#### Об авторах

МАКОШИН Виктор Игоревич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6087-6408>, ResearcherID: J-4365-2018, e-mail: makoshin\_89@mail.ru

КУТЫГИН Руслан Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, e-mail: rkutugin@mail.ru

*В. И. Макошин, Р. В. Кутыгин ♦ О брахиоподах нижней части перми разреза Хоспохчон...*

*About the authors*

MAKOSHIN, Victor Igorevich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6087-6408>, ResearcherID: J-4365-2018, e-mail: makoshin\_89@mail.ru

KUTYGIN, Ruslan Vladimirovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Laboratory, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, e-mail: rkutygin@mail.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 11.04.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 27.06.2023*

*Принята к публикации / Accepted 11.07.2023*

УДК 552.321.5

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-375-383>

Оригинальная статья

## Траппы бассейна реки Моркока и их морфология как реакция на возможное присутствие кимберлитов

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева✉

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*  
✉[gogoleva-SS@mail.ru](mailto:gogoleva-SS@mail.ru)

### Аннотация

Изучены траппы в обнажениях среднего течения р. Моркока. Установлено, что в данном районе траппы формировались в три этапа, в три фазы внедрения. Каждая последующая фаза внедрения базитового расплава отличается своими петро- и геохимическими особенностями, степенью раскристаллизации магматического расплава и соответственно плотностными характеристиками. Выявлена необычная форма внедрения интрузивов второй фазы (смятие силла, внедрение в породы раннего интрузива). Известно, что в процессе становления кимберлитовых диатрем вмещающие их карбонатные породы становятся более плотными, в них возникают поля термоупругих напряжений, ассоциирующие с магнитоупругим виллари-эффектом. В результате вокруг кимберлитов образуется так называемый защитный экран. Сопоставление поведения трапповых силлов р. Моркока с подобным поведением траппов вблизи кимберлитов (трубки Комсомольская и Моркока) позволило предположить наличие под траппами в данном районе неизвестного кимберлитового тела.

**Ключевые слова:** сибирские траппы, кимберлиты, поиски кимберлитов, морфология трапповых силлов  
**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН (проект № 0381-2019-0003).

**Для цитирования:** Томшин М.Д., Гоголева С.С. Траппы бассейна реки Моркока и их морфология как реакция на возможное присутствие кимберлитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):375–383. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-375-383>

Original article

## Traps of the Morkoka River Basin and their morphology as response to the possible presence of kimberlites

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva✉

*Diamond and Precious Metal Geology Institute,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*  
✉[gogoleva\\_ss@mail.ru](mailto:gogoleva_ss@mail.ru)

### Abstract

The traps in outcrops of the middle course of the Morkoka River were formed in three stages and implementation phases. Each subsequent introduction phase of the basite melt was distinguished by its petrogeochemical features, degree of crystallization of the magmatic melt, and density. An unusual form of intrusion introduction in the second phase (crushing of the sill and the introduction of an early intrusion into the rocks) was revealed. During the formation of kimberlite diatremes, the carbonate rocks containing them became denser and thermoelastic stress fields associated with the magnetoelastic Villari effect arose. As a result, the so-called “protective shield” was formed around the kimberlites. A comparison of the trap sill behavior of the Morkoka River with the similar behavior of traps near kimberlites (Komsomolskaya and Morkoka tubes) suggests the presence of an unknown kimberlite body under traps in this area.

**Keywords:** Siberian traps, kimberlites, kimberlite searches, morphology of trap sills

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment for Diamond and Precious Metal Geology Institute of the SB RAS (number 0381-2019-0003).

**For citation:** Tomshin M.D., Gogoleva S.S. Traps of the Morkoka River Basin and their morphology as response to the possible presence of kimberlites. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):375–383. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-375-383>

### Введение

Далдыно-Алакитский район Западной Якутии является областью интенсивного распространения траппов. Площадь, перекрытая траппами, достигает здесь 70 %. Находящиеся на поверхности интрузивы бронируют практически все водораздельные участки. Так как на территории установлены многочисленные кимберлитовые трубки, в том числе и алмазосносные (Айхал, Юбилейная, Комсомольская и др.), допустимо, что под траппами могут находиться еще не вскрытые объекты, поскольку в геофизических полях кимберлиты под траппами не видны. В настоящее время их поиск ведется с помощью бурения «наугад» – не эффективный, дорогостоящий метод [1]. Поэтому многие специалисты пытаются найти способ заглянуть под траппы, в том числе с помощью зондирования из скважин пространства под траппами. В то же время известно, что траппы и сами могут сигнализировать о присутствии кимберлитов. При изучении траппов района было обращено внимание на их необычное поведение вблизи некоторых кимберлитовых трубок. Перед кимберлитами траппы могли увеличивать свою мощность, интрузивы могли сминаться, расщепляться на маломощные инъекции. То есть траппы, при внедрении, своей формой могут реагировать на кимберлитовые диатремы. Учитывая это, было обращено внимание на необычное поведение траппов р. Моркока в районе ее левого притока р. Тегерюк. Изучению этих объектов и посвящена данная работа.

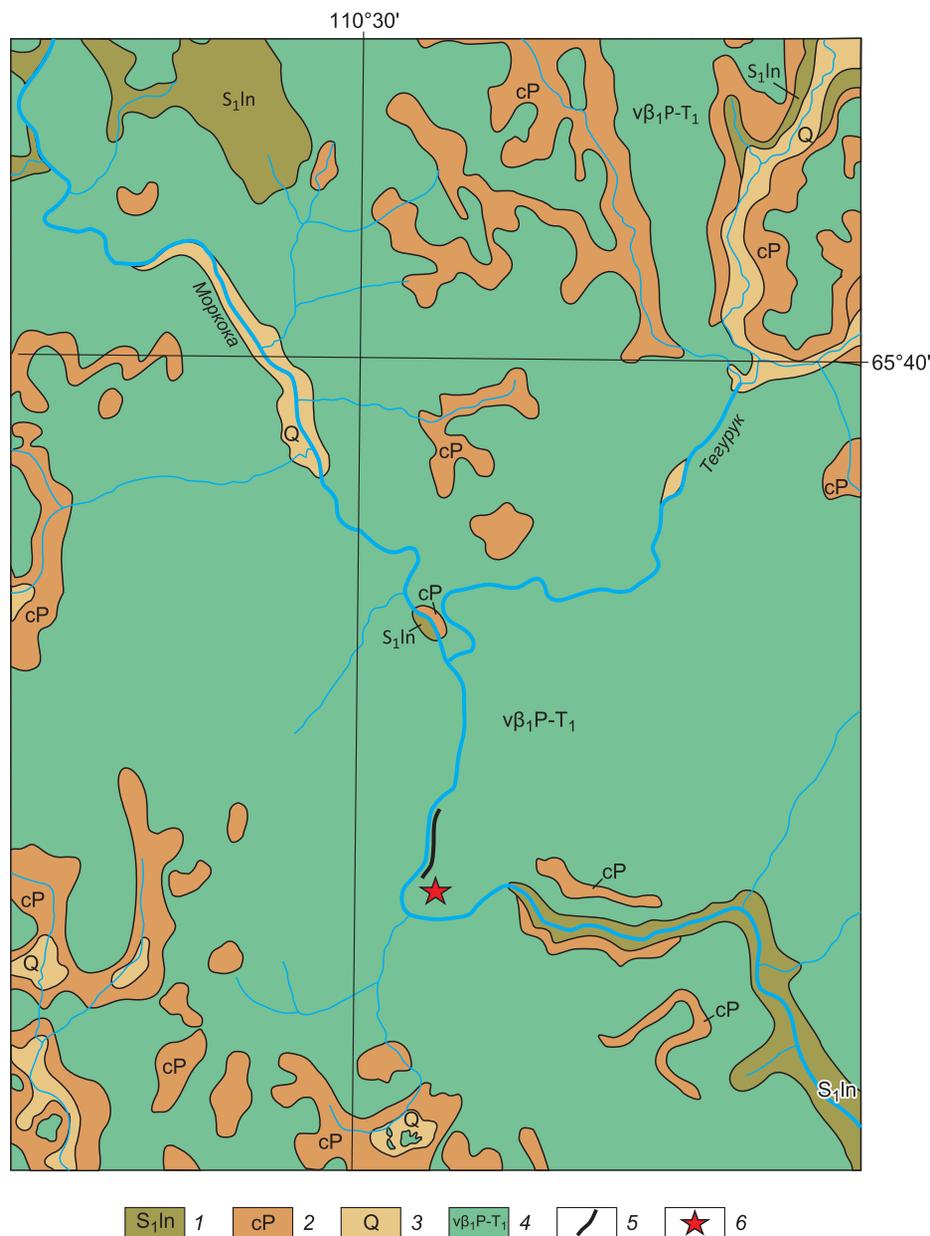
### Траппы р. Моркока

На р. Моркока в районе ее левого притока р. Тегерюк на протяжении 12 км обнажаются траппы (рис. 1). В верхней части (около 150 м) обнажение представлено развалами и курумником долеритов с редкими останцами скальных пород, а в нижней (около 10 м) долериты вскрываются в коренном залегании (рис. 2). Обнажение выполнено в основном двумя интрузивами, имеющими между собой горячий контакт, подчеркивая тем самым более позднее внедрение нижнего силла. В точке наблюдения Мр-61/41 (см. рис. 2) оба силла пересекаются маломощной (около 0,4–0,6 м) дайкой тонкозернистых долеритов, что говорит о наличии третьей фазы

внедрения базитового расплава. Дайка имеет горячие контакты с обоими силлами и содержит в себе угловатые обломки долеритов второго интрузива. Таким образом, в обнажении четко фиксируются три фазы внедрения базитовой магмы. Первым был сформирован верхний силл, в настоящее время бронирующий водораздельное пространство территории и представленный в основном развалами долеритов за исключением отдельных останцов и нижних приконтактных его горизонтов, обнажающихся в коренном виде. Затем внедрялся второй интрузив, верхняя часть которого образует подножие обнажения, а все остальное тело располагается ниже уреза воды. Третьей внедрялась интрузия, фиксируемая лишь по маломощной дайке. Можно предположить, что основное тело третьей интрузии находится на глубине, а в обнажении вскрыта лишь ее маломощная апофиза.

Судя по контактам с осадочными породами (западная, верхняя по течению реки, часть обнажения), вмещающими для траппов были карбонатные породы силура ( $S_1In$ ). Абсолютный возраст по валовой пробе долеритов второго интрузива, определенный К–Аг-методом, показал, что этот интрузив формировался в нижнем триасе – 238±7 млн лет (обр. Мр-24/6), и подтверждает принадлежность исследуемых объектов к пермтриасовым траппам Сибирской платформы. Ранее [2, 3] все пермтриасовые траппы востока Тунгусской синеклизы по петрохимическим показателям были разделены на три петрохимические группы – три петротипа, соответствующие трем фазам внедрения. Таким образом, в данном случае мы так же имеем дело с тремя самостоятельными фазами внедрения базитового расплава, сформировавшего три самостоятельных интрузива.

Интрузив первой фазы внедрения. В коренном залегании вскрыта лишь приподошвенная часть силла, а все остальное представлено развалами среднезернистых долеритов. Суммарная мощность интрузива может достигать 150–170 м. Наличие на поверхности отдельных глыб долеритов – примазок пород типа гранофиров и габбропегматитов дает основание предполагать, что в верхней половине силла находились шпировые обособления этих пород. Последнее типично для



**Рис. 1.** Геологическая карта р. Моркока. Масштаб 1:200000.

1 – силур; 2 – пермь; 3 – четвертичные отложения; 4 – траппы; 5 – обнажение Mr-61; 6 – место возможного нахождения кимберлитов

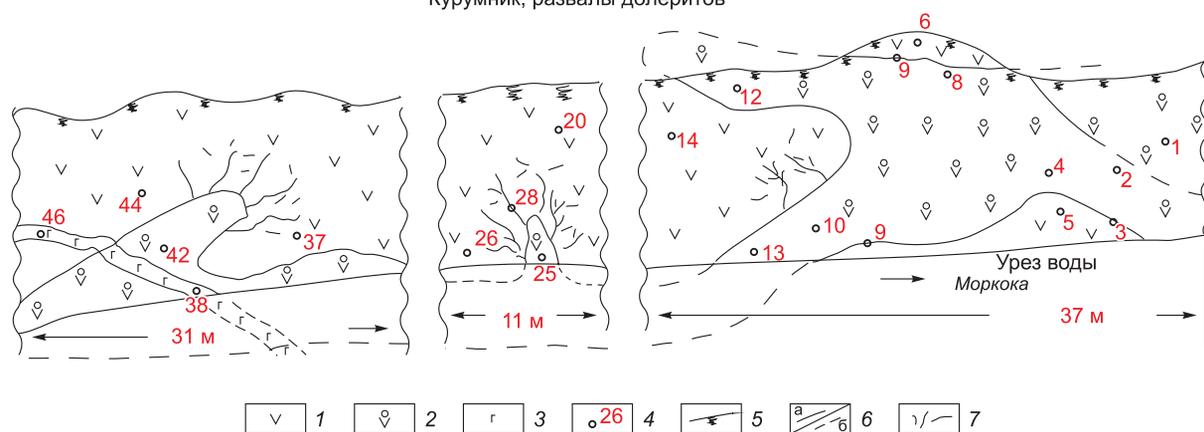
**Fig. 1.** Geological map of the Morkoka River. Scale 1:200000.

1 – Silurian; 2 – Permian; 3 – Quaternary; 4 – traps; 5 – outcrop Mr-61; 6 – location of possible kimberlites

трапповых интрузивов такой мощности. Припо-  
дошвенные горизонты силла, наблюдаемые в об-  
нажении в коренном залегании, сложены сред-  
незернистыми оливинсодержащими долеритами,  
переходящими в сторону контакта в микродоле-  
риты. Преобладает пойкилоофитовый тип струк-  
туры (рис. 3, а), обусловленный соответствующим  
взаимоотношением основных породообразующих  
минералов: плагиоклаза и пироксена. Первый

представлен лейстами лабрадора ( $An_{68-47}$ ), а  
второй – крупными ойкокристаллами авгита  
( $Wo_{40-42}En_{35-39}Fs_{19-24}$ ). Оливин – постоянный  
минерал долеритов образует скопления по 3–5  
округлых зерен и отвечает по составу гялоси-  
дериту ( $Fa_{42-48}$ ). Кроме названных минералов в  
сложении долеритов участвует титаномагнетит,  
а в мезостазисных участках отмечается апатит.  
Интерстиционные участки в долеритах немно-

Курумник, развалы долеритов



**Рис. 2.** Схематический рисунок обнажения Мр-61. Общая протяженность обнажения ~ 900 м, высота коренных выходов 8–10 м.

1 – долериты интрузивов I петротипа; 2 – долериты интрузивов II петротипа; 3 – долериты интрузивов III петротипа; 4 – места отбора проб; 5 – бровка над коренными выходами с почвенным слоем; 6 – контакты интрузий: а – видимые, б – предполагаемые; 7 – зона дробления, пронизанная жилками долеритов

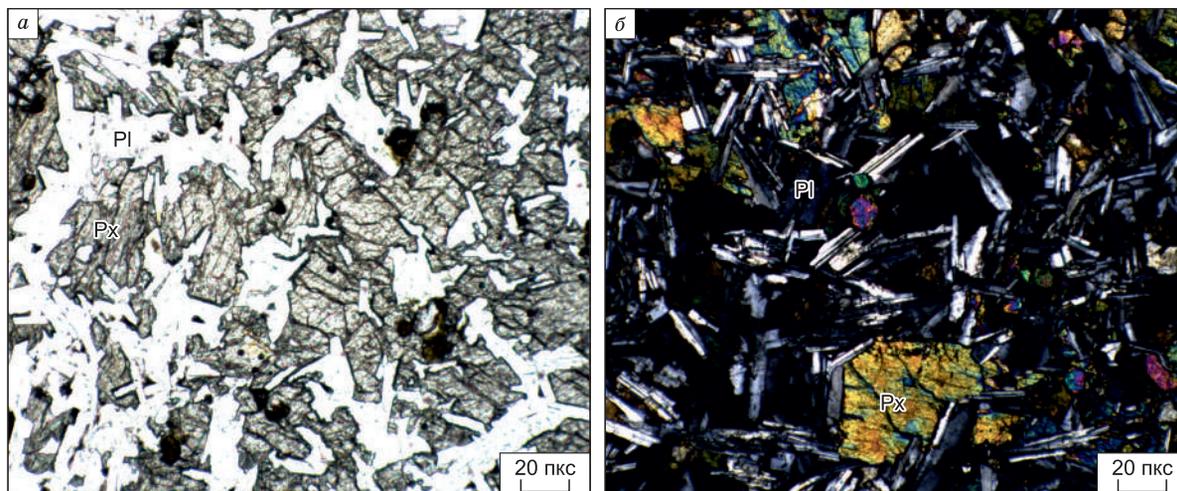
**Fig. 2.** Schematic drawing of outcrop Mr-61 total length of outcrop ~ 900 m, height of bedrock outcrops 8–10 m.

1 – petrotype I intrusive dolerites; 2 – dolerites of petrotype II intrusions; 3 – dolerites of petrotype III intrusions; 4 – sampling sites; 5 – edge above the root outcrops with a soil layer; 6 – contacts of intrusions: a – visible; b – supposed; 7 – crushing zone penetrated by dolerite veins

гочисленны, не более 2 об. %. Вторичное преобразование породообразующих минералов незначительное и в основном касается оливина. Как показывают результаты химического анализа (см. таблицу), долериты сформированы расплавом толеитовой серии, нормально насыщенным кремнекислотой и умеренно обогащенным титаном, содержание которого варьирует около 1,5 %. В целом долериты отвечают среднему траппу по [4] и относятся к его первому петрохимическому типу по [2, 3].

Интрузив второй фазы внедрения, расположенный под верхним силлом, более молодой и связан со вторым этапом магматической деятельности. Он оказывает на верхний силл значительное динамическое воздействие. Наблюдается вдавливание (см. рис. 2) вновь внедряющегося вещества в приподошвенные породы верхнего силла. Кровля нижнего интрузива приобретает волнообразную форму. В теле первого интрузива эти волны выглядят как отдельные блоки куполообразной формы высотой до 5 м и шириной до 15–20 м. Вокруг таких куполов/блоков в долеритах раннего интрузива формируются зоны дробления, часто пронизанные ветвящимися жилками долеритов второго интрузива (см. рис. 2). В свою очередь в долеритах куполообразных образований наблюдаются следы микробрекчирования. Под микроскопом в скрещенных ни-

келях это явление выражается в мозаичном погасании породы. В целом второй интрузив выполнен средне-мелкозернистыми долеритами с офитовой структурой (рис. 3, б) в отличие от пойкилоофитовой, характерной для долеритов верхнего интрузива. Краевые части силла представлены долеритовыми порфиритами и микродолеритами. Порфирированность пород обусловлена крупными таблитчатыми кристаллами плагиоклаза (рис. 4). Все разновидности пород – оливинсодержащие. Оливин по составу отвечает также гиалосидериту ( $\text{Fa}_{38-47}$ ), но является более магнезиальным. Клинопироксен долеритов чаще всего имеет изометрично округлую форму кристаллов и практически не содержит лейст плагиоклаза (см. рис. 3, б). По составу это менее железистый, более магнезиальный авгит ( $\text{Wo}_{42}\text{En}_{40-46}\text{Fs}_{12-16}$ ). Основной породообразующий минерал долеритов – плагиоклаз, постоянно зонален и соответствует лабрадору ( $\text{An}_{77-59}$ ). В порфировых выделениях основность минерала повышается до битовнита ( $\text{An}_{86-81}$ ). Данные химического состава долеритов (см. таблицу) показывают, что они сформированы базальтовым расплавом, нормально насыщенным кремнекислотой. Дolerиты интрузива характеризуются низкими содержаниями титана (около 1 об. %  $\text{TiO}_2$ ), щелочей, фосфора и суммарного железа при низкой степени его окисленности. Дolerи-



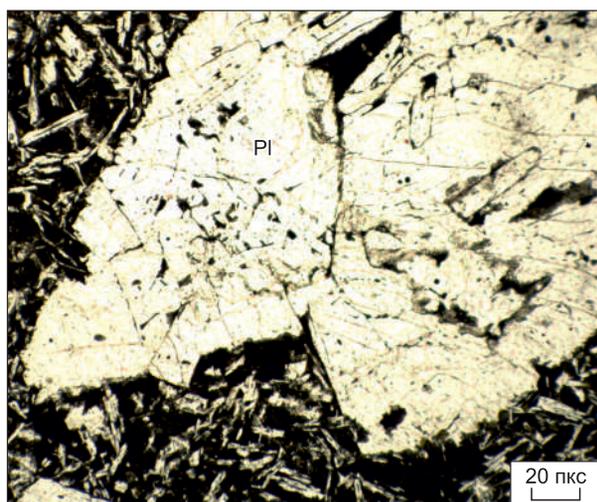
**Рис. 3.** Пойкилофитовая структура долеритов I петротипа (обр. 61-6) (а) и офитовая структура долеритов II петротипа (обр. 61-20) (б)

**Fig. 3.** (a) Poikilophyte structure of dolerites of petrotype I (sample 61-6); (б) ophitic structure of petrotype II dolerites (sample 61-20)

ты обладают устойчивыми и несколько повышенными содержаниями магния и кальция. Таким образом, можно констатировать, что долериты верхнего и нижнего интрузивов различаются по структурным признакам, по составу основных породообразующих минералов: основность плагиоклаза, железистость и магнезиальность пироксена и оливина, и по петрохимическим признакам: содержание  $TiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $\Sigma Fe$  (значимо),  $MgO$  и  $CaO$  (менее значимо).

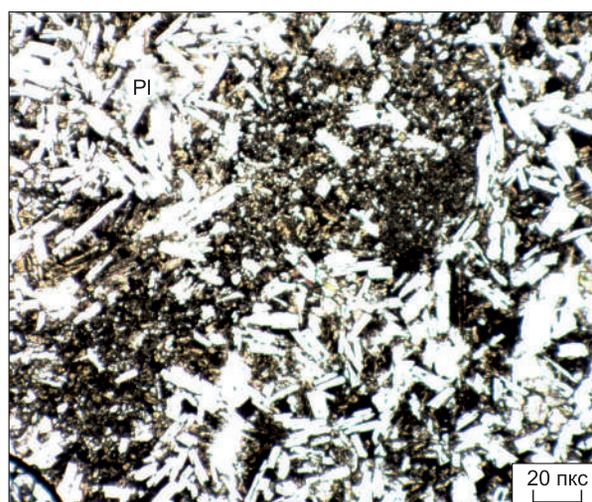
Интрузив третьей фазы внедрения. Поскольку дайка сечет оба пластовые интрузива, она яв-

ляется наиболее молодой. По аналогии с разбуренными в Далдыно-Алакитском районе подобными объектами, относящимися к третьей фазе внедрения траппов, можно предположить, что в данном случае основное тело интрузива, которое находится на глубине, так же должно быть пластовым, а в обнажении фиксируется его маломощная дайкообразная апофиза. Дайка имеет извилистую форму, четкие контакты с обоими силлами (см. рис. 2). Выполнена дайка тонкозернистыми долеритами с долеритовой структурой, такситовой текстурой (рис. 5) и слабо проявлен-



**Рис. 4.** Порфировые кристаллы плагиоклаза (обр. 61-13)

**Fig. 4.** Porphyry crystals of plagioclase (sample 61-13)



**Рис. 5.** Такситовый характер текстуры (обр. 61-38)

**Fig. 5.** Taxite nature of the texture (samples 61-3)

ным трахитоидным расположением плагиоклаза. Такситоидность породы обусловлена незакономерным чередованием участков мелкозернистых и тонкозернистых пород, зернистость в которых различается в 2–3 раза (см. рис. 5). Основной породообразующий минерал долеритов – плагиоклаз, кристаллизуется в форме удлинённых узких лейст со слабопроявленной зональностью. По составу он отвечает андезину ( $An_{51-44}$ ). Моноклинный пироксен, доля которого в породе не превышает 30 %, представлен двумя группами зерен: округлыми и столбчатыми кристаллами. Последние по составу оказались более железистыми и менее магнезиальными. В целом клинопироксен долеритов дайки отвечает железистой разновидности авгита ( $Wo_{34-38}En_{32-37}Fs_{26-33}$ ). Оливин достоверно не установлен, хотя по отдельным редким боуленгитовым псевдоморфозам можно предположить его первичное присутствие в породе. В петрохимическом отношении (см. таблицу) долериты дайки отличаются высокими содержаниями титана, суммарного железа и калия и пониженными величинами кремнекислоты, глинозема и магнезия, чем они резко отличаются от долеритов первых интрузивов.

### Обсуждение

Проведенное изучение траппов р. Моркока показало, что в данном районе в обнажении вскрываются три самостоятельных интрузива, образованные в три фазы внедрения базитовой магмы, отличающейся своими петрохимическими характеристиками, соответствующие трем петрохимическим типам базитов. Установлено, что первый силл, залегая горизонтально, перекрывает существенную часть территории, образуя сплошное трапповое поле (см. рис. 1). Находящийся под ним второй интрузив вначале (начало обнажения) внедрялся на протяжении ~ 10 км горизонтально вдоль подошвы верхней интрузии. Затем он начинает резко сминаться. То есть очевидна схожесть в поведении трапповых силлов р. Моркока с пластовыми интрузиями вблизи некоторых кимберлитовых трубок. Так, например, в производственном карьере трубки Комсомольская вскрываются два силла [5, рис. 2]. Верхний силл залегают горизонтально согласно с вмещающими осадочными породами и перекрывает кимберлиты, тогда как нижний, встретив на пути внедрения препятствие в виде кимберлитов, начинает сминаться, «гормошиться», задирается кверху, как бы стараясь «перепрыг-

нуть» через кимберлит. Оказалось, что деформирующийся силл выполнен более вязкой интенсивно раскристаллизованной магмой, относящейся ко второму петрохимическому типу. Аналогичное поведение траппов было описано вблизи трубки Моркока. Здесь также установлено два силла. Верхний из них занимает бронирующее положение и перекрывает кимберлиты, а залегающий под ним второй интрузив перед диагмой образует раздув мощности, начинает сминаться, щепиться на многочисленные апофизы ([6]; рис. 2, в). Как оказалось, второй силл также был выполнен хорошо раскристаллизованной, более вязкой магмой. То есть в зависимости от внутреннего строения и состава траппы по-разному ведут себя вблизи кимберлитов. Более вязкая базитовая магма чутко реагировала на плотностные характеристики вмещающих пород.

Известно, что под воздействием кимберлитов в процессе их становления вмещающие породы становятся более плотными [6, 7], в них возникают термоупругие [8] и магнитоупругие [9, 10] напряжения, аналогичные тем, что проявляются при подземном ядерном взрыве [11]. Согласно данным бурения, такие изменения вмещающих пород, на которые начинает реагировать внедряющаяся базитовая магма, могли распространяться вокруг кимберлитов на несколько километров. Таким образом, именно кимберлиты и окружающие их вмещающие породы создают трудно проницаемую зону для относительно вязкой интенсивно раскристаллизованной базитовой магмы. Обычно подвижная, обладающая мощной интрузирующей силой базитовая магма формирует многокилометровые пластовые интрузии, как правило, залегающие согласно с вмещающими их осадочными породами. Учитывая сказанное, можно с определенной долей уверенности предположить, что в данном случае сложная морфология траппов р. Моркока обусловлена кимберлитами.

Возможен следующий сценарий становления траппов. Внедряющийся первым базитовый расплав, формировавший верхний силл, перекрывал («запечатал») кимберлиты. Поступающая через какое-то время, уже частично раскристаллизованная на глубине, более вязкая магма, встретив на пути внедрения кимберлиты и вмещающие диагму более плотные карбонатные породы, как бы уперлась в них. Как кимберлиты, так и вмещающие их осадочные породы оказались для нижнего силла препятствием. Внедряющийся магма-

Химический состав долеритов р. Моркока в районе р. Тегерюк, мас. %  
**Chemical composition of the dolerites of the Morkoka River in the area of the Tegeryuk River, weight %**

Компонент	I петрохимический тип										II петрохимический тип					III петрохимический тип				
	61/14	61/18	61/26	61/31	61/34	61/37	61/40	61/44	1	61/1	61/4	61/6	61/10	61/12	2	61/38	61/46	41/1-2	3	
SiO <sub>2</sub>	47,53	48,18	47,27	48,35	47,86	48,56	48,57	47,99	48,82	48,52	48,70	48,61	48,49	48,63	49,38	47,88	47,86	45,30	47,87	
TiO <sub>2</sub>	1,43	1,47	1,45	1,49	1,45	1,48	1,51	1,45	1,46	1,30	1,29	1,24	1,30	1,28	1,02	2,05	2,02	2,15	1,95	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,22	15,21	14,91	14,85	14,95	14,93	15,13	15,11	15,04	15,05	14,55	15,02	14,73	14,99	15,00	14,23	14,04	14,42	14,77	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,12	3,67	4,93	4,12	5,35	3,83	5,37	5,45	3,89	3,77	3,33	2,92	3,90	4,88	3,16	3,69	4,31	5,36	4,27	
FeO	8,74	9,58	8,17	8,75	8,10	9,13	7,78	7,8	8,79	9,70	9,59	9,93	9,21	8,18	7,97	10,89	10,47	11,53	9,76	
MnO	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,21	0,21	0,20	0,21	0,20	0,17	0,21	0,20	0,24	0,20	
MgO	7,13	6,85	6,76	6,35	6,40	6,88	6,50	6,26	6,89	6,62	5,72	4,73	6,00	6,10	7,97	5,84	5,22	6,70	6,33	
CaO	10,69	10,80	10,86	11,35	11,11	10,73	11,25	11,16	10,29	11,88	13,05	13,61	11,88	11,27	11,53	10,66	11,22	10,50	10,17	
Na <sub>2</sub> O	2,22	2,50	2,48	2,43	2,40	2,46	2,40	2,46	2,40	2,38	2,52	2,47	2,52	2,35	2,01	2,65	2,69	2,36	2,46	
K <sub>2</sub> O	0,44	0,46	0,44	0,46	0,48	0,46	0,44	0,44	0,47	0,32	0,41	0,38	0,41	0,43	0,40	0,57	0,41	0,47	0,61	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,23	0,17	0,20	0,15	0,12	0,17	0,17	0,15	0,15	0,11	0,18	0,17	0,24	0,21	
П.л.п	1,95	0,17	2,01	1,46	1,59	1,21	0,39	1,24	1,66	0,57	0,82	0,49	1,02	1,67	1,42	1,22	1,37	0,70	1,59	
Сумма	99,83	99,25	99,65	99,98	100,07	100,09	99,7	99,75	100,05	100,44	100,36	99,77	99,82	100,13	100,14	100,07	99,98	99,97	100,19	
n									128						123				88	

*Примечание.* Анализы выполнены в химико-аналитической лаборатории ИГАБМ СО РАН; 1, 2, 3 – средние составы долеритов восточной части Тунгусской синеклизы.

*Note.* The analyses were performed in the chemical analytical laboratory at DPMGI SB RAS; 1, 2, 3 – average compositions of dolerites in the eastern part of the Tunguska syncline.

тический клин начинает сминаться, вдавливаясь в долериты верхнего интрузива, дробить их и инъецировать в раздробленные породы в виде тонких ветвящихся жилков. Часть магмы, возможно, могла, обогнув возникшее препятствие и уже на каком-то расстоянии от кимберлитов не чувствуя их влияние, вновь формировать пологозалегающий силл. Третий интрузив представлен в обнажении лишь маломощной дайкой. Предполагается, что базитовый расплав, его формировавший, будучи наиболее вязким, интенсивно раскристаллизованным и имевшим более высокую (до 3 г/см<sup>3</sup> против 2,7–2,8 г/см<sup>3</sup>) плотность, остановился перед кимберлитами, образуя раздув мощности. (Известны случаи, когда перед кимберлитами в силлах траппов их мощность увеличивается втрое.) Дальнейшее внедрение расплава могло проходить в виде маломощных даек, аналогичных тем, что показаны на рис. 2 либо в [6, рис. 2].

### Заключение

Проведенное изучение траппов р. Моркока показало, что в зависимости от раскристаллизации базитовой магмы, изменения плотностных характеристик и вязкостных свойств расплава внедряющий магматический клин по-разному реагирует на кимберлиты и, особенно, на вмещающие их осадочные породы. Последние, за счет приобретенного под воздействием внедряющихся кимберлитов термоупругого и магнитоупругого эффектов, образуют вокруг диатремы «защитный экран», препятствующий относительно свободному внедрению базитов [9]. В подобных случаях трапповые силлы вблизи кимберлитов начинают менять свою конфигурацию, тем самым сигнализируя о наличии кимберлитов.

Приведенная выше информация с достаточной долей уверенности дает основание предполагать, что в случае траппов бассейна р. Моркока их морфологические изменения обусловлены кимберлитами, тело которых находится на левом берегу реки в 5 км ниже по течению от р. Тегерюк в подковообразной излучине. Именно подковообразный изгиб р. Моркока, оконтуривая инъективное поднятие осадочных пород, обусловленное внедрением кимберлитов, дополнительно подтверждает возможное присутствие здесь кимберлитов.

### Список литературы / References

1. Зинчук Н.Н. Об основных геолого-поисковых обстановках при прогнозировании кимберлитовых трубок. *Наука и образование*. 2016;(4):7–15.

Zinchuk N.N. Geological structure and petrography of kimberlite pipes. *Nauka i Obrazovanie*. 2016;(4):7–15. (In Russ.)

2. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Тянь О.А. Петрохимическое разнообразие траппов восточной периферии Тунгусской синеклизы. *Геология и геофизика*. 2005;46(1):72–82.

Tomshin M.D., Kopylova A.G., Tyan O.A. Petrochemical diversity of traps on the eastern periphery of the Tunguska syncline. *Russian Geology and geophysics*. 2005;46(1):72–82. (In Russ.)

3. Копылова А.Г., Томшин М.Д. Геохимия траппов восточной части Тунгусской синеклизы. *Отечественная геология*. 2011;(5):80–88.

Kopylova A.G., Tomshin M.D. Geochemistry of traps in the eastern part of the Tunguska syncline. *Otechestvennaya geologiya [Domestic geology]*. 2011;(5):80–88. (In Russ.)

4. Кутолин В.А. Проблемы петрохимии и петрологии базитов. Новосибирск: Наука; 1972. 208 с.

Kutolin V.A. *Problems of petrochemistry and petrology of basites*. Novosibirsk: Nauka; 1972. 208 p. (In Russ.)

5. Константинов К.М., Мишенин С.Г., Томшин М.Д., Корнилова В.П., Ковальчук О.Е. Петромагнитные неоднородности пермо-триасовых траппов Далдино-Алаkitского алмазоносного района (Западная Якутия). *Литосфера*. 2014(2):17–98.

Konstantinov K.M., Mishenin S.G., Tomshin M.D., Kornilova V.P., Kovalchuk O.E. Petromagnetic inhomogeneities of the Permo-Triassic traps of the Daldino-Alakit diamond province (Western Yakutia). *Lithosphere*. 2014(2):17–98 (In Russ.)

6. Томшин М.Д., Лелюх М.И., Мишенин С.Г., Сунцова С.П., Копылова А.Г., Убинин С.Г. Схема развития траппового магматизма восточного борта Тунгусской синеклизы. *Отечественная геология*. 2001;(5):19–24.

Tomshin M.D., Lelyukh M.I., Mishenin S.G., Suntsova S.P., Kopylova A.G., Dubinin S.G. Scheme of development of trap magmatism of the eastern side of the Tunguska syncline. *Otechestvennaya geologiya [Domestic geology]*. 2001;(5):19–24. (In Russ.)

7. Коробков И.Г. Евстратов Л.А., Мильштейн Е.Д. Базитовые вулканоструктуры алмазоносных районов восточного борта Тунгусской синеклизы. Томск: STT; 2013. 270 с.

Korobkov I.G. Evstratova L.A., Milstein E.D. *Mafic volcanic structures of diamondiferous areas in the east side of Tunguska syncline*. Tomsk: STT; 2013. 270 p. (In Russ.)

8. Никулин В.И., Лелюх М.И., Фон-дер-Флаасс Г.С. Алмазопрогностика (Концепция и методология). Иркутск: НПФ «Алмаз-Прогноз»; 2001. 317 с.

Nikulin V.I., Lelyukh M.I., Von der Flaass G.S. *Diamond Prognostics (Concept and methodology)*. Irkutsk: NPF "Almaz-Prognoz"; 2001. 317 p. (In Russ.)

9. Константинов К.М., Киргуев А.А., Хороших М.С. Петромагнитные неоднородности стресса: прикладное следствие Виллари-эффекта. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018;24(2):29–38. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>

Konstantinov K.M., Kirguyev A.A., Horoshih M.S. Petromagnetic heterogeneities of stress: applied corollary of Villari effect. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2018;24(2):29–38 (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-24-2-29-38>

10. Константинов И.К., Константинов К.М., Орлова Г.В. и др. Влияние давления и температуры на анизотропию магнитной восприимчивости вмещающих горных пород: наблюдения, гипотезы и эксперименты. *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы научной конференции*. Вып. 20.

г. Иркутск, 18–21 октября 2022 г. Скляр Е.В. (ред). Иркутск: Институт земной коры СО РАН; 2022:137–139.

Konstantinov I.K., Konstantinov K.M., Orlova G.V. et al. Influence of pressure and temperature on the anisotropy of magnetic susceptibility of host rocks: observations, hypotheses and experiments. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from ocean to continent)*. Proceedings of the Conference. Issue 20, Irkutsk, October 18-21, 2022. Sklyarov E. V. (ed.). Irkutsk: Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2022:137–139. (In Russ.)

11. Костровицкий С.И. *Физические условия, гидравлика и кинетика заполнения кимберлитовых трубок*. Новосибирск: Наука; 1976. 96 с.

Kostrovitsky S.I. *Physical conditions, hydraulics and kinetics of filling kimberlite pipes*. Novosibirsk: Nauka; 1976. 96 p. (In Russ.)

#### Об авторах

ТОМШИН Михаил Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, РИНЦ AuthorID: 71202, e-mail: [tmd@diamond.ysn.ru](mailto:tmd@diamond.ysn.ru)

ГОГОЛЕВА Саргылана Семеновна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, e-mail: [gogoleva\\_ss@mail.ru](mailto:gogoleva_ss@mail.ru)

#### About the authors

TOMSHIN, Mihail Dmitrievich, Cand. Sci (Geol. and Mineral.), Head of the Geological Museum Laboratory, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, RISC AuthorID: 71202, e-mail: [tmd@diamond.ysn.ru](mailto:tmd@diamond.ysn.ru)

GOGOLEVA, Sargylana Semenovna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, e-mail: [gogoleva\\_ss@mail.ru](mailto:gogoleva_ss@mail.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 23.06.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 25.07.2023*

*Принята к публикации / Accepted 31.07.2023*

Оригинальная статья

## Геохимические особенности органического вещества нижнемеловых отложений ожогиной свиты (Индигино-Зырянский прогиб)

И. Н. Зуева<sup>✉,1</sup>, О. Н. Чалая<sup>1</sup>, В. А. Каширцев<sup>1,2</sup>,  
Ю. С. Глянцева<sup>1</sup>, С. Х. Лифшиц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

✉ [inzu@ipng.ysn.ru](mailto:inzu@ipng.ysn.ru)

### Аннотация

Имеющиеся немногочисленные данные по молекулярной геохимии свидетельствуют о преобладании в исходном материале ожогиной свиты нижнего мела террагенного органического вещества, и она рассматривается главным образом как газогенерирующая. Вместе с тем, исходя из смешанной природы исходного материала, данная свита обладала определенным потенциалом для реализации процессов нефтегенерации. Методами классической битуминологии, ИК-Фурье и газовой хромато-масс-спектрометрии изучены особенности органического вещества ожогиной свиты Индигино-Зырянского прогиба. В работе показаны закономерности распределения алканов, преобладание в их составе низкомолекулярных гомологов с максимумом на  $nC_{15-19}$ , установлены низкие значения отношений  $\sum n.k.-nC_{20}/\sum nC_{21}-k.k.$ , изопреноиды/ $n$ -алканы, низкое содержание полициклических ароматических углеводородов, присутствие ванадилпорфириновых комплексов. Полученные данные позволяют утверждать, что в составе ископаемого органического вещества ожогиной свиты нижнего мела с различным по разрезу соотношением террагенной и аквагенной составляющих было существенным участие водорослевого материала. Показано сходство геохимических параметров ожогиной с верхнебастахской свитой верхней юры, особенности состава битумоидов которой во многом предопределены преобладанием планктоногенно-водорослевого материала, способного генерировать большое количество жидких углеводородов. Установленное сходство повышает оценку нефтегенерационного потенциала нижнемеловых отложений ожогиной свиты наряду с высоким газогенерационным потенциалом, присущим террагенному органическому веществу.

**Ключевые слова:** органическое вещество, битумоиды, углеводороды, молекулы-биомаркеры, смолы, ИК-Фурье и хромато-масс спектрометрия

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по Программе ФНИ № 122011200369-1 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН, грант №13.ЦКП.21.0016.

**Благодарности.** Авторы благодарят геологов А.Ф. Сафронова и В.В. Гайдука за предоставленные образцы, а также коллег, принимавших участие в выполнении аналитических определений, и А.Р. Александрова за помощь в оформлении статьи. Мы также признательны рецензенту и редакторам за замечания и рекомендации, которые улучшили содержание статьи и ее восприятие.

**Для цитирования:** Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Глянцева Ю.С., Лифшиц С.Х. Геохимические особенности органического вещества нижнемеловых отложений ожогиной свиты (Индигино-Зырянский прогиб). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):384–397. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-384-397>

## Geochemical features of organic matter in the Lower Cretaceous deposits of the Ozhoginskaya Suite (Indigiro-Zyryansky basin)

I. N. Zueva<sup>✉,1</sup>, O. N. Chalaya<sup>1</sup>, V. A. Kashirtsev<sup>1,2</sup>, Yu. S. Glyaznetsova<sup>1</sup>, S. Kh. Lifshits<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Trofimuk Institute of petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>✉</sup>inzu@ipng.ysn.ru

### Abstract

Limited available data on molecular geochemistry indicate the predominance of terrigenous organic matter in the source material of the Lower Cretaceous deposits of the Ozhoginskaya suite, which allows it to be considered gas-generating. However, based on the mixed nature of the source material, this suite could possess potential for liquid hydrocarbon generation. The geochemical features of the organic matter were studied using classical bituminology, Fourier transform infrared spectroscopy, gas chromatography, and mass spectrometry. The results showed a regular distribution of alkanes with a predominance of low-molecular-weight homologues with a maximum at nC<sub>15-19</sub> and low values of  $\sum n.c.-nC_{20}/\sum nC_{21-c.c.}$ , vanadylporphyrin complexes. Thus, the contribution of algal material could be significant to the composition of the fossil organic matter of the Lower Cretaceous Ozhoginsky suite with different ratios of terrigenous and aquatic components in the section. Our results on the Ozhoginskaya suite showed the similarity of geochemical parameters with the Upper Bastakh suite of the Upper Jurassic, the features of bitumoid composition, which were mainly due to the predominance of planktonic-algal material capable of generating a large amount of liquid hydrocarbons. This established similarity raises the estimate of the oil generation potential of the organic matter of the Lower Cretaceous deposits of the Ozhoginskaya suite, along with the high gas generation potential inherent in terrigenous organic matter.

**Keywords:** organic matter, bitumoids, hydrocarbons, resins, molecules-biomarkers, IR-Fourier spectrometry, gas chromatography-mass spectrometry

**Funding.** This study was conducted within the framework of the fundamental scientific research program (number 122011200369-1) using scientific equipment of the Core Shared Research Facilities (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant number 13.CSRF.21.0016).

**Acknowledgements.** The authors are thankful to geologists A.F. Safronov and V.V. Gaiduk for providing the samples, as well as colleagues who took part in the performance of analytical determinations and A.R. Alexandrov for help in the preparation of the article. We are also grateful to the editors and reviewers for their comments and recommendations, which have improved the manuscript and its perception.

**For citation:** Zueva I.N., Chalaya O.N., Kashirtsev V.A., Glyaznetsova Yu.S., Lifshits S.Kh. Geochemical features of organic matter in the Lower Cretaceous deposits of the Ozhoginskaya Suite (Indigiro-Zyryansky basin). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):384–397. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-384-397>

### Введение

О возможной нефтегазоносности верхнеюрско-нижнемелового комплекса мезозойских отложений Индигиро-Зырянского прогиба с геологических позиций содержатся сведения в ряде работ [1–7]. Северо-западная часть прогиба выполнена мощной толщей (до 10 км) в основном терригенных верхнеюрских и нижнемеловых отложений, перекрытых более молодыми маломощными отложениями. Глубина погружения верхнеюрско-нижнемеловых отложений в пределах Предверхоанского прогиба составляет

до 4,5 км, что соответствует главной зоне нефтеобразования. Данные о строении осадочного чехла и составе пород западной части Индигиро-Зырянского прогиба, присутствие в разрезе верхней части верхнебастахской подбиты и по всему разрезу нижнего мела пластов песчаников с удовлетворительными коллекторскими свойствами и зафиксированные поверхностные газопроявления могут указывать на формирование зон нефтегазоаккумуляции [5, 8].

По данным геохимических исследований осадочных пород также было установлено благо-

приятное сочетание комплексов отложений для реализации процессов нефтегенерации и нефтегазонакопления [3, 4, 8, 9–11]. Немногочисленные данные по молекулярной геохимии меловых отложений свидетельствуют о преобладании в исходном материале органического вещества (ОВ) континентальных фаций. В составе молекул-биомаркеров установлены бициклические сесквитерпаны, генезис которых тесно связан с терпенами высшей растительности, присутствует широкий комплекс полициклической ароматики, что согласуется с особенностями распределения насыщенных УВ с преобладанием относительно высокомолекулярных гомологов, присущих террагенному ОВ. С геохимических позиций все это позволило высоко оценить газогенерационный потенциал изученных отложений [10]. Вместе с тем, анализ нового полученного материала [11] по геохимии ОВ верхнеюрских отложений бастакской свиты форланда Индигиро-Зырянского прогиба показал, что особенности состава битумоидов (ХБ) во многом обусловлены преобладанием планктоногенно-водородного материала. По некоторым геохимическим параметрам намечается сходство с группой изученных ранее битумоидов из вышележащей ожогиной свиты нижнего мела, что вызывает интерес и требует дополнительных исследований природы исходного материала нижнемеловых отложений данной свиты и, в частности, роли в его составе аквагенного ОВ, способного генерировать большое количество жидких УВ.

Данная работа посвящена детальному изучению геохимии битумоидной части смешанного ОВ пород нижнемеловых отложений ожогиной свиты Индигиро-Зырянского прогиба с целью выяснения ее газо- и нефтематеринских свойств.

*Ожогиная свита* нижнего мела с постепенным переходом залегает согласно на бастакской серии, хотя нередко ею перекрыта по настигам [5]. Свита сложена ритмичным переслаиванием аргиллит-алевролитовых (70 %) и аргиллитовых (30 %) пачек, которые вверх по разрезу постепенно сменяются карбонатно-глинистыми и углисто-глинистыми породами, среди которых встречаются прослой и линзы каменного угля. Мощность свиты от 600 м до 1,5 км. Видимая мощность ожогиной свиты в долине р. Индигирка составляет около 1,4 км. Степень катагенетической преобразованности ОВ соответствует градации МК<sub>2</sub> [6]. Накопление иско-

паемого ОВ континентальных меловых отложений происходило в слабо восстановительной, слабо окислительной и реже окислительной геохимической обстановке. В составе ископаемого ОВ существенна примесь террагенного материала [3, 9].

### Материал и методы исследования

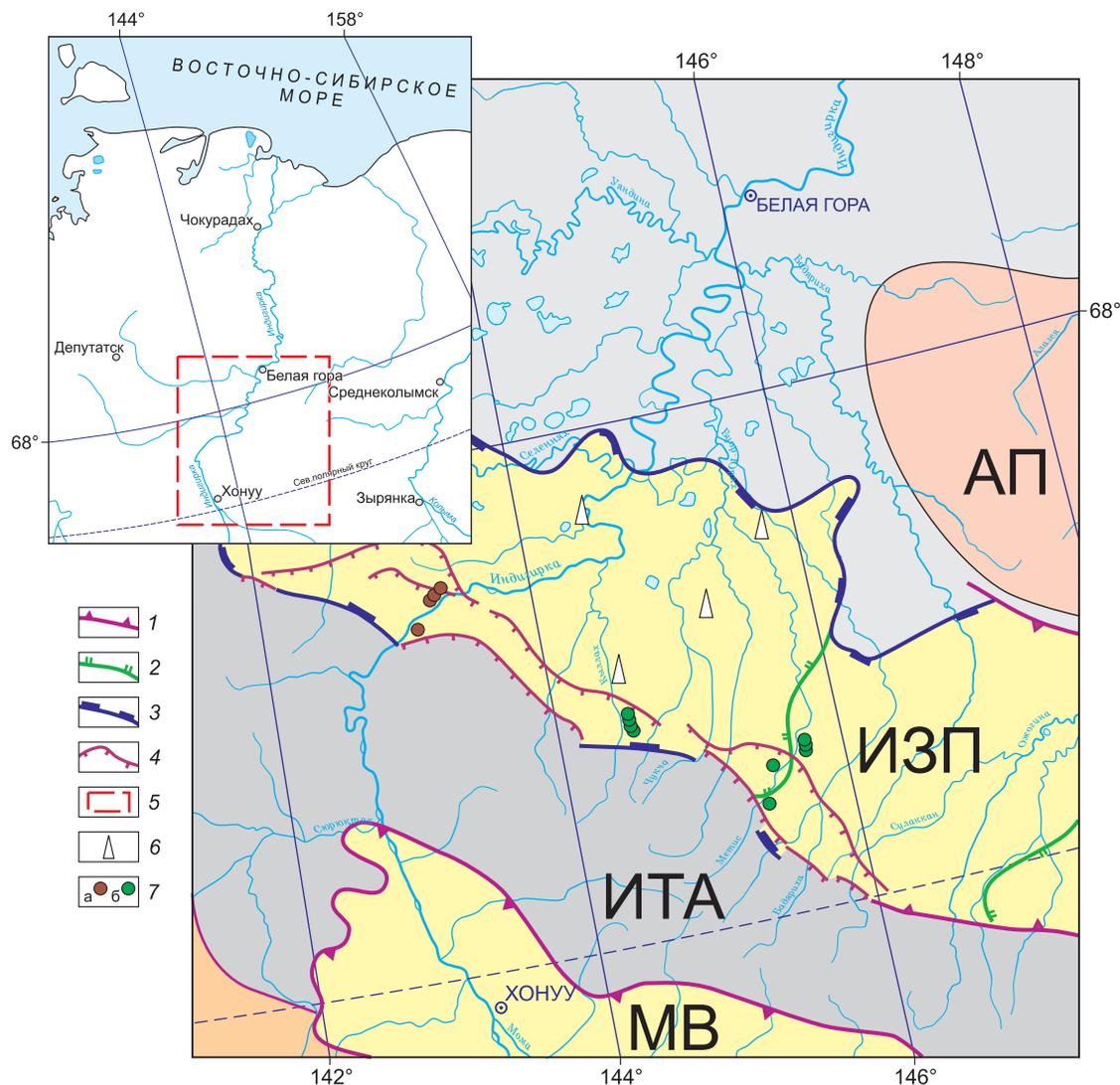
В работе представлены результаты исследований геохимическими методами 19 образцов пород нижнемеловых отложений по разрезу ожогиной свиты из естественных обнажений по берегам рек Индигирка (вблизи устья р. Красная), Кыллах и Мятись (рис. 1).

Образцы пород после дезинтеграции в шаровых мельницах экстрагировались хлороформом. Мальтеновая часть битумоидов, полученная после осаждения асфальтенов избытком петролейного эфира, исследовалась методами ИК-Фурье спектроскопии и хромато-масс-спектральным методом (ГХ/МС) на системе, включающей газовый хроматограф Agilent 6890, имеющий интерфейс с высокоэффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Масс-хроматограммы получены по общему ионному току (ТИС), а также сканированием по характеристическим фрагментным ионам. Идентификация индивидуальных УВ осуществлялась компьютерным поиском в библиотеках Национального института стандартов NIST05, по литературным данным и, главным образом, реконструкцией структур по характеру ионной фрагментации при электронном ударе [12].

### Результаты исследований и обсуждение

Полученные по геохимии результаты показали, что содержание ОВ в ожогиной свите изменяется в широких пределах и распределение по разрезу контролируется составом пород и, прежде всего, примесью углистого материала (табл.1). Максимальные содержания С<sub>орг</sub> установлены в верхней части свиты в углисто-глинистых породах до 5,97 % и углистых аргиллитах до 9,99 %. Соответственно, в этих образцах отмечаются максимальные значения выхода битумоида до десятых долей процента 0,229–0,353 %. В нижней части свиты, представленной алевролитами, алевритистыми и мелкозернистыми песчаниками, на порядок ниже содержание С<sub>орг</sub> от 0,37 до 1,37 % и выход битумоида – сотые 0,025–0,040 % и даже тысячные доли процента 0,007–0,009 %.

Исходя из полученных данных, по ряду других геохимических параметров также можно просле-



**Рис. 1.** Схема расположения образцов (северо-западная часть Индигино-Зырянского прогиба, Восточная Якутия). 1 – тектонические границы впадин и поднятий; 2 – границы депрессий и седловин; 3 – границы Зырянской впадины; 4 – зона надвигов; 5 – место расположения объекта; 6 – структурно-параметрические скважины; 7 – точки отбора образцов (а – образцы А.Ф. Сафронова, б – образцы В.В. Гайдука). АП – Алазейское поднятие; ИТА – Илин-Тасский антиклинорий; ИЗП – Индигино-Зырянский прогиб; МВ – Момская впадина

**Fig. 1.** Scheme of sample location (northwestern part of the Indigiro-Zyryansk trough, Eastern Yakutia). 1 – tectonic boundaries of depressions and uplifts; 2 – boundaries of depressions and saddles; 3 – boundaries of the Zyryansk depression; 4 – thrust zone; 5 – location of the object; 6 – structural-parametric wells. Sampling points: 7a – samples of A.F. Safronov; 7b – samples of V.V. Gaiduk. AP – Alazeya uplift; ITA – Ilin-Tas anticlinorium; IZP – Indigiro-Zyryansk trough; MV – Moma depression

дить присутствие двух групп образцов – одна из которых представлена образцами с существенным участием углистого материала и тяготеет к сингенетичным битумоидам, другая – алевролитами и песчаниками и по составу близка к смешанным разностям битумоидов со следами наложения эпибитумоидов (см. таблицу).

*В углистых аргиллитах и углисто-глинистых породах* особенности элементного, группового компонентного состава, химической структуры ХБ и их фракций, а также характер распределения реликтовых УВ определяются генетической принадлежностью к ОВ континентальных фаций с существенным преобладанием терраген-

**Геохимическая характеристика битумоидов верхнеюрских и нижнемеловых отложений (Индигино-Зырянский прогиб)**

**Geochemical characteristics of bitumoids from the Upper Jurassic and Low Cretaceous deposits (Indigiro-Zyryansky basin)**

Параметр Parameter	Нижний мел, ожогиная свита /МК <sub>2</sub> Low Cretaceous, Ozhoginskaya suite / МК <sub>2</sub>		Верхняя юра, бастакская свита / МК <sub>2</sub> Upper Jurassic, Upperbastakhskaya suite/ МК <sub>2</sub>
Литоология/ Lithology	Углисто-глинистые породы, углистые аргиллиты/ Coal-clay rocks, carbonaceous argillites	Алевритистые и мелкозернистые песчаники/ Silty and fine-grained sandstones	Темно-серые алевролиты и мелкозернистые песчаники/ Dark gray aleurolites and fine-grained sandstones
1	2	3	4
$C_{орг}, \% / C_{org}, \%$	3,73–9,90	0,37–2,82	0,16–3,68
$\alpha_{ХБ}, \% / \alpha_{ChB}, \%$	0,072–0,358	0,013–0,042	0,016–0,137
$\beta_{ХБ}, \% / \beta_{ChB}, \%$	1,9–2,3	0,5–1,7	1,3–5,5
Элементный состав ХБ, % Element composition ChB, %			
C	83,2–85,5	82,6–84,7	н/д
H	8,0–8,5	8,9–9,9	н/д
$\Sigma N, S, O$	8,4–8,9	5,4–6,6	н/д
Групповой компонентный состав ХБ, % Group-component composition ChB, %			
Масла (УВ) / Oils (HC)	32,3–42,2	43,0–55,1	47,5–66,4
Бензолные смолы / benzol resins/	10,1–16,2	12,2–22,5	14,1–20,8
Спиртобензолные смолы / Alcohol-benzol resins	13,5–20,7	17,6–24,6	15,6–31,5
$\Sigma$ смол / $\Sigma$ resins	23,6–36,9	29,8–47,1	29,7–52,3
Асфальтены / asphaltenes	21,0–44,1	4,9–20,1	2,8–9,6
Углеводородный состав, % на $\Sigma$ УВ Hydrocarbon composition, % on $\Sigma$ HC			
M-N / M-N	32,6	54,6–75,2	н/д
N-A / N-A	67,4	24,8–45,4	н/д
Структурно-групповой состав ХБ по методу ИКС, относительные коэффициенты поглощения $D'_v = D_v/D_{1460}$ Structural group composition of ChB by IR-spectrometry, relative coefficients absorption $D'_v = D_v/D_{1460}$			
$D'_{720}$ – длинных метиленовых цепей/ $D'_{720}$ – long methelene chains	0,14–0,16	0,12–0,20	0,19–0,27
$D'_{1600}$ – ароматических циклов/ $D'_{1600}$ – aromatic cycles	0,60–0,68	0,11–0,39	0,15–0,19 (0,19)
$D'_{1710}$ – карбонильных групп/ $D'_{1710}$ – carbonyl groups	0,42–0,78	0,23–0,35	0,21–0,41 (0,76)
$D'_{3300}$ – гидроксильных групп/ $D'_{3300}$ – hydroxyl groups	0,28–0,31	0,06–0,17	0,09–0,14

1	2	3	4
Содержание углерода в маслах, %			
Content carbon per oils, %			
$C_{\text{ароматический}} / C_{\text{aromatic}}$	46,8–62,8	12,9–17,5	н/д
$C_{\text{алифатический}} / C_{\text{aliphatic}}$	37,2–53,2	82,5–87,1	н/д
Распределение индивидуальных насыщенных УВ			
Distribution of individual saturated HC			
$\Sigma \text{н.к.} - \text{н}C_{20} / \Sigma \text{н}C_{21} - \text{к.к.}$	0,14–0,26	1,04–1,28	1,09–2,98
$\Sigma \text{b.b.} - \text{н}C_{20} / \Sigma \text{н}C_{21} - \text{f.b.}$			
Максимум н-алканов/ Maximum. n-alkanes	$\text{н}C_{21,23,25}$	$\text{н}C_{15,17,19}$	$\text{н}C_{13,15,16,18}$
Коэффициент нч/ч/ Coefficient odd/even	1,11–1,16	0,98–0,99	0,90–0,99
Изопреноиды/н-алканы/ Isoprenoids/n-alkanes	0,03–0,09	0,12–0,20	0,12–0,20
Пристан/фитан/ Pristan/phytan	1,10–1,28	2,56–2,57	0,61–2,07
$iC_{19}/nC_{17}$	1,32–2,05	0,50–0,91	0,34–0,61
$iC_{20}/nC_{18}$	0,49–0,78	0,21–0,36	0,17–0,71

Примечание. ХБ – хлороформенный битумоид; УВ – углеводороды.

Note. ChB — chloroform bitumoid; HC — hydrocarbons.

ного материала в составе исходного ОВ [3, 9, 10]. На это указывает однотипный ароматический характер ИК-спектров ХБ по всему разрезу свиты с доминированием полос поглощения (п.п.) ароматических структур, особенно четко выраженный в спектрах бензольных и спиртобензольных смол. В групповом составе установлено преобладание асфальто-смолистых компонентов, на УВ приходится 32,3–42,2 %. Большие вариации в их содержании и количестве кислородсодержащих групп и связей в химической структуре битумоидов могут свидетельствовать о присутствии в разрезе различных битуминозных разностей. Высокая степень окисленности бензольных и особенно спиртобензольных смол ( $D'_{1700} > D'_{1460}$ ) в отдельных образцах характерна для остаточных битумоидов, что можно рассматривать как результат процессов перемещения углеводородных флюидов по разрезу свиты. На остаточный характер битумоидов может указывать и преобладание спиртобензольных смол над бензольными (см. таблицу).

Для углеводородной части характерно высокое содержание углерода в ароматических циклах 46,8–62,8 % и присутствие полициклических ароматических УВ – фенантроновых, хризеновых, пиреновых и антраценовых. Особенности

распределения насыщенных УВ с преобладанием относительно высокомолекулярных гомологов ( $\Sigma \text{н.к.} - \text{н}C_{20} / \Sigma \text{н}C_{21} - \text{к.к.} = 0,36–0,84$ ) с максимумом распределения на  $\text{н}C_{21,23,25}$  и низким содержанием изопреноидов отражают преобладание террагенного ОВ в исходном материале (рис. 2).

В составе молекул-биомаркеров были идентифицированы бициклические сесквитерпаны ряда дримана и гомодримана (рис. 3), генезис которых тесно связан с терпенами высшей растительности [13, 14].

В составе насыщенных УВ не обнаружены 12- и 13-метилалканы. Соотношение содержания н-алканов с нечетным числом атомов углерода в молекуле к н-алканам с четным числом атомов (CPI), близкое к единице, указывает на термическую зрелость ОВ.

**В битумоидах алевролитов и песчаников** в сравнении с углистыми аргиллитами выше доля водорода в элементном составе (8,9–9,9 и 8,0–8,5 %, соответственно). Содержание масляных фракций в битумоидах песчаников составляет до 55,1 %. Тип ИК-спектров отличается заметно выраженным присутствием п.п. 720  $\text{см}^{-1}$  насыщенных УВ, представленных н-алканами, и

Ion 57.00 (56.70 to 57.70): BG5031K1. D

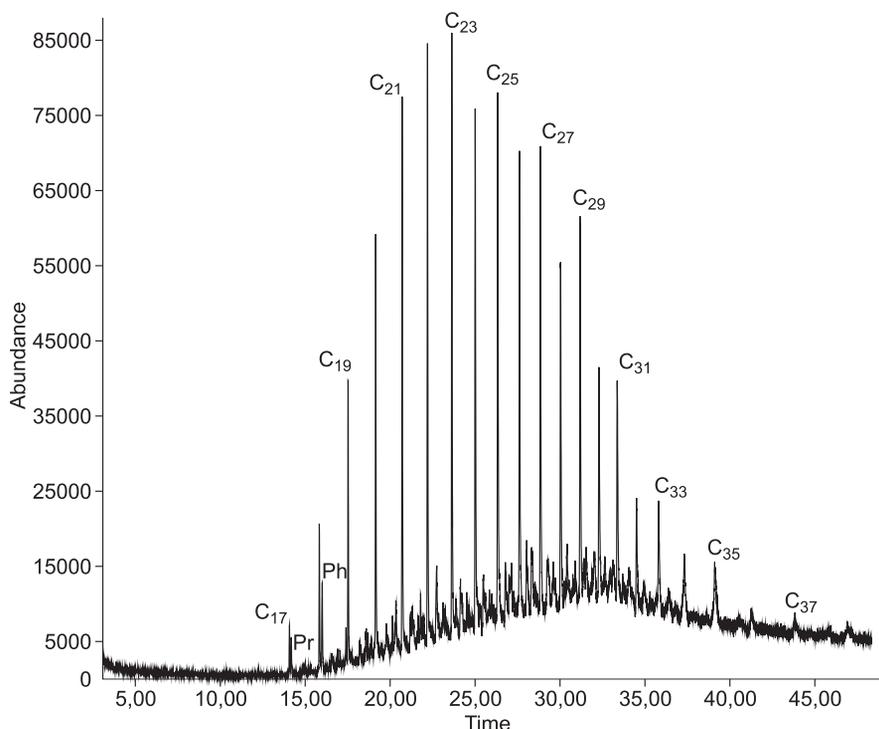


Рис. 2. Хромато-масс-фрагментограмма масляной фракции ХБ углистого аргиллита, нижнемеловые отложения

Fig. 2. GC-Mass Spectrometry of the oil fraction ChB carbonaceous mudstone from the Lower Cretaceous Deposits

меньшим – ароматических циклов ( $D'_{1600} = 0,20$  против 0,64 в углистых аргиллитах). Невысокие значения коэффициента битуминозности от 1,5 до 2,5 %, по-видимому, могут свидетельствовать о параавтохтонном характере битумоидов [11].

В углеводородном составе отчетливо прослеживается существенная доля насыщенных УВ в сравнении с углистыми аргиллитами (72,5 и 32,9 % соответственно). Более низкое содержание углерода в ароматических циклах масляных фракций 12,9–17,5 % в сравнении с 46,8–62,8 % в углистых аргиллитах может быть обусловлено более значительным участием водорослевого материала в смешанном составе исходного ОВ. Следует особо отметить, что в битумоидах были обнаружены ванадиловые порфириновые комплексы от 20 до 40 мг/100 г, что сопоставимо с содержанием в древних венд-кембрийских нефтях Непско-Ботуобинской НГП и значительно ниже в сравнении с битумоидами Куонамской горючесланцевой формации [15, 16]. Интересен сам факт присутствия подобных структур в ОВ континентальных фаций, в которых условия преобразования осадков неблагоприятны для сохранения тетрапиррольных пигментов, что важ-

но для выяснения условий реконструкции преобразования исходного ОВ меловых отложений. Порфириновые комплексы, извлекаемые из гумусовых углей, совершенно уникальны и связаны с Ga, Fe, Mn [17] и непохожи на те, которые присущи планктоногенному ОВ морских фаций и нефтям, генетически связанным с этим типом ОВ. Присутствие ванадилпорфиринов в битумоидах меловых отложений ожогинской и вышезалегающих силяпской и буоркемюской свитах нижнего мела указывает прежде всего на то, что преобразование захороненных осадков происходило в анаэробной среде, обеспечивающей хорошую сохранность исходного материала. Кроме того, сам факт присутствия этих соединений свидетельствует об участии аквагенного материала в исходном ОВ, в случае террагенных разностей присутствовали бы металлоорганические комплексы с Ga, Fe, Mn [7, 18–20].

В распределении насыщенных УВ в сравнении с углистыми аргиллитами максимум n-алканов расположен в низкомолекулярной области на  $nC_{15-19}$ , заметно выше значения отношений  $\sum n.k.-nC_{20} / \sum nC_{21}-k.k.$  и изопреноиды/n-алканы (рис. 4). Такие особенности состава насыщенных

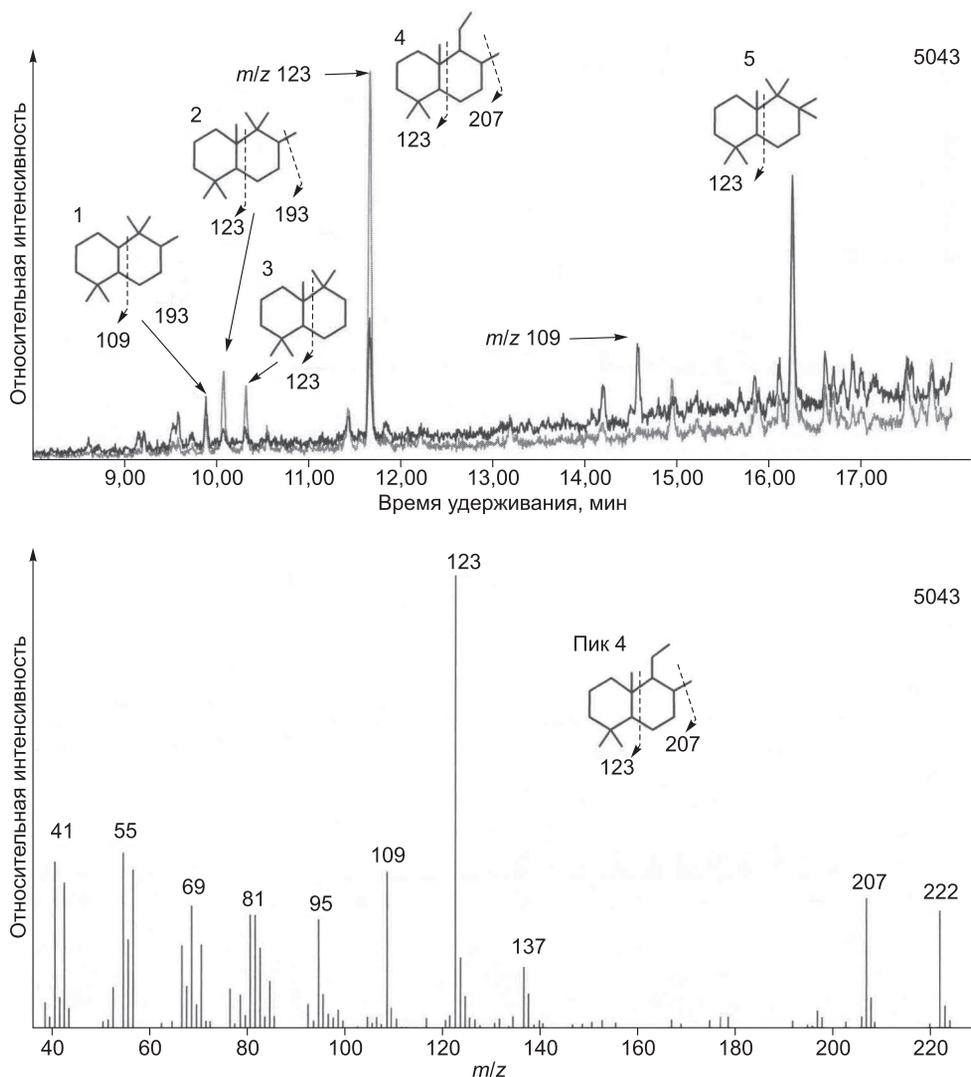


Рис. 3. Масс-хроматограммы распределения сесквитерпанов в битумоидах углистых аргиллитов, нижний мел

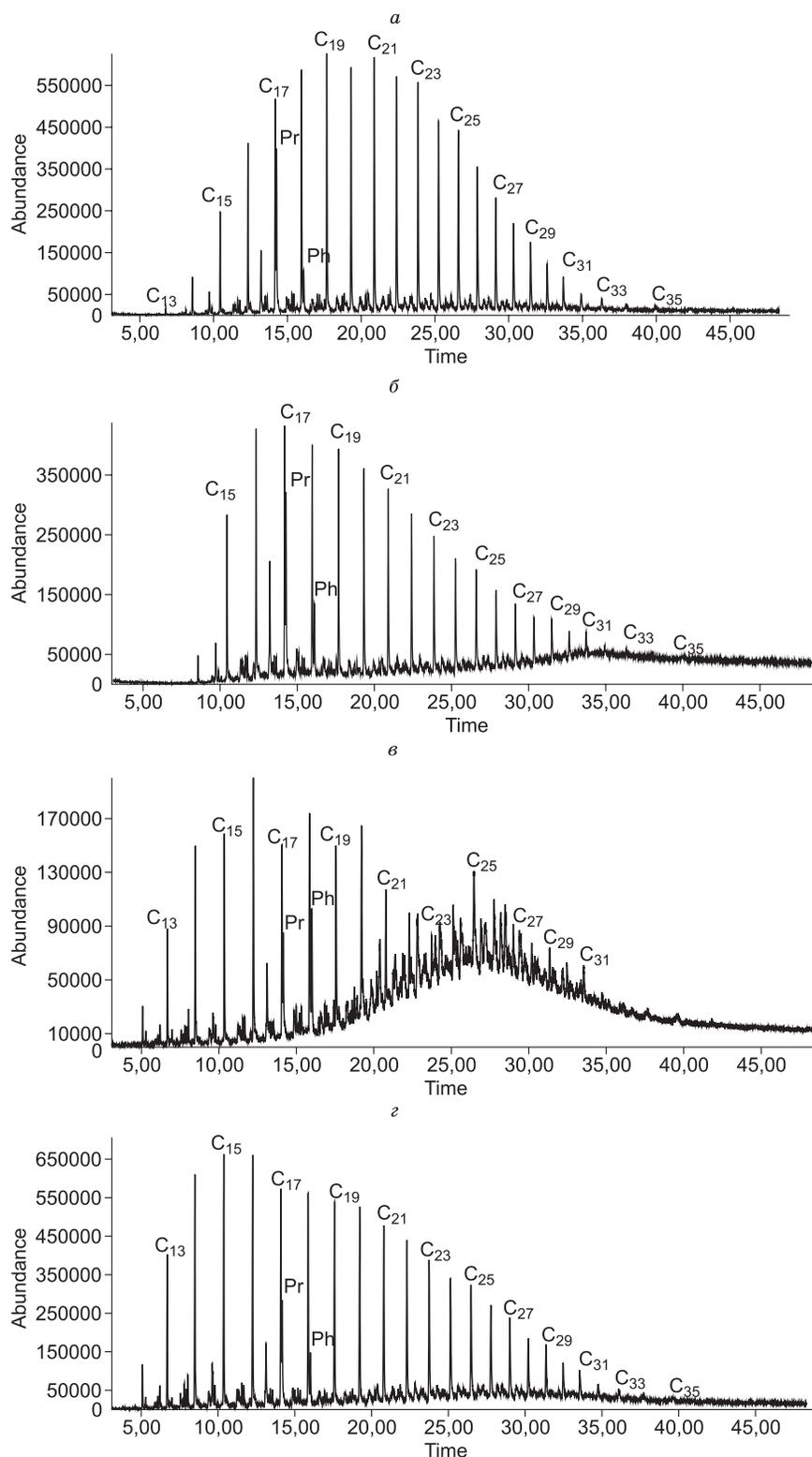
Fig. 3. GC-Mass Spectrometry distribution of sesquiterpanes in bitumoids of carbonaceous argillites from the Lower Cretaceous Deposits

ных УВ обусловлены участием аквагенного материала в исходном ОВ.

В то же время на особенности состава битумоидов ожогиной свиты могли повлиять и процессы перераспределения УВ за счет привноса углеводородных флюидов из нижележащей бастахской свиты. Осадконакопление в отложениях бастахской свиты происходило в морских и лагунах бассейнах в восстановительной и слабо восстановительной обстановке диагенеза. Исходное ОВ обогащено планктоногенным и водорослевым материалом с различной долей участия высшей континентальной растительности [2, 3, 5].

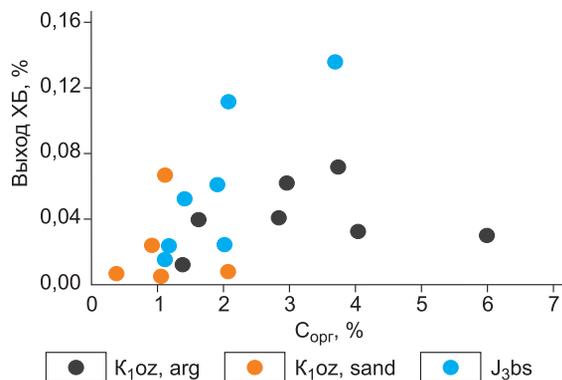
О смешанной природе исходного ОВ с преобладанием аквагенной составляющей свиде-

тельствуют и последние полученные нами результаты по геохимии ОВ верхнеюрских отложений верхнебастахской свиты в зоне форланда Индигиро-Зырянского прогиба [11]. Как видно из таблицы, по ряду геохимических параметров состав битумоидов отражает присутствие аквагенного ОВ. На это указывают особенности химической структуры битумоидов, в которой наряду с ароматическими циклами значительно участие алифатических групп и связей и существенно алифатический характер углеводородной части по типу ИК-спектров. Существенно алифатический характер битумоидной части ОВ можно рассматривать как свидетельство генерации породами данной свиты УВ нефтяного ряда.



**Рис. 4.** Хроматомасс-фрагментограммы масляных фракций битумоидов: *а* – темно-серый аргиллит, нижний мел, ожо-гинская свита; *б* – песчаник, нижний мел, ожогинская свита; *в* – темно-серый алевролит, верхняя юра, верхнебастакская свита; *г* – песчаник, верхняя юра, верхнебастакская свита

**Fig. 4.** GC-Mass Spectrometry of the oil fractions of bitumoids: *a* – dark gray argillite, the Lower Cretaceous, Ozhoginskaya Suite; *б* – sandstone, the Lower Cretaceous, Ozhoginskaya Suite; *в* – dark gray aleurolites, the Upper Jurassic, Upperbastakhskaya Suite; *г* – sandstone, the Upper Jurassic, Upperbastakhskaya Suite



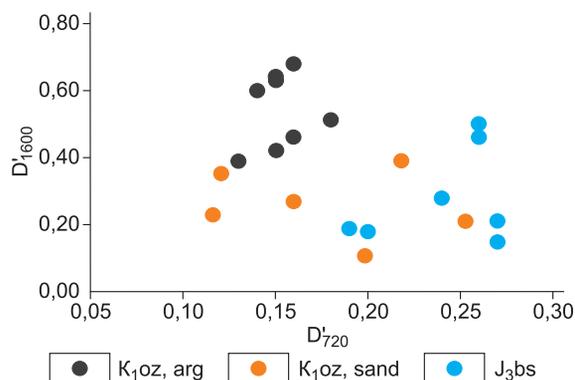
**Рис. 5.** Зависимость выхода битумоида –  $\alpha_{ХБ}$  от содержания  $C_{орг}$  в породах, отложения нижнего мела и верхней юры

**Fig. 5.** Dependence of the bitumoid yield –  $\alpha_{ChB}$  on the content of  $C_{org}$  in the rocks, the Lower Cretaceous and the Upper Jurassic deposits

По составу биомаркеров и особенностям их распределения вполне отчетливо отражается двойственная природа исходного ОВ. С одной стороны, как аквагенного, по характеру распределения насыщенных УВ с преобладанием низкомолекулярных n-алканов с максимумом на  $nC_{13-17}$  (см. рис. 4) и с другой – как террагенного по ароматическому типу углеродного скелета смол и асфальтенов и значительному присутствию полициклических ароматических УВ, близких по характеру распределения, но различающихся по их суммарному содержанию в образцах с различной долей присутствия углистых фрагментов. В составе полициклических УВ обнаружены фенантрен и его метил-, диметил-, триметилзамещенные гомологи, хризен, пирен, бензпирен, перилен.

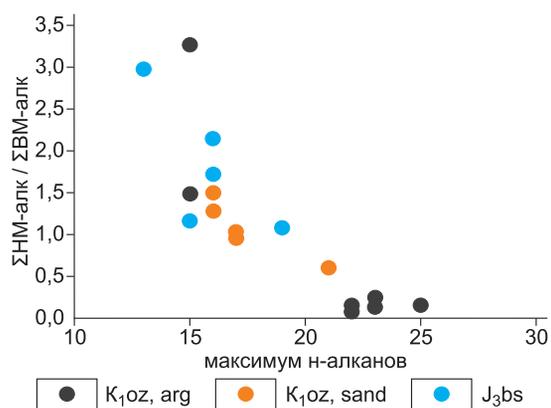
Состав и особенности распределения ароматических УВ зависят от природы исходного ОВ и в большой степени от присутствия террагенной составляющей [21, 22]. Интересно отметить, что, по материалам ряда исследователей, возможно образование полициклических аренов и планктоногенным ОВ в зависимости от условий накопления и геохимической обстановки преобразования ископаемого ОВ на стадиях диагенеза и катагенеза [23–26].

Полученные результаты были использованы при сравнении геохимических параметров по составу битумоидов пород из ожогиной свиты нижнего мела с бастахской – верхней юры (см. таблицу, рис. 5–7). Как видно из рисунков, по ряду



**Рис. 6.** Соотношение относительной оптической плотности поглощения ароматических циклов –  $D'_{1600}$  и длинных метиленовых цепей –  $D'_{720}$  в химической структуре битумоидов, отложения нижнего мела и верхней юры

**Fig. 6.** Ratio of relative absorption optical density of aromatic cycles –  $D'_{1600}$  and long methylene chains –  $D'_{720}$  in the chemical structure of bitumoids, the Lower Cretaceous and the Upper Jurassic deposits



**Рис. 7.** Изменение отношения  $\Sigma НМ$ -n-алканов/ $\Sigma ВМ$ -n-алканов ( $\Sigma n.c.-nC_{20}/\Sigma nC_{21-c.c.}$ ) в зависимости от характера распределения n-алканов, отложения нижнего мела и верхней юры

**Fig. 7.** Ratio change  $\Sigma LM$ -n-alkanes/ $\Sigma HM$ -n-alkanes ( $\Sigma n.c.-nC_{20}/\Sigma nC_{21-c.}$ ) depending on the feature of n-alkanes distribution, the Lower Cretaceous and the Upper Jurassic deposits

геохимических параметров битумоиды ожогиной свиты из алевролитистых и мелкозернистых песчаников (без заметных включений углистых фрагментов) попадают в поле значений для битумоидов из алевролитов и песчаников верхнебастахской свиты. Это относится к соотношению выхода битумоидов  $\alpha_{ХБ}$  к  $C_{орг}$  (см. рис. 5), степени ароматичности по соотношению  $D'_{1600}/D'_{720}$  (см. рис. 6), а также отношению низкомолекулярных n-алканов к высокомолекулярным (см. рис. 7) и ряду других параметров.

В то же время битумоиды из углистых аргиллитов ожогиной свиты по этим показателям заметно различаются.

Из геохимической характеристики образцов видно, что накопление осадков в ожогиной свите происходило в прибрежно-морских условиях, характерных для смешанного ОВ с различным по разрезу соотношением террагенной (континентальной флоры) и аквагенной (планктоногенно-водородослевого материала) составляющих. Наибольшая обогащенность исходного ОВ планктоногенно-водородослевым материалом прослеживается для нижней части свиты, представленной переслаиванием алевролитовых (70 %) и аргиллитовых (30 %) разностей пород, и заметно уменьшается вверх по разрезу в карбонатно-глинистых и углисто-глинистых породах с прослоями и линзами каменного угля.

Следует отметить, что в работах [27, 28] по результатам геохимических исследований, выполненных по эталонному разрезу верхней юры и нижнего мела Анабарского залива, были выделены три биогеохимических горизонта с различным распределением УВ-биомаркеров: терпановый, диастереновый и гопановый. В низовьях р. Оленек выделены два уровня: нижний в объеме титона-низов бореального берриаса (диастереновый) и верхний: бореальный берриас-валанжин (гопановый), которым свойственно преимущественное распространение разных групп УВ-биомаркеров. Полученные данные отражают полифациальные условия осадконакопления в зависимости от регрессии и трансгрессии моря, что сопровождалось сменой литологического состава осадков, фаунистических и палинологических ассоциаций и, соответственно, типовых наборов УВ-биомаркеров. Авторы считают, что вариации в распределении однотипных УВ-биомаркеров и выделение на их основе геохимических горизонтов могут служить определенным коррелятивом для реконструкций геохимических обстановок формирования осадков и их последующих преобразований [28].

На рассматриваемой территории Индигиро-Зырянского прогиба полифациальные условия осадконакопления вернеюрско-нижнемеловых отложений обусловили формирование различных фациально-генетических типов рассеянного органического вещества от террагенно-аквагенного в прибрежно-морских отложениях верхнего лейаса до аквагенно-террагенного и террагенного в континентальных отложениях нижнего мела.

## Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено сходство геохимических параметров ожогиной свиты нижнего мела с верхнебастакской свитой верхней юры, особенности состава битумоидов которой предопределены преобладанием планктоногенно-водородослевого материала, способного генерировать большое количество жидких углеводородов. В составе ископаемого ОВ ожогиной свиты нижнего мела с различным по разрезу соотношением террагенной и аквагенной составляющих также было существенным участие водородослевого материала. Это повышает оценку нефтегенерационного потенциала ОВ нижнемеловых отложений наряду с высоким газогенерационным потенциалом, присущим террагенному ОВ. Учитывая пребывание нижнемеловых отложений в условиях главной фазы нефтеобразования и главной зоны газообразования, можно предположить здесь генерацию наряду с газообразными и жидких углеводородных флюидов, а следовательно, формирование нефтяных оторочек в прогнозируемых газоконденсатных залежах, как и в газоконденсатных залежах Хапчгайских месторождений. Присутствие в разрезе верхней части верхнебастакской подсвиты, а также по всему разрезу нижнего мела пластов песчаников с удовлетворительными коллекторскими свойствами указывают на возможность формирования зон нефтегазонакопления.

## Список литературы / References

1. Черский Н.В. Перспективы нефтегазоносности северо-востока Якутской АССР. *Геология газовых месторождений*. М.: ГОСИНТИ; 1959: 26–62.  
Chersky N.V. Prospects for the oil and gas potential of the northeast of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic. *Geology of gas fields*. Moscow: GOSINT; 1959: 26–62. (In Russ.)
2. Чочиа Н.Г., Баранова З.Е., Вольнов Д.А. Перспективы нефтегазоносности Зырянского прогиба. Тектоника и нефтегазоносность Востока СССР: *Труды Всесоюзного нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного института (ВНИГРИ)*; Вып. 309. Л.; 1972:133–150  
Chochia N.G., Baranova Z.E., Volnov D.A. Prospects for the oil and gas potential of the Zyryansky trough. *Tectonics and oil and gas content of the east of the USSR: Proceedings of VNIGRI, Issue 309*. Leningrad; 1972: 133–150. (In Russ.)
3. Иванов В.В., Семенов Г.А., Гаврилов Б.П. Литолого-битуминералогическая характеристика юрских и меловых отложений Индигиро-Зырянского проги-

ба. *Проблемы нефтегазоносности Северо-Востока СССР: Труды Северо-Восточного комплексного института; Вып. 49.* Магадан; 1973:108–129.

Ivanov V.V., Semenov G.A., Gavrilov B.P. Lithological-bituminological characteristics of the Jurassic and Cretaceous deposits of the Indigiro-Zyryansky trough. *Problems of oil and gas content in the North-East of the USSR: Proceedings of North-East Interdisciplinary Institute, Issue 49.* Magadan; 1973:108–129. (In Russ.)

4. Иванов В.В., Клубов Б.А. *Нафтиды и нафтотиды Северо-Востока СССР.* М.: Наука; 1979.147 с.

Ivanov V.V., Klubov B.A. *Naphthides and naphthoids of the North-East of the USSR.* М.: Nauka. 1979. 147 (In Russ.)

5. Гайдук В.В. *Реконструкция структуры надвиговых поясов и локальная оценка их нефтегазоносности на примере Индигиро-Зырянского, Предверхо-янского прогибов и Нюйско-Джербинской впадины:* Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Новосибирск. 1995. 37 с.

Gaiduk V.V. *Reconstruction of the structure of thrust belts and local assessment of their oil and gas content on the example of the Indigiro-Zyryansky, Predverkhoyansky troughs and the Nyuysko-Dzherba depression:* Abstr... Diss. Dr.Sci., Novosibirsk. 1995. 37 (In Russ.)

6. Сяндюков И.Ш., Гайдук В.В. Историко-генетические предпосылки нефтегазоносности Индигиро-Зырянского прогиба. *Нефтегазоносность и вопросы освоения месторождений нефти и газа Якутии: Сборник научных трудов АН СССР, Сиб. отд-ние, Якут. ин-т геол. наук.* Якутск: Якут. науч. центр СО АН СССР; 1990:39–49.

Syundyukov I.Sh., Gaiduk V.V. Historical and genetic prerequisites for the oil and gas content of the Indigiro-Zyryansky trough. *Oil and gas content and development issues of oil and gas fields in Yakutia: Proceedings of Academy of Sciences of the USSR, Siberian Branch, Yakut Geology Institute.* Yakutsk: Yakut Scientific Centre, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1990: 39–49. (In Russ.)

7. Сивцев А.И., Александров А.Р., Алексеев В.А. Литологическая характеристика северо-западной части Индигиро-Зырянского прогиба. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции, г. Якутск, 18–20 апреля 2018 года.* Т. 2. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2018:175–178.

Sivtsev A.I., Aleksandrov A.R., Alekseev V.A. Lithological characteristics of the northwestern part of the Indigiro-Zyryansky trough. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 8th All-Russian Scientific and Practical Conference, Yakutsk, April 18–20, 2018.* V. 2. Yakutsk: Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018: 175–178. (In Russ.)

8. Сивцев А.И., Чалая О.Н., Зуева И.Н. Верхнеюрско-нижнемеловой нефтегазоносный комплекс вос-

тока Сибирской платформы. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири.* 2018;1(33):81–87.

Sivtsev A.I., Chalaya O.N., Zueva I.N. Upper Jurassic – Lower Cretaceous petroleum complex of the Eastern Siberian Platform. *Geology and Mineral Resources of Siberia.* 2018;1(33):81–87. (In Russ.)

9. Иванов В.В., Гревцов А.В., Щербань О.В. *Седи-кахиты осадочных бассейнов Северо-Восточной Азии.* М.: Наука; 1988.168 с.

Ivanov V.V., Grevtsov A.V., Shcherban O.V. *Sediqa-hites of sedimentary basins of Northeast Asia.* Moscow: Nauka; 1988. 166 p. (In Russ.)

10. Каширцев В.А., Гайдук В.В., Чалая О.Н., Зуева И.Н. Геохимия биомаркеров и катагенез органического вещества меловых и кайнозойских отложений Индигиро-Зырянского прогиба (северо-востока Якутии). *Геология и геофизика.* 2012;53(8):1027–1039.

Kashirtsev V.A., Gaiduk V.V., Chalaya O.N., Zueva I.N. Geochemistry of biomarkers and catagenesis of organic matter in the Cretaceous and Cenozoic deposits of the Indigiro-Zyryansky trough (northeast of Yakutia). *Russian Geology and Geophysics.* 2012;53(8):1027–1039. (In Russ.)

11. Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Гайдук В.В., Сафронов А.Ф. Геохимия органического вещества меловых отложений Индигиро-Зырянского прогиба. *Меловая система России и Ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы Седьмого Всероссийского совещания с международным участием, г. Владивосток, 10–15 сентября 2014 г.* Владивосток: Дальнаука; 2014: 127–131.

Zueva I.N., Chalaya O.N., Kashirtsev V.A., Gaiduk V.V., Safronov A.F. Geochemistry of organic matter of Cretaceous deposits of the Indigirka-Zyryanka basin. *Cretaceous system of Russia and neighboring countries: problems of stratigraphy and paleogeography: Proceedings of the 7th All-Russian meeting with international participation, Vladivostok, September, 10–15, 2014.* Vladivostok: Dalnauka; 2014:127–131. (In Russ.)

12. Петров Ал. А., Головкина Л.С., Русинова Г.В. *Масс-спектры нефтяных углеводородов. Справочник (атлас).* М.: Недра; 1986. 312 с.

Petrov Al. A., Golovkina L.S., Rusinova G.V. *Mass spectra of petroleum hydrocarbons. Handbook (atlas).* Moscow: Nedra; 1986. 312 p. (In Russ.)

13. Bendoraitis J.G. Hydrocarbons of biogenic origin petroleum-aromatic triterpenes and bicyclic sesquiterpenes. *Advances in Organic Geochemistry.* Paris: Editions Technip; 1973:209–224.

14. Alexander R., Kagi R., Noble R. Identification of the bicyclic sesquiterpenes, drimane and eudesmane in petroleum. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications.* 1983:226–228.

15. Каширцев В.А., Сафронов А.Ф., Изосимова А.Н., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Трущелева Г.С., Лифшиц С.Х., Карелина О.С. *Геохимия нефтей востока Сибирской платформы.* Якутск: ЯНЦ СО РАН; 2009. 180 с.

Kashirtsev V.A., Safronov A.F., Izosimova A.N., Chalaya O.N., Zueva I.N., Trushcheleva G.S., Lifshits S.Kh., Karelina O.S. *Geochemistry of oils in the east of the Siberian platform*. Yakutsk: Yakut Scientific Centre SB RAS; 2009. 180 p. (In Russ.)

16. Зуева И.Н., Чалая О.Н. Микроэлементы и металлопорфирины как показатели генетической природы органического вещества и нефтидов. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции, в 2-х томах, г. Якутск, 10–12 апреля 2019 г.* Т. 1. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2019:225–228.

Zueva I.N., Chalaya O.N. Trace elements and metalloporphyrins as indicators of the genetic nature of organic matter and naphthides. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 9th All-Russian scientific and practical conference, Yakutsk, April 10–12, 2019*. V. 1. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2019:225–228 (In Russ.)

17. Baker E.W., Louda I.W. Porphyrins in the geological records. *Biological markers in the sedimentary records*. Amsterdam: 1986:125–225.

18. Пуанова С.А. Микроэлементы нефтидов в процессе онтогенеза углеводородов в связи с нефтегазоносностью: Дис. ... докт. геол.-минер. наук. М.; 2017. 278 с.

Punanova S.A. *Trace elements of naphthides in the process of hydrocarbon ontogenesis in connection with oil and gas potential*: Diss. ... Doct. Sci. Moscow; 2017. 278. (In Russ.)

19. Пуанова С.А. Микроэлементы нефтидов нефтегазоносных бассейнов. *ДАН*. 2019;488(5):534–538. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885534-538>

Punanova S.A. Trace elements of naphthides of oil and gas basins. *DAN*. 2019;488(5):534–538. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-56524885534-538>

20. Пуанова С.А. Оценка микроэлементного состава нефтидов – необходимый этап нефтехимических исследований. *Деловой журнал Neftegas.ru*. 2022; 122(2):56–63.

Punanova S.A. Evaluation of the microelement composition of naphthides is a necessary stage in petrochemical research. *Neftegas.ru*. 2022;2(122):56–63. (In Russ.)

21. Hauk V., Adam P., Trendel J.M. Isoarborinol through geological times: evidence for its presence in the Permian and Triassic. *Organic Geochemistry*. 1995;23: 91–93.

22. Borrego A.G., Blanco C.G., P'ttmann W. Geochemical significance of the aromatic hydrocarbon distribution in the bitumens of the Puertollano oil shales, Spain. *Organic Geochemistry*. 1997;26:219–228.

23. Azevedo D.A., Aquino Neto F.R., Simoneit B. R. T., Pinto A. C. Novel series of tricyclic aromatic terpanes characterized Tasmanian tasmanite. *Organic Geochemistry*. 1992;18:9–16.

24. Парфенова Т.М., Коровников И.В., Эдер В.Г., Меленевский В.Н. Органическая геохимия синской

свиты нижнего кембрия (северный склон Алданской антеклизы). *Геология и геофизика*. 2017;(5):723–738. <https://doi.org/10.15372/GiG20170504>

Parfenova T.M., Korovnikov I.V., Eder V.G., Melenevsky V.N. Organic geochemistry of the Lower Cambrian Sinyaya Formation (northern slope of the Aldan antecline). *Russian Geology and Geophysics*. 2017;(5):723–738. <https://doi.org/10.15372/GiG20170504>. (In Russ.)

25. Парфёнова Т.М. Геохимия стеранов и триароматических стероидов битумоидов иниканской свиты кембрия (юго-восток Сибирской платформы). *Химия нефти и газа: Материалы IX Международной конференции, г. Томск, 22–25 сентября 2015 г.* Томск: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН; 2015:69–74.

Parfenova T.M. Geochemistry of steranes and triaromatic steroids of bitumoids of the Inikan Formation of the Cambrian (southeast of the Siberian Platform). *Chemistry of Oil and Gas: Proceedings of the International Conference, Tomsk, September 22–25, 2015*. Tomsk: Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science; 2015:69–74. (In Russ.)

26. Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Головки А.К., Никитенко Б.Л., Зуева И.Н., Чалая О.Н. Биомаркеры-фенантрены в органическом веществе докембрийских и фанерозойских отложений и в нефтях Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1720–1729. <https://doi.org/10.15372/GiG20181013>

Kashirtsev V.A., Parfenova T.M., Golovko A.K., Nikitenko B.L., Zueva I.N., Chalaya O.N. Phenantrenes biomarkers in organic matter of Precambrian and Phanerozoic deposits and in oils of the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1720–1729. <https://doi.org/10.15372/GiG20181013>

27. Каширцев В.А., Никитенко Б.Л., Пещевская Е.Б., Фурсенко Е.А. Биогеохимия и микрофоссилии верхней юры и нижнего мела Анабарского залива моря Лаптевых. *Геология и геофизика*. 2018; 59(4):481–501. <https://doi.org/10.15372/GiG20180405>

Kashirtsev V.A., Nikitenko B.L., Peshchevitskaya E.B., Fursenko E.A. Biogeochemistry and microfossils of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous, Anabar Bay, Laptev Sea. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;59(4):481–501. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG20180405>

28. Каширцев В.А., Никитенко Б.Л., Пещевская Е.Б., Фурсенко Е.А., Шевченко Н.П. Органическая геохимия и микрофоссилии верхней юры и нижнего мела низовьев р. Оленек (северо-восточное обрамление Сибирской платформы, Арктическая Сибирь). *Геология и геофизика*. 2020;61(12):1716–1734. <https://doi.org/10.15372/GiG2020131>

Kashirtsev V.A., Nikitenko B.L., Peshchevitskaya E.B., Fursenko E.A., Shevchenko N.P. Organic geochemistry and microfossils of the Upper Jurassic and Lower Cretaceous strata in the lower reaches of the Olenek River (northeastern framing of the Siberian platform, Arctic Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(12):1716–1734 (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2020131>

*Об авторах*

ЗУЕВА Ираида Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, ResearcherID: J-9373-2018, РИНЦ AuthorID: 64320, e-mail: [inzu@ipng.ysn.ru](mailto:inzu@ipng.ysn.ru)

ЧАЛАЯ Ольга Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, ResearcherID: J-9329-2018, e-mail: [oncha@ipng.ysn.ru](mailto:oncha@ipng.ysn.ru)

КАШИРЦЕВ Владимир Аркадьевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, ResearcherID: N-1655-2014, РИНЦ AuthorID: 60908, e-mail: [KashirtcevVA@ipgg.sbras.ru](mailto:KashirtcevVA@ipgg.sbras.ru)

ГЛАЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, ResearcherID: J-9714-2018, РИНЦ AuthorID: 232039, e-mail: [glyaz1408@mail.ru](mailto:glyaz1408@mail.ru)

ЛИФШИЦ Сара Хаимовна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>, ResearcherID: K-1438-2018, e-mail: [shlif@ipng.ysn.ru](mailto:shlif@ipng.ysn.ru)

*About the authors*

ZUEVA, Iraida Nikolaevna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, ResearcherID: J-9373-2018, RISC AuthorID: 64320, e-mail: [inzu@ipng.ysn.ru](mailto:inzu@ipng.ysn.ru)

CHALAYA, Olga Nikolaevna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, ResearcherID: J-9329-2018, e-mail: [oncha@ipng.ysn.ru](mailto:oncha@ipng.ysn.ru)

KASHIRCEV, Vladimir Arkadievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding member of RAS, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, ResearcherID: N-1655-2014, RISC AuthorID: 60908, e-mail: [KashirtcevVA@ipgg.sbras.ru](mailto:KashirtcevVA@ipgg.sbras.ru)

GLYAZNETSOVA, Yuliya Stanislavovna, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, ResearcherID: J-9714-2018, RISC AuthorID: 232039, e-mail: [glyaz1408@mail.ru](mailto:glyaz1408@mail.ru)

LIFSHITS, Sara Khaimovna, Cand. Sci. (Chem.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>, ResearcherID: K-1438-2018, e-mail: [shlif@ipng.ysn.ru](mailto:shlif@ipng.ysn.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 21.07.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 03.08.2023*

*Принята к публикации / Accepted 09.08.2023*

## *Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение*

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

Оригинальная статья

### **Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии**

**С. П. Варламов<sup>1,✉</sup>, Ю. Б. Скачков<sup>1</sup>, П. Н. Скрябин<sup>1</sup>, В. И. Балута<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Российская Федерация

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

#### **Аннотация**

Представлены результаты 42-летнего мониторинга на стационаре «Чабыда» термического состояния мерзлотных ландшафтов при современном потеплении климата. Показана эволюция изменчивости параметров теплового состояния грунтов: температуры грунтов на подошве сезонно-талого слоя и в слое годовых теплооборотов, глубины сезонного протаивания. Многолетняя изменчивость среднегодовой температуры грунтов, испытывая значительные межгодовые и короткопериодные колебания, имеет разнонаправленную тенденцию с доминированием потепления. Основным регулирующим фактором термического состояния мерзлотных ландшафтов являются короткопериодные колебания режима снегонакопления. Глубина сезонного протаивания, несмотря на существенные межгодовые колебания, реагирует на потепление климата разнонаправленными тенденциями, ее увеличения или уменьшения статистически незначимы. Проведены статистические исследования временных рядов наблюдений. Выявлены корреляционные связи между элементами климата (температура воздуха, сумма осадков, среднезимняя высота снежного покрова, продолжительность зимнего и летнего сезонов) и связи между параметрами температурного режима грунтов ( $T_g$ ,  $T_0$ ,  $\zeta$ ) с элементами климата. Результаты исследований термического состояния грунтов можно распространить на однотипные ландшафты региона, а также они могут быть использованы при моделировании процессов теплообмена в естественных ландшафтах и разработке методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем.

**Ключевые слова:** криолитозона, многолетнемерзлые грунты, температура, глубина сезонного протаивания, мониторинг, динамика

**Финансирование.** Сбор и систематизация данных натурного исследования проведены в рамках НИОКТР (№ 122011800062-5); анализ данных и подготовка статьи осуществлены за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-61-10032).

**Для цитирования:** Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н., Балута В.И. Многолетняя изменчивость термического состояния верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):398–414. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

Review article

### **Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia**

**S. P. Varlamov<sup>1,✉</sup>, Yu. B. Skachkov<sup>1</sup>, P. N. Skryabin<sup>1</sup>, V. I. Baluta<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

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

#### **Abstract**

The results of the 42-year monitoring of the thermal state of permafrost landscapes in modern climate warming conditions at the “Chabyda” observation station (Central Yakutia) are presented. We studied the evolution of the variability

of soil thermal state parameters: the temperature of soils on the sole of the seasonally shallow layer and in the layer of annual heat rotations, and the depth of seasonal thawing. The long-term variability of the average annual soil temperature, experiencing significant interannual and short-term fluctuations, has a multidirectional trend, with warming dominating. The main factors regulating the thermal state of permafrost landscapes are the short-period fluctuations in the snow accumulation regime. Despite significant interannual fluctuations, the depth of seasonal thawing responded to climate warming with multidirectional trends, and its increase or decrease was statistically insignificant. We performed a statistical analysis of the observation time series revealing correlations between climate elements (air temperature, total precipitation, average winter snow depth, duration of winter and summer seasons) and relationships between soil temperature regime parameters ( $T_{\xi}$ ,  $T_0$ ,  $\xi$ ) with climate elements. The results of these studies on the thermal state of soils can be applied to homogeneous landscapes in this region. They can also be used to model heat transfer processes in natural landscapes and develop hybrid intelligence methods for diagnosing the state of infrastructure facilities in the Far North based on high-performance computing systems.

**Keywords:** cryolithozone, permafrost soils, temperature, depth of seasonal thawing, monitoring, dynamics

**Funding.** Collection and systematization of the field research data were conducted within the framework of the research project (number 122011800062-5); data analysis and preparation of the article were funded by the Russian Science Foundation (grant number 23-61-10032).

**For citation:** Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Baluta V.I. Long-term variability of the thermal state in the upper horizons of the cryolithozone in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):398–414. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-398-414>

## Введение

В связи с развитием исследований по изучению современного потепления климата возросло внимание к работам, рассматривающим теоретические и прикладные проблемы реакции криолитозоны в разных регионах на эти изменения. Такие исследования охватывают широкий круг задач, включая эволюцию теплового состояния многолетнемерзлых грунтов в естественных условиях и при их нарушении. Это стало одним из приоритетных направлений геокриологических исследований, имеющих важное научное и практическое значение не только в России, но и за рубежом.

В последние десятилетия в Центральной Якутии отмечаются существенные климатические изменения [1], а так как этот регион является наиболее густонаселенным и перспективным для сельскохозяйственного и промышленного развития в Якутии, важно знать закономерности реакции многолетнемерзлых грунтов на современное потепление.

В регионе все шире проводится строительство трубопроводов, железных и автомобильных дорог, линий электропередач, которое неизбежно сопровождается значительными нарушениями природных условий. Антропогенные воздействия различного типа и масштаба (вырубка леса, удаление растительности, отсыпка насыпи и т. д.) на фоне современного потепления климата приводят к изменению геокриологических условий, в том числе теплового состояния литогенной основы ландшафтов, и развитию негативных

криогенных процессов, угрожающих устойчивости сооружений. Именно с изучением динамики мерзлотных условий связаны многолетние экспериментальные исследования, которые Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, начиная с 1981 г., проводит на стационаре «Чабыда».

Основной целью работы является оценка тепловой реакции мерзлотных ландшафтов на современное потепление климата. Для выполнения работ решались следующие задачи: маршрутное обследование ландшафтных условий территории, выбор объектов, организация системы наблюдательной сети, проведение многолетних режимных наблюдений на мониторинговых площадках, анализ данных многолетних наблюдений метеостанций и экспериментальных данных, проведение статистических исследований временных рядов наблюдений, обобщение полученных материалов.

## Развитие геотемпературного мониторинга

В 1950-е и 1960-е гг. более детальные и комплексные теплофизические наблюдения за формированием теплового режима грунтов под руководством Н.С. Иванова [2] были организованы по улучшенной методике на экспериментальных площадках Северо-восточного отделения Института мерзлотоведения.

Локальные и региональные закономерности формирования теплового режима грунтов наиболее детально выявлены при широком применении сезонных стационарных методов исследований [3, 4]. В 1969–1979 гг. на теплобалансовом

стационаре «Якутск» выполнено круглогодичное изучение влияния техногенных воздействий (удаление снежного и дернового покровов, укладка асфальтового, бетонного, пенопластового и пленочного покровов) на теплообмен грунтов с атмосферой [5, 6]. В 1978–1980 гг. теплобалансовые исследования проведены в районе Якутска, на подтапливаемой территории р. Лена (стационар «Зеленый Луг»), с целью изучения формирования теплового режима грунтов и намывной насыпи для использования их в качестве оснований сооружений [7].

Инженерно-геокриологические исследования широко развернулись в связи с прокладкой и эксплуатацией газопровода Таас Тумус–Якутск. Влияние вырубки леса на междуречье Кенкеме–Ханчалы в первые 3–4 года на формирование среднегодовой температуры грунтов изучено С.А. Замолотчиковой и В.Н. Смирновой [8]. Количественная оценка воздействия нарушения покровов на температурное поле горных пород выполнена по результатам исследования на стационаре «Суптурган» на Лено-Вилуйском междуречье [9]. В 1968 г. проведены мерзлотные исследования по трассе газопровода Таас Тумус–Якутск на участке междуречья Ханчалы–Кенкеме [10]. Изменения геокриологических условий исследованы на участке газопровода на водоразделах рек Ханчалы–Чакья–Кенкеме [11]. Оценка изменения геокриологических условий, включая тепловое состояние грунтов трассы газопровода Таас Тумус–Якутск, проведена в 1984–1985 гг. [12].

Методом математического моделирования был составлен прогноз температурного режима грунтов Якутии с учетом различных естественных и техногенных изменений природных условий: потепления климата, удаления напочвенного покрова, изменения мощности снежного покрова и замены грунта [13].

В 1990-е гг. по международным программам «GEMEX-GAME», «CREST», «JST» совместных российско-японских и российско-голландских научных проектов на стационарах «Спасская Падь» и «Нэлэгэр» были начаты режимные экспериментальные исследования. На основе этих работ изучается многолетняя динамика температуры почвогрунтов и верхних горизонтов многолетнемерзлых пород, влажностного режима почв, глубины сезонного протаивания, водно-теплового баланса и углеродных потоков [14].

Динамика теплового состояния мерзлотных ландшафтов после техногенных воздействий изучается с 1981 г. на полигоне «Умайбыт» в 80 км к югу от г. Якутск [15]. С 1989 г. термометрические наблюдения на вырубках и гарях разных лет проводятся в межлассном типе местности на полигоне «Юкэчи» [14].

Итоги исследований эволюции термического состояния грунтов за период от III Международного геофизического года (1957/59) до IV Международного полярного года (2007/08) на территории России подведены А.В. Павловым [16]. В.Е. Романовский и др. [17] оценили тепловое состояние криолитозоны России за последние три десятилетия. Изменение термического режима грунтов Центральной Якутии в естественных и нарушенных условиях освещено в работах С.П. Варламова и др. [18–21], С.П. Варламова и П.Н. Скрыбина [22, 23], Ю.Б. Скачкова, П.Н. Скрыбина, С.П. Варламова [24].

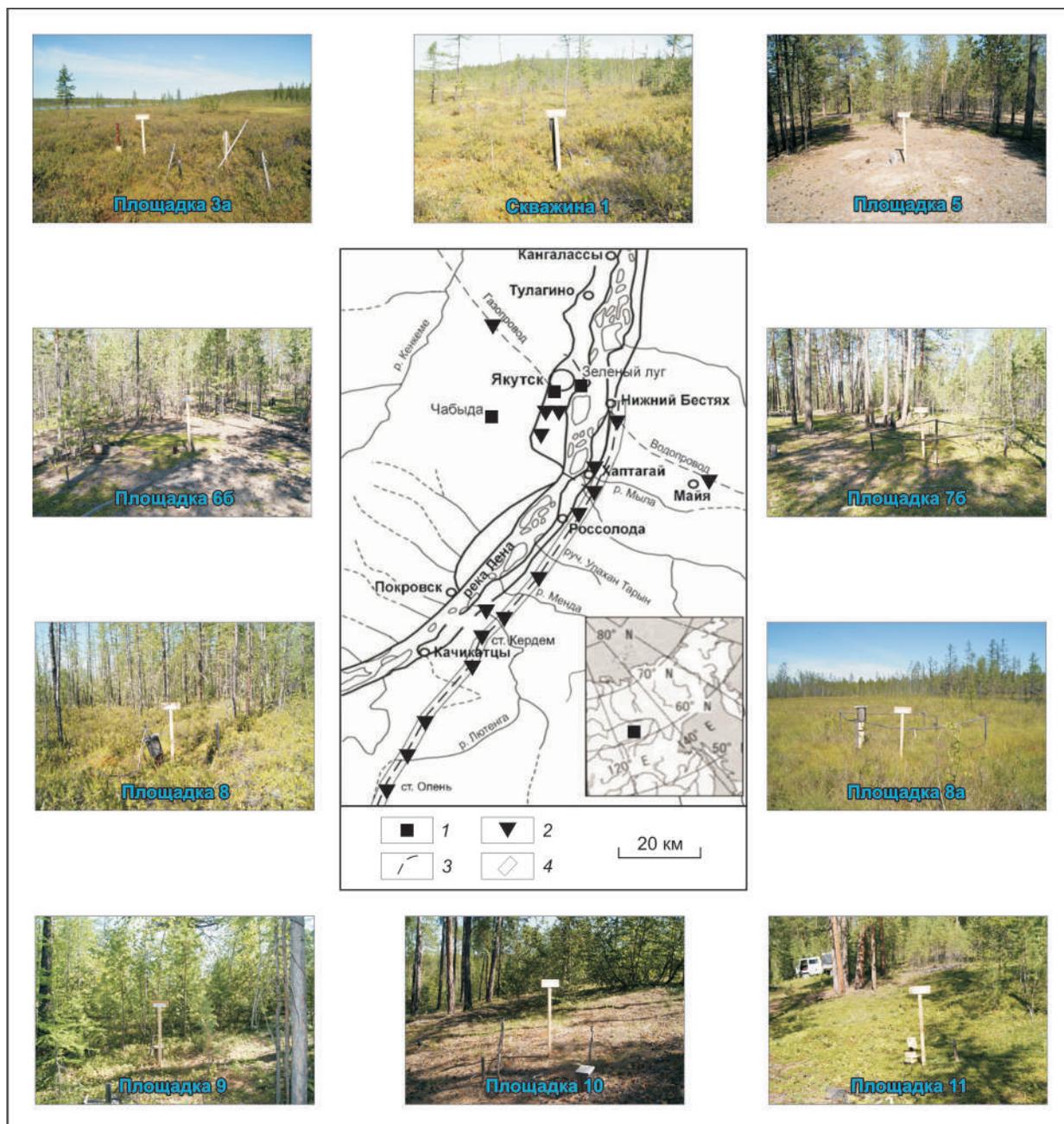
Отмечая определенные достижения многолетних геокриологических работ в осуществлении мероприятий по рациональному природопользованию, следует отметить необходимость расширения исследований по оценке пространственно-временной реакции верхних горизонтов криолитозоны на техногенные воздействия, а также в связи с усиливающимся потеплением климата.

#### Наблюдательная сеть и методика

В основу многолетних исследований теплового режима грунтов, параметры которого изменяются в суточном, сезонном, годовом цикле, были положены ландшафтный, стационарный и мониторинговый методы. Они потребовали ландшафтной типизации природно-территориальных комплексов (ПТК), организации экспериментальных площадок и системы наблюдений на них.

В 1980 г. в 20 км к юго-западу от г. Якутск для проведения режимных наблюдений за тепловым состоянием верхних горизонтов многолетнемерзлых пород в условиях со сливающейся и не сливающейся мерзлотой Институтом мерзловедения СО РАН был организован теплобалансовый стационар «Чабыда» (рис. 1).

Разнообразие природных комплексов района стационара требовало проведения ландшафтной съемки с целью выявления и типизации типологических комплексов для организации экспериментальных площадок. В результате ландшафтных исследований была составлена ландшафтно-типологическая карта масштаба 1:10 000 [25].



**Рис. 1.** Обзорная схема района исследований и вид экспериментальных площадок стационара Чабыда.

1 – стационары; 2 – полигоны; 3 – линейные сооружения: железная дорога ст. Олень–ст. Нижний Бестях, газопровод Таас Тумус–Якутск, водовод Лена–Туора-Кюель, 4 – площади ландшафтного картографирования крупного масштаба. Стационар «Чабыда»: площадка 3а, скважина 1; площадка 5, площадка 6б, площадка 7б, площадка 8, площадка 8а, площадка 9, площадка 10, площадка 11

**Fig. 1.** Overview scheme of the study area and view of the experimental sites at the Chabyda Station.

1 – station; 2 – polygon; 3 – linear structures: railway st. Deer–st. Nizhny Bestyakh, gas pipeline Taas Tumus–Yakutsk, Lena–Tuora-Kyuel water conduit, 4 – large-scale landscape mapping areas. Chabyda Station: site 3a, borehole 1, site 5, site 6b, site 7b, site 8, site 8a, site 9, site 10, site 11

На основе этой карты были организованы экспериментальные исследования на типичных для этого района элементарных природно-терри-

ториальных комплексах (фациях) с различными мерзлотно-гидрогеологическими условиями. Всего для режимных микроклиматических и

гидротермических наблюдений было оборудовано 22 экспериментальных площадки и геотермических скважины [26].

Для дальнейшего мониторинга теплового режима грунтов были выбраны 10 площадок в двух типах местности: мелкодолинном (днище долины ручья) и склоновом. В мелкодолинном типе местности – сфагново-багульниково-ерниковой мари (Пл-3а), мохово-осоково-вейниковой низине (Пл-8а), мохово-багульниково-ерниковой листовничной редине (Скв-1) и в мохово-багульниково-брусничном листовничнике (Пл-8) на днище ложбины стока. В склоновом типе местности – в мертвопокровно-толокнянковом сосняке на пологом склоне (Пл-5, Пл-6б), в толокнянковом сосняке (Пл-7б) и брусничном листовничнике (Пл-9) на приводораздельных склонах, на умеренно-крутых склонах в брусничном сосняке северной (Пл-10) и толокнянковом сосняке южной (Пл-11) экспозиций. Замеры температуры грунтов на скважинах проводились терморезисторными гирляндами на глубинах 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30 м.

Наблюдения за термическим режимом грунтов деятельного слоя на стационаре «Чабыда» проводились в теплые сезоны 1981 и 1982 гг. ежедневно, в семь сроков, а в холодный сезон 1982–1983 гг. – в четыре стандартных срока. В годичные циклы 1983–1986 гг., летом, наблюдения проводились один раз в пять дней, в четыре срока. В 1981–1987 гг. замеры температуры грунтов в слое годовых теплооборотов проводились один раз в десять дней. С 1987 г. термические наблюдения проводятся по более сокращенной программе – 15 числа каждого месяца. Также ежемесячно зимой наблюдается высота снежного покрова, а в конце теплого сезона – глубина сезонного протаивания.

Объектами исследований являются горные породы слоя годовых теплооборотов, или иначе говоря, слоя годовых температурных колебаний (верхние 10–30 и до 100 м).

Основными термическими параметрами, которые могут быть индикаторами тепловой эволюции верхних горизонтов криолитозоны, являются: глубина сезонного протаивания ( $\xi$ ), среднегодовые температуры на подошвах слоя сезонного протаивания ( $T_{\xi}$ ) и слоя годовых теплооборотов ( $T_0$ ).

В качестве регистраторов температуры грунтов используются полупроводниковые терморезисторы ММТ-4 с точностью измерений 0,1 °С.

В режимных скважинах термогирлянды установлены стационарно, стволы их заполнены ранее извлеченным грунтом. Глубина сезонного протаивания определяется зондированием металлическим щупом и при ручном бурении.

Методика проведения геотермического мониторинга показала свою надежность и может с успехом использоваться в разных природно-климатических условиях.

## Результаты и обсуждение

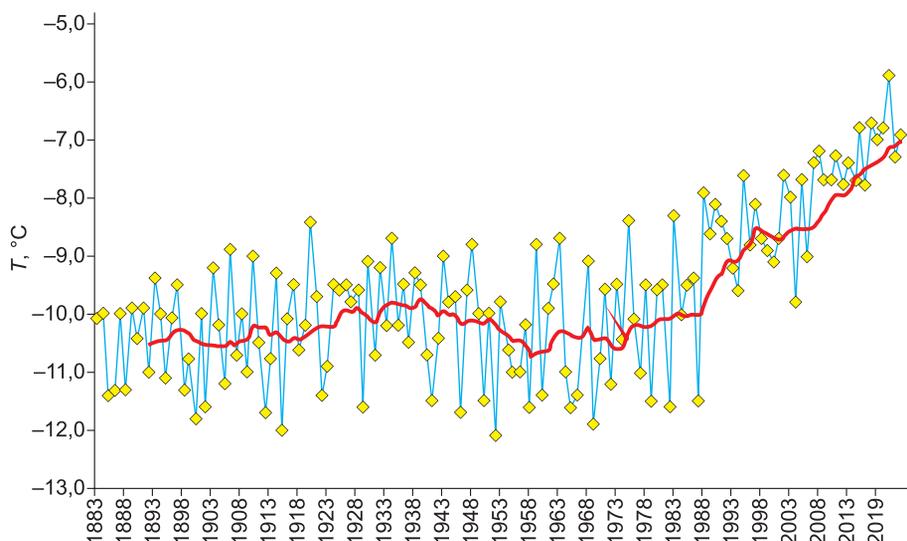
### Климат

Метеорологические наблюдения в г. Якутск выявляют два периода с отчетливо выраженным повышением температур воздуха: с конца XIX в. до 30–40-х годов XX в. («потепление Арктики») и с середины 60-х годов XX в. по настоящее время. Между этими периодами отмечалось некоторое похолодание. Все эти периоды наглядно иллюстрируются рис. 2. Из него следует очевидность нынешнего потепления, главная особенность которого состоит в том, что наблюдающаяся в последние три десятилетия температура воздуха является, по всей видимости, наивысшей за всю историю существования г. Якутск.

Средняя температура воздуха по месяцам, представленная в табл. 1, позволяет оценить ее изменчивость за различные периоды. Период 1961–1990 гг. в настоящее время рекомендован Всемирной метеорологической организацией в качестве опорного (реперного) при оценке текущих климатических изменений. Последний период: 2001–2021 гг., показателен с позиции современного потепления, поскольку именно эти годы стали наиболее теплыми за последние десятилетия, как в Якутии, так и в г. Якутск.

Из табл. 1 следует, что наибольший вклад в современное повышение средней годовой температуры воздуха вносят зимние (октябрь–апрель) месяцы. Вклад летних (май–сентябрь) месяцев на данном этапе незначителен. Из этого следует важный вывод: глубина сезонного протаивания грунтов, обусловленная преимущественно летними метеорологическими факторами (суммой температур воздуха и осадками за теплый период), в настоящее время не должна увеличиваться, что подтверждается многолетними стационарными наблюдениями в окрестностях города [1].

Оценка внутригодовой изменчивости температуры воздуха, выполненная с помощью регрессионного анализа, дополняет и расширяет



**Рис. 2.** Многолетняя изменчивость среднегодовой температуры воздуха в г. Якутск за период 1883–2022 гг., °С. (Жирная сплошная линия – скользящая десятилетняя средняя)

**Fig. 2.** Long-term variability of the average annual air temperature in Yakutsk from 1883 to 2022, °C. (Bold solid line: ten-year moving average)

наши представления о вкладах отдельных месяцев (табл. 2). Видно, что до середины 60-х годов прошлого столетия в г. Якутск не только не проявлялось потепление, но даже в отдельные зимние месяцы шло похолодание. После 1966 г. средняя температура воздуха в наиболее холодные зимние месяцы (ноябрь–март) повысилась на 4–7 °С, среднезимняя температура повысилась на 5,1 °С, а среднегодовая температура воздуха увеличилась на 3,8 °С.

В последние полвека в Якутске отмечается, как уже было сказано выше, беспрецедентно ин-

тенсивное повышение среднегодовой и среднезимней температуры воздуха (рис. 3, 4). В меньшей мере это можно сказать про повышение средней летней температуры воздуха (рис. 5).

*Многолетняя изменчивость температуры грунтов*

К настоящему времени по скважине 1 и пл. 5 имеется база данных за 42 года наблюдений, по пл. 8 – за 40 лет, по пл. 9 – за 38, а по остальным площадкам – за 37 лет. Такой представительный материал позволяет качественно провести ана-

Таблица 1

**Среднемесячная и среднегодовая температура воздуха за различные периоды в г. Якутск, °С**

Table 1

**Average monthly and annual air temperature in Yakutsk, °C**

Месяц/Month												Год/Year	
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
1882–1960 гг.													
-43,2	-35,9	-22,2	-7,4	5,7	15,4	18,7	14,8	6,2	-7,9	-28,0	-39,8	<b>-10,3</b>	
1961–1990 гг.													
-41,1	-35,8	-21,7	-6,2	6,7	15,4	18,7	14,9	5,7	-8,6	-29,2	-38,8	<b>-10,0</b>	
1991–2000 гг.													
-37,0	-32,3	-21,8	-5,1	7,2	16,5	19,5	15,2	5,8	-7,2	-27,8	-37,9	<b>-8,7</b>	
2001–2021 гг.													
-37,3	-33,1	-17,9	-3,1	8,4	17,4	20,0	15,8	6,6	-6,6	-24,8	-36,6	<b>-7,6</b>	

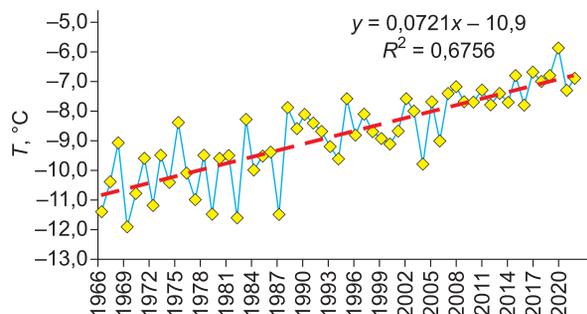


Рис. 3. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) среднегодовой температуры воздуха в г. Якутск, °С. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 3. Long-term variability (1966–2022) of the average annual air temperature in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

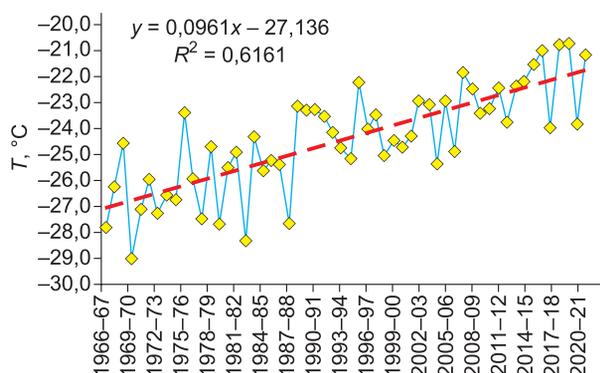


Рис. 4. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) средней температуры воздуха за холодный период (октябрь–апрель) в г. Якутск, °С. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 4. Long-term variability (1966–2022) of the average air temperature for the cold period (October–April) in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

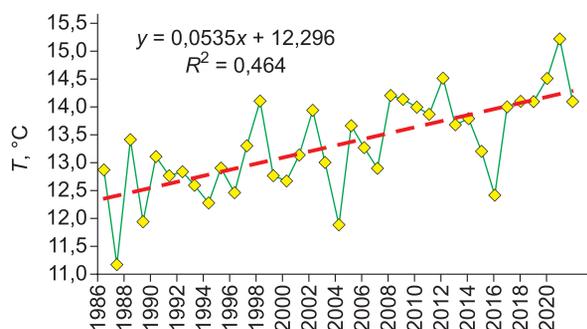


Рис. 5. Многолетняя изменчивость (1966–2022 гг.) средней температуры воздуха за теплый период (май–сентябрь) в г. Якутск, °С. (Пунктир – линейный тренд)

Fig. 5. Long-term variability (1966–2022) of the average air temperature for the warm period (May–September) in Yakutsk, °C. (Dotted line: linear trend)

Таблица 2  
Приращения температуры воздуха в г. Якутск, °С

Table 2  
Increments of air temperature in Yakutsk, °C

Месяцы, год/ Months, year	1883–1965	1966–2019	1883–2019
Январь/ January	2,6	<b>6,8</b>	<b>7,7</b>
Февраль/ February	-1,2	<b>5,9</b>	2,6
Март/ March	-1,4	<b>5,9</b>	3,2
Апрель/ April	0,6	<b>4,5</b>	<b>4,9</b>
Май/ May	0,9	<b>2,1</b>	<b>3,4</b>
Июнь/ June	0,4	<b>2,8</b>	<b>1,9</b>
Июль/ July	0,3	1,7	1,2
Август/ August	1,4	1,7	1,3
Сентябрь/ September	0,0	1,2	-0,3
Октябрь/ October	0,2	<b>2,9</b>	0,4
Ноябрь/ November	-0,6	<b>6,4</b>	0,2
Декабрь/ December	-0,2	<b>4,1</b>	3,5
Зима/ Winter	-0,1	<b>5,1</b>	<b>3,4</b>
Лето/ Summer	0,6	<b>1,9</b>	<b>1,5</b>
Год/ Year	0,2	<b>3,8</b>	<b>2,6</b>

Примечание. Жирным шрифтом выделены величины, имеющие статистически значимые тренды.

Note. Values with statistically significant trends are highlighted in bold.

лиз изменчивости основных тепловых параметров слоя годовых теплооборотов и сделать объективные выводы. Представление о многолетней изменчивости величины  $\xi$ ,  $T_{\xi}$  и  $T_0$  на экспериментальных площадках стационара «Чабыда» дает табл. 3.

Наибольшие колебания  $T_{\xi}$  и  $T_0$  (4,2–6,4 °С 1,4–2,7 °С) происходили в увлажненных оторфованными напочвенными покровами ландшафтах мелкодолинного типа местности, наименьшие (0,9–2,8 °С и 0,3–1,2 °С) – в сухих песчаных и супесчаных отложениях склонового (см. табл. 3, рис. 6 и 7). На фоне потепления климата эти изменения обуславливались в основном влиянием условий снегонакопления и значительно меньшей мере суммой температур воздуха за холодный период [27–29].

За весь период наблюдений самые низкие и высокие среднегодовые температуры на подошве деятельного слоя на площадках мелкодолинного и склонового типах местностей были отме-

## Средние многолетние и экстремумы основных тепловых параметров грунтов слоя годовых теплооборотов на стационаре «Чабыда»

Table 3

## Average long-term and extrema of the main thermal parameters of the soils of the layer of annual heat exchanges at the Chabyda Station

Площадка (Пл.), скважина (С) (годы наблюдений) Site (S), borehole (B) (years of observation)	ξ, м			T <sub>ξ</sub> , °C			T <sub>0</sub> , °C		
	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max.	Мин. Min.	Среднее Average	Макс. Max.
Мелкодолинный тип местности Shallow valley type of terrain									
С (B)-1 (1981–2022)	0,81	1,06	1,30	-5,1	-2,7	-0,6	-3,4	-2,7	-1,8
Пл. (S) 3а (1986–2022)	0,37	0,47	0,53	-7,4	-4,9	-1,3	-4,9	-3,9	-2,8
Пл. (S) 8 (1982–2022 гг.)	0,86	1,17	1,37	-5,5	-3,5	-1,3	-3,3	-2,7	-1,9
Пл. (S) 8а (1986–2020 гг.)	0,65	1,02	1,45	-6,5	-3,3	-0,1	-4,5	-3,3	-1,8
Склоновый тип местности Slope type of terrain									
Пл. (S) 5 (1981–2022 гг.)	3,26	3,50	3,86	-1,0	-0,4	-0,1	-0,6	-0,4	-0,3
Пл. (S) 6б (1986–2022 гг.)	3,54	3,76	4,11	-0,9	-0,5	0,0	-0,6	-0,4	-0,2
Пл. (S) 7б (1986–2022 гг.)	1,70	1,87	2,00	-2,3	-1,2	-0,4	-1,5	-0,8	-0,3
Пл. (S) 9 (1985–2022 гг.)	1,31	1,52	1,72	-3,8	-2,5	-1,0	-2,5	-2,2	-1,8
Пл. (S) 10 (1986–2022 гг.)	1,63	1,93	2,18	-2,8	-1,8	-0,7	-2,4	-2,0	-1,6
Пл. (S) 11 (1986–2022 гг.)	1,73	1,91	2,27	-2,2	-0,9	-0,2	-1,5	-1,2	-0,9

чены соответственно в 2002/03 и 2006/07 гидрологические годы (октябрь–сентябрь), на склоне южной экспозиции с запаздыванием на год. В слое годовых теплооборотов на глубине 10 м пики понижения и повышения, как правило, в обоих типах местности приходится с запаздыванием на год.

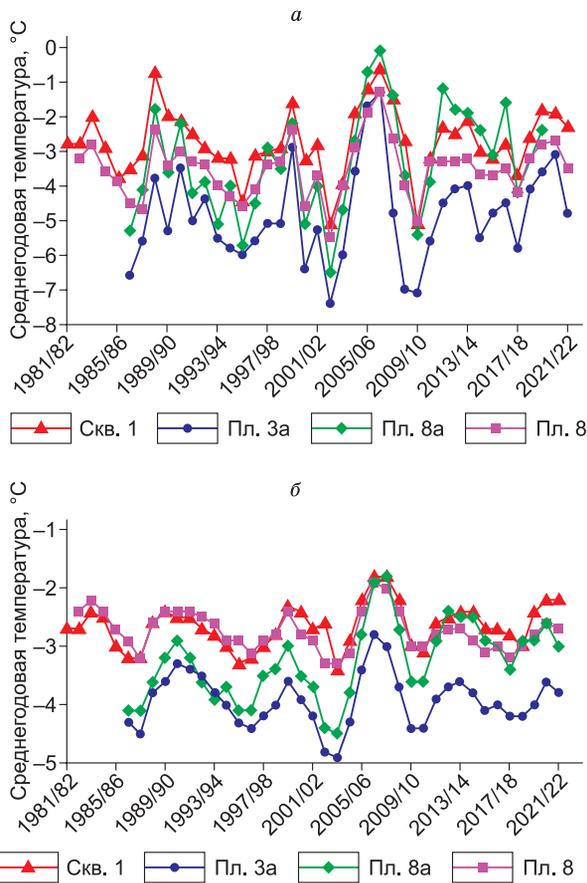
Зима в 2002/03 гг. была аномально малоснежной и с аномально поздним сроком образования устойчивого снежного покрова. Это стало основной причиной сильного охлаждения грунтов, несмотря на довольно теплый год. Последующие годы характеризовались многоснежными зимами и выше нормы летними осадками, что привело к резкому повышению температуры грунтов. В период с 2002/03 по 2006/07 (2007/08) гг. температура грунтов на подошве деятельного слоя в этих типах местности повысилась на 0,5–6,0 °C и в слое годовых теплооборотов на 0,3–2,7 °C (см. рис. 6 и 7).

В регионе в эти годы в связи с повышением температуры и увеличением глубины сезонного протаивания активизировались криогенные процессы (термокарст, термоэрозия и др.). Развитие заболачивания и обводнения наблюдалось в низинных ландшафтных участках. Эти факторы

привели к повышению уровня воды в озерах, заполнению водой ранее сухих озерных котловин, повышению уровня и формирования надмерзлотных вод сезонно-талого слоя. На обводненных участках отрицательных форм рельефа в холодные периоды при промерзании не было смыкания промерзающего деятельного слоя с многолетнемерзлыми породами. Здесь отмечались их многолетнее протаивание и заметное повышение температуры грунтов в слое годовых теплооборотов [30]. Таким образом, 2007 и 2008 гг. можно считать критическими для теплового режима многолетнемерзлых пород за 40 лет наблюдений или даже за его вековую историю.

По многолетним наблюдениям был экспериментально установлен тепловой эффект аномальных зим. Так, одна теплая и малоснежная зима может понизить температуру грунтов значительней, чем холодная и многоснежная. Аномально холодная зима может дать более сильный эффект, чем несколько следующих друг за другом аномально теплых [28].

Наиболее важным выводом многолетних наблюдений является то, что температура грунтов, испытывая значительные межгодовые и корот-



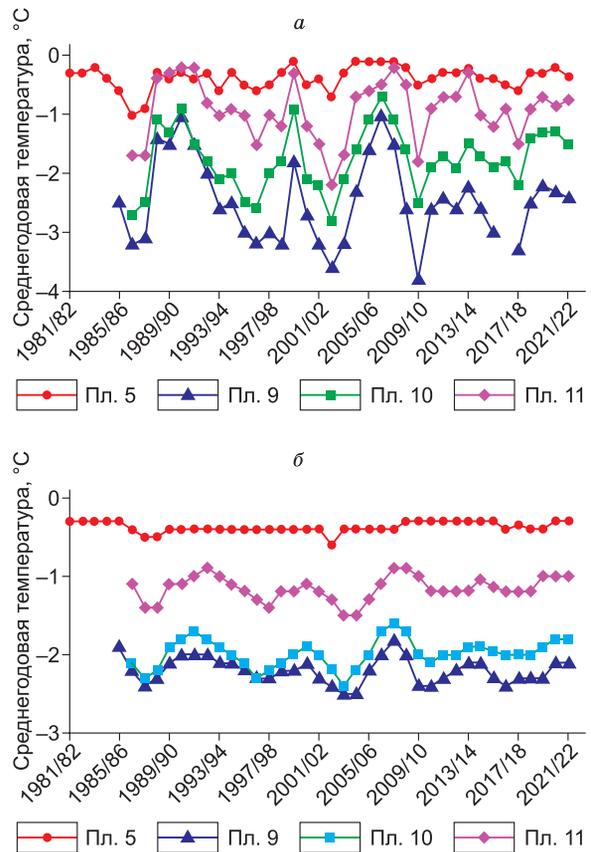
**Рис. 6.** Многолетняя изменчивость (1981/82–2021/22 гг.) температуры грунтов деятельного слоя (а) и слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м (б) в мелкодолинном типе местности на стационаре «Чабыда»

**Fig. 6.** Long-term variability (1981/82–2021/22) of soil temperature in the active layer (a) and the layer of annual heat exchanges at a depth of 10 m (б) in a shallow-valley type of terrain at the Chabyda Station

копериодные колебания, связанные в основном с большой изменчивостью режима накопления снега, имеет разнонаправленную тенденцию. На фоне значительных изменений среднегодовой температуры воздуха (в г. Якутск за период 1980/81–2021/22 гг. тренд повышения составил 0,74 °C/10 лет) термическое состояние слоя годовых теплооборотов на площадках склонового и мелкодолинного типах местностей стационара «Чабыда» остаются стабильными, за исключением площадок 7б и 8а.

*Многолетняя изменчивость  
глубины сезонного протаивания грунтов*

Как известно, глубина сезонного протаивания ( $\xi$ ) зависит от литологического состава грунтов, их влажности, характера растительного



**Рис. 7.** Многолетняя изменчивость (1981/82–2021/22 гг.) температуры грунтов деятельного слоя (а) и слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м (б) в склоновом типе местности на стационаре «Чабыда»

**Fig. 7.** Long-term variability (1981/82–2021/22) of soil temperature in the active layer (a) and the layer of annual heat exchanges at a depth of 10 m (б) in the slope type of terrain at the Chabyda Station

покрова. Наибольшая многолетняя межгодовая изменчивость  $\Delta\zeta$  характерна для грунтов мелкодолинного типа местности и составляет от 3,8 до 37,7 % от их экстремального максимума. В склоновом типе местности  $\Delta\zeta$  изменяется в пределах 10,9–23,8 % (рис. 8). Ранее считалось, что основными факторами, определяющими межгодовую изменчивость мощности сезонно-талого слоя, являются сумма положительных температур воздуха и летние осадки. Однако последние разработки по этому вопросу показывают, что многолетние изменения глубины сезонного протаивания и сумм летних температур воздуха недостаточно четко коррелируют между собой [31].

Наибольшие значения  $\xi$  (3,54–4,11 м) отмечены на слабоувлажненной площадке 6б (верхняя часть пологого песчаного склона), наименьшие

(0,37–0,53 м) – на переувлажненной площадке 3а (днище долины ручья с торфяным грунтом). На десяти площадках стационара в среднем максимальная мощность  $\xi$  (1,81 м) приходится на 1988–1989 и 2006–2008 гг.

Вероятнее всего, внутригрунтовые условия, а именно – колебания влажности являются одной из основных причин, влияющих на глубину протаивания. Анализ данных, полученных в стационаре, показывает, что наибольшие межгодовые изменения  $\xi$  свойственны ландшафтам мелкодолинного типа местности (до 80 см). На площадках в склоновом типе местности эти изменения составляли 30–60 см (см. рис. 8).

В мелкодолинном типе местности на площадках 3а и 8 наблюдается статистически значимое увеличение глубины сезонного протаивания, связанное со значительными положительными трендами среднелетней температуры воздуха. На площадках склонового типа местности (5, 6б, 9, 11) отмечаются статистически значимые тенденции ее уменьшения. И если на водораздельном участке (пл. 9) это уменьшение можно связать с ростом мохово-кустарниковой растительности, то на площадках 5 и 6б, скорее всего, важную роль играют колебания уровня надмерзлотных вод сезонно-талого слоя и увеличение биомассы под пологом леса. На остальных площадках (7б, 10) при значительных межгодовых изменениях глубины сезонного протаивания наблюдаются статистически незначимые тенденции ее роста (табл. 4).

Максимальные глубины сезонного протаивания на отдельных площадках наблюдались в разные годы. В мелкодолинном типе местности (площадки 1, 3а, 8, 8а) они отмечены в 2007–2008 годах. В склоновом типе местности максимумы  $\xi$  выявлены в следующие годы: пл. 5 – 1984 г., пл. 6б – 1995 г., пл. 7б – 1989 г., пл. 9 – 1991 г., пл. 10 и 11 – 1988 г.

Таким образом, при потеплении климата даже в пределах локальных ненарушенных участков могут обнаруживаться разнонаправленные изменения глубины сезонного протаивания грунтов. Это служит веским доказательством того, что мощность сезонно-талого слоя является слабо-чувствительным индикатором современных изменений климата.

Анализ большого объема экспериментальных данных подтвердил вывод о слабом отклике глубины сезонного протаивания на современные изменения климата [31]. Наблюдения убедитель-

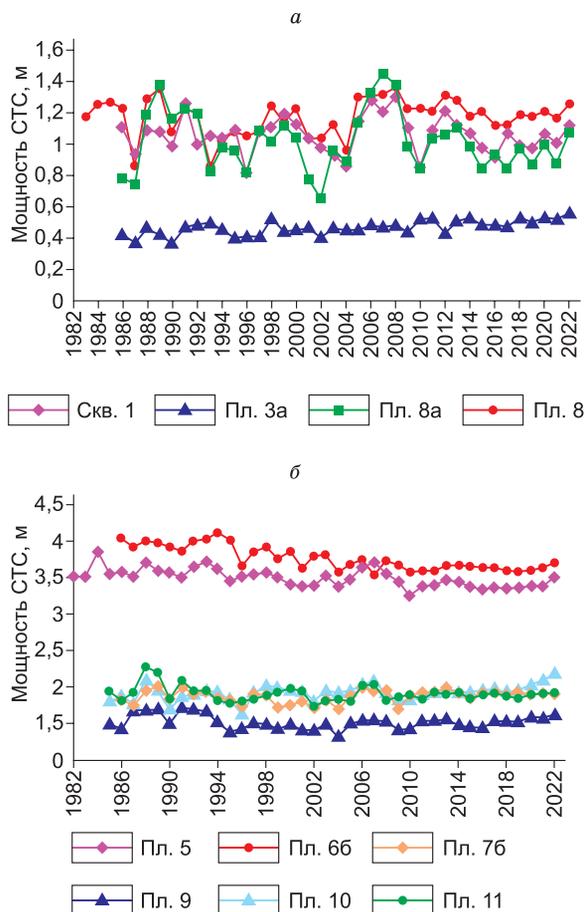


Рис. 8. Многолетняя изменчивость (1982–2022 гг.) мощности сезонно-талого слоя в мелкодолинном (а) и склоновом (б) типах местностей на стационаре «Чабыда»

Fig. 8. Long-term variability (1982–2022) of the thickness of the seasonally thawed layer in the shallow-valley (a) and slope (b) types of terrain at the Chabyda Station

но показывают, что в условиях современного потепления климата не всегда происходит увеличение глубины сезонного протаивания грунтов. Максимумы и минимумы этой величины на различных площадках стационара наблюдаются, чаще всего, в разные годы. Это свидетельствует о том, что глубина сезонного протаивания зависит не только от многолетних изменений температуры воздуха в теплый период, но и от других ландшафтных факторов.

#### Статистические исследования временных рядов наблюдений

Исследованы корреляционные связи между элементами климата: среднегодовая ( $T_{в3}$ ), суммы отрицательных ( $\Sigma-T_{в3}$ ) и положительных ( $\Sigma+T_{в3}$ ) температур воздуха, суммы годовых ( $O_r$ ), зимних ( $O_3$ ) и летних ( $O_l$ ) осадков, продолжитель-

ности холодного ( $\tau_3$ ) и теплого ( $\tau_l$ ) сезонов, сред- исследований за температурным режимом грун-  
незимней высоты снега ( $h_c^{o-a}$ ) по данным мете- тов на территории стационара «Чабыда» в 1981–  
теостанции Якутск в период мониторинговых 2022 гг. (табл. 5).

Таблица 4

**Тренды глубины сезонного протаивания грунтов стационара «Чабыда»**

Table 4

**Trends in the depth of seasonal thawing of soils at the Chabyda Station**

Тип местности Terrain type	Грунт, площадка (Пл) скважина (С) и их номера Soil, site (S), borehole (B) and their numbers	Период наблюдений Observation period	Тренды, см/10 лет Trends, cm/10 years
Мелкодолинный Shallow valley	Торф (Пл-3а) Peat (S-3a)	1986–2019	2,4
	Песок (С-1, Пл-8) Sand (B-1, S-8)	1981–2019	–0,8...2,4
	Торф, песок (Пл-8а) Peat, sand (S-8a)	1986–2019	–2,2
Склоновый Slope	Песок (Пл-5, Пл-6б) Sand (S-5, S-6b)	1981–2019, 1986–2019	–7,1...–13,9
	Песок, супесь (Пл-7б) Sand, sandy loam (S-7b)	1986–2019	2,2
	Суглинок, супесь (Пл-9) Loam, sandy loam (S-9)	1985–2019	–3,0
	Супесь, песок (Пл-10, Пл-11) Sandy loam, sand (S-10, S-11)	1986–2019	2,2...–3,0

Таблица 5

**Корреляционные связи между климатическими элементами по данным метеостанции Якутск в гидрологические годы 1980/81–2021/22 гг.**

Table 5

**Correlations between climatic elements according to the data from the Yakutsk Weather Station in 1980/81–2021/22**

Элементы	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$\tau_3$	$\tau_l$	$O_\Gamma$	$O_3$	$O_l$	$h_c^{o-a}$
$T_{вз}$	–	0,96	0,61	–0,56	0,53	–0,05	0,44	–0,23	0,08
$\Sigma-T_{вз}$		–	0,35	–0,51	0,41	0,03	0,38	–0,12	0,01
$\Sigma+T_{вз}$			–	–0,39	0,59	–0,11	0,35	–0,26	0,24
$\tau_3$				–	–0,74	–0,10	–0,04	–0,09	–0,06
$\tau_l$					–	0,02	0,16	–0,09	0,13
$O_\Gamma$						–	0,37	0,93	0,45
$O_3$							–	0,00	0,66
$O_l$								–	0,22
$h_c^{o-a}$									–

*Примечание.* Цветом выделены тесноты корреляционных связей: красный – весьма высокая, фиолетовый – высокая, зеленый – заметная, голубой – умеренная и синий – слабая, черный – практически нет связи.

*Note.* The closeness of correlations is highlighted in color: red – very high, purple – high, green – noticeable, blue – moderate and black – almost no connection.

Качественная оценка тесноты связи между парными элементами климата дана по шкале Чеддока [32]. Как видно из табл. 5, весьма высокие корреляционные связи выявлены между средней годовой температурой воздуха  $T_{вз}$  и суммами отрицательных среднемесячных температур воздуха  $\Sigma - T_{вз}$  (0,96), между суммами годовых  $O_{г}$  и летних осадков  $O_{л}$  (0,93), заметные связи прослеживаются: между  $T_{вз}$  и  $\Sigma + T_{вз}$  (0,61);  $T_{вз}$  и  $\tau_{л}$  (0,53);  $\Sigma + T_{вз}$  и  $\tau_{л}$  (0,59);  $O_{з}$  и  $h_c$  (0,66), подтверждающие общеизвестные истины. Высокая обратная корреляционная связь отмечается между продолжительностями холодного ( $\tau_3$ ) и теплого ( $\tau_{л}$ ) сезонов (-0,74), заметные обратные связи между среднегодовой температурой ( $T_{вз}$ ) и суммами отрицательных среднемесячных ( $\Sigma - T_{вз}$ ) температур воздуха выявлены с продолжительностью холодного периода ( $\tau_3$ ), где значения корреляции составляет соответственно -0,56 и -0,51. Полученные результаты подтверждают тезис о том, что на формирование температуры воздуха существенное влияние оказывают циркуляционные процессы атмосферы в летний и зимний сезоны.

Исследованы также корреляционные связи между параметрами температурного режима грунтов: температура грунтов на подошвах слоя сезонного протаивания ( $T_{\xi}$ ) и слоя годовых теплооборотов, глубина 10 м ( $T_0$ ), мощности сезонно-талого слоя ( $\xi$ ) с элементами климата ( $T_{вз}$ ,  $\Sigma - T_{вз}$ ,  $\Sigma + T_{вз}$ ,  $O_{г}$ ,  $O_{з}$ ,  $O_{л}$ ,  $h_c^{o-a}$ ,  $\tau_3$ ,  $\tau_{л}$ ) по экспериментальным данным.

Высокие корреляционные связи температуры грунтов  $T_{\xi}$  и среднезимней высоты снежного покрова ( $h_c^{o-a}$ ) отмечаются в склоновом типе местности на площадке 6б (0,75) с иссушенными песчаными отложениями в сезонно-талом слое, в мелкодолинном типе местности – площадке 3а (0,83) с мощными мохово-сфагновыми напочвенными покровами на органогенных (торф) отложениях и на площадке 8 (0,76) мохово-багульниково-брусничном листовничнике, на других площадках выявлены заметные связи. В мелкодолинном типе местности между  $T_{\xi}$  и  $O_{з}$  отмечены высокие корреляционные связи, в склоновом типе местности встречаются преимущественно заметные связи (0,52–0,62). Здесь исключение составляют площадки 5 и 11 с поздними сроками смыкания фазовых границ, где выявлены умеренные связи, соответственно равные 0,46 и 0,48.  $T_{\xi}$  на экспериментальных площадках с другими элементами климата имеет умеренные и слабые связи с преобладанием последних (табл. 6).

Корреляционная связь  $T_{\xi}$  с мощностью  $\xi$  и  $T_0$  имеет выборочный характер. Более заметные связи между  $T_{\xi}$  и  $\xi$  выявлены на площадках мелкодолинного типа местности (С-1 – 0,69, пл. 8а – 0,59). Умеренные связи в склоновом типе местности наблюдаются на приводораздельном склоне (пл. 9 – 0,47) и на склоне северной экспозиции (пл. 10 – 0,30), в мелкодолинном типе местности на мохово-брусничном листовничнике (пл. 8 – 0,49). На остальных площадках корреляционные связи слабые (см. табл. 6).

Высокая корреляционная связь между  $T_{\xi}$  и  $T_0$  наблюдается на площадке 8а – переувлажненной мохово-осоковой низине (0,80), заметные связи установлены в природных комплексах с плотными мохово-сфагновым покровом (пл. 3а – 0,63) и хорошо развитым мохово-брусничным напочвенным покровом (пл. 8 – 0,67) мелкодолинного типа местности и на приводораздельном склоне брусничном листовничнике (пл. 9 – 0,57), на склоне северной экспозиции брусничном сосняке (пл. 10 – 0,56) склонового типа местности. Умеренные связи отмечены в склоновом типе местности на площадке 6б толокнянковом сосняке (0,40) с иссушенными песчаными отложениями и на площадке 11 – мертвопокровнотолокнянковом сосняке (0,31) – умеренно-крутом склоне южной экспозиции с поздними сроками смыкания фазовых границ. Слабые связи выявлены на площадках формирования надмерзлотных вод СТС (пл. 5 – 0,30, пл. 7б – 0,27) в склоновом типе местности и на участке разгрузки намерзлотных вод СТС (С-1 – 0,20) (см. табл. 6).

Другие результаты выявлены при анализе корреляционных связей между  $T_0$  с элементами климата. Как видно из табл. 7, связи преимущественно слабые или очень слабые. Значимая корреляционная связь температуры грунтов слоя годовых теплооборотов с среднегодовой температурой воздуха отмечена в приводораздельном склоне на площадке 7б (0,53), в низине на пл. 8а (0,55), и умеренная связь установлена на склоне северной экспозиции на пл. 10 (0,33). Умеренные связи выявлены между  $T_0$  и  $\Sigma - T_{вз}$ ,  $\Sigma + T_{вз}$  на площадках 7б (0,44 и 0,49) и 8а (0,47 и 0,48), между  $T_0$  и  $\Sigma + T_{вз}$  на площадке 10 (0,31), между  $T_0$  и  $O_{з}$  на площадках 3а (0,46), 8а (0,47), 8 (0,32), между  $T_0$  и  $O_{г}$ ,  $O_{л}$  имеется обратная связь на площадке 11 (-0,31 и -0,33), между  $T_0$  и  $h_c^{o-a}$  – на площадках 3а (0,37) и 8а (0,33), между  $T_0$  и  $\tau_{л}$  – на площадках 7б (0,46), 10 (0,32) и 8а (0,48), обратная уме-

Таблица 6

**Корреляционные связи между температурами грунтов на подошве слоя сезонного протаивания ( $T_{\xi}$ ) и элементами климата ( $T_{вз}, \Sigma-T_{вз}, \Sigma+T_{вз}, O_{г}, O_{з}, O_{л}, h_c^{0-a}, \tau_3, \tau_{л}$ ), мощности сезонно-талого слоя ( $\xi$ ), температурами грунтов слоя годовых теплооборотов ( $T_0$ ) в период 1981–2022 гг.**

Table 6

**Correlations between soil temperatures at the bottom of the seasonal thawing layer ( $T_{\xi}$ ) and climate elements ( $T_{vz}, \Sigma-T_{vz}, \Sigma+T_{vz}, O_g, O_z, O_l, h_c^{0-a}, \tau_3, \tau_l$ ), thicknesses of the seasonally thawed layer ( $\xi$ ), temperatures soils of the layer of annual heat exchanges ( $T_0$ ) in 1981–2022**

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$O_{г}$	$O_{з}$	$O_{л}$	$h_c^{0-a}$	$\tau_3$	$\tau_{л}$	$\xi$	$T_0$
Склоновый тип местности											
5	0,36	0,34	0,25	0,26	0,46	0,10	0,55	-0,40	0,37	-0,00	0,30
7б	0,38	0,39	0,19	0,15	0,60	-0,08	0,66	-0,07	0,19	0,22	0,27
6б	0,11	0,13	-0,01	0,35	0,56	0,15	0,75	0,11	-0,21	0,10	0,40
9	0,18	0,23	-0,02	0,27	0,52	0,08	0,54	-0,00	0,06	0,47	0,57
10	0,40	0,40	0,20	0,22	0,62	-0,01	0,64	-0,18	0,23	0,30	0,56
11	0,34	0,35	0,17	0,15	0,48	-0,03	0,52	-0,15	0,20	0,21	0,31
Мелкодолинный тип местности											
С-1	0,27	0,27	0,15	0,40	0,73	0,15	0,69	-0,08	0,17	0,69	0,20
3а	0,28	0,27	0,16	0,53	0,75	0,26	0,83	-0,14	0,14	0,23	0,63
8а	0,48	0,45	0,34	0,40	0,73	0,15	0,68	-0,18	0,31	0,59	0,80
8	0,30	0,29	0,15	0,44	0,71	0,20	0,76	-0,15	0,16	0,49	0,67

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

Таблица 7

**Корреляционные связи между температурами грунтов слоя годовых теплооборотов ( $T_0$ ) и элементами климата ( $T_{вз}, \Sigma-T_{вз}, \Sigma+T_{вз}, O_{г}, O_{з}, O_{л}, h_c^{0-a}, \tau_3, \tau_{л}$ ), мощности сезонно-талого слоя ( $\xi$ ) в период 1981–2022 гг.**

Table 7

**Correlations between the soil temperatures of the layer of annual heat exchanges ( $T_0$ ) and climate elements ( $T_{vz}, \Sigma-T_{vz}, \Sigma+T_{vz}, O_g, O_z, O_l, h_c^{0-a}, \tau_3, \tau_l$ ), the thickness of the seasonally thawed layer ( $\xi$ ) in 1981–2022**

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$O_{г}$	$O_{з}$	$O_{л}$	$h_c^{0-a}$	$\tau_3$	$\tau_{л}$	$\xi$
Склоновый тип местности										
5	0,07	-0,00	0,23	-0,24	-0,06	-0,24	0,03	-0,28	0,20	-0,27
7б	0,53	0,44	0,49	-0,19	0,17	-0,27	0,04	-0,37	0,46	-0,14
6б	-0,02	-0,03	0,02	0,02	0,27	-0,09	0,29	0,02	-0,06	0,19
9	-0,02	-0,02	-0,02	-0,14	0,08	-0,19	-0,08	0,12	-0,06	0,15
10	0,33	0,28	0,31	-0,15	0,21	-0,25	0,02	-0,22	0,32	0,02
11	0,21	0,17	0,21	-0,31	0,00	-0,33	-0,27	-0,18	0,21	-0,16
Мелкодолинный тип местности										
С-1	-0,10	-0,10	-0,04	0,15	0,03	0,17	0,08	-0,01	0,16	0,18
3а	0,19	0,18	0,13	0,22	0,46	0,04	0,37	-0,09	0,16	0,12
8а	0,55	0,47	0,48	0,11	0,47	-0,07	0,33	-0,39	0,48	0,39
8	-0,04	-0,04	-0,01	0,18	0,32	0,07	0,29	0,00	0,04	0,33

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

Корреляционные связи мощности сезонно-талого слоя ( $\xi$ ) и климатическими элементами ( $T_{вз}$ ,  $\Sigma-T_{вз}$ ,  $\Sigma+T_{вз}$ ,  $O_r$ ,  $O_z$ ,  $O_l$ ,  $h_c^{0-a}$ ,  $\tau_z$ ,  $\tau_l$ ), температурами грунтов на подошве сезонно-талого слоя ( $T_\xi$ ) и слоя годовых теплооборотов ( $T_0$ ) в период 1981–2022 гг.

Table 8

Correlations between the thickness of the seasonally thawed layer ( $\xi$ ) and climatic elements ( $T_{vz}$ ,  $\Sigma-T_{vz}$ ,  $\Sigma+T_{vz}$ ,  $O_r$ ,  $O_z$ ,  $O_l$ ,  $h_c^{0-a}$ ,  $\tau_z$ ,  $\tau_l$ ), soil temperatures at the sole of the seasonally thawed layer ( $T_\xi$ ) and the layer of annual heat exchanges ( $T_0$ ) in 1981–2022

Номер Пл.	$T_{вз}$	$\Sigma-T_{вз}$	$\Sigma+T_{вз}$	$O_r$	$O_z$	$O_l$	$h_c^{0-a}$	$\tau_z$	$\tau_l$	$T_\xi$	$T_0$
Склоновый тип местности											
5	-0,38	-0,30	-0,40	0,47	0,11	0,47	0,12	0,34	-0,32	-0,00	-0,27
7б	0,34	0,29	0,30	0,56	0,44	0,44	0,34	-0,26	0,21	0,22	-0,14
6б	-0,51	-0,43	-0,47	0,07	-0,07	0,10	-0,02	0,55	-0,49	0,01	0,19
9	0,01	0,02	-0,04	0,40	0,40	0,27	0,29	0,16	-0,20	0,47	0,15
10	0,22	0,14	0,33	0,41	0,43	0,28	0,46	-0,06	0,14	0,30	0,02
11	-0,18	-0,15	-0,18	0,31	0,32	0,21	0,30	0,16	-0,19	0,21	-0,15
Мелкодолинный тип местности											
С-1	0,10	0,02	0,27	0,36	0,47	0,21	0,56	0,09	0,11	0,69	0,18
3а	0,48	0,36	0,54	0,18	0,21	0,11	0,17	-0,44	0,31	0,23	0,12
8а	0,08	0,08	0,03	0,61	0,47	0,47	0,50	-0,08	0,21	0,59	0,39
8	0,32	0,21	0,42	0,28	0,43	0,14	0,38	-0,30	0,39	0,49	0,33

Примечание. Выделение цветом см. в примечании табл. 5.

Note. For highlighting, see the Note in Table 5.

ренная связь между  $T_0$  и  $\tau_z$  установлена на площадках 7б (-0,37) и 8а (-0,39). Умеренная корреляционная связь между  $T_0$  и мощностью  $\xi$  выявлена на площадках 8а (0,39) и 8 (0,33) мелкодолинного типа местности.

Анализ корреляции мощности сезонно-талого слоя ( $\xi$ ) с элементами климата показал, что встречаются часто умеренные и слабые связи, выборочно – заметные связи (табл. 8). Между  $\xi$  и  $T_{вз}$  умеренные связи имеются на площадках 7б (0,34), 3а (0,48) и 8 (0,32), отмечена обратная заметная связь на площадке 6б (-0,51), на остальных площадках установлены слабые связи. Между  $\xi$  и  $\Sigma-T_{вз}$  умеренная связь отмечена на площадке 3а (0,36), и умеренные обратные связи установлены на площадках 5 (-0,30) и 6б (-0,43) с глубоким сезонным протаиванием. Между  $\xi$  и  $\Sigma+T_{вз}$  заметная связь выявлена на площадке 3а (0,54), между  $\xi$  и  $O_r$  – на площадках 7б (0,56) и 8а (0,61), между  $\xi$  и  $h_c^{0-a}$  – на участке С-1 (0,56), между  $\xi$  и  $\tau_z$  – на площадке 6б (0,55).

Еще в конце прошлого века нами был сделан вывод об устойчивости термического режима многолетнемерзлых грунтов и их слабой реакции

на изменчивость климатических факторов [26]. Последующие годы подтвердили этот тезис.

### Выводы

1. Многолетняя динамика теплового состояния слоя годовых теплооборотов при потеплении климата свидетельствует об их неоднозначной термической реакции. Статистически значимые тренды повышения температуры вызваны аномально многоснежными зимами и формированием надмерзлотных вод сезонно-талого слоя. Основным регулирующим фактором динамики теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов является режим снегонакопления. Тренды понижения температуры грунтов связаны с увеличением затенения поверхности под пологами кронов древостоя и подрастанием кустарничкового покрова, т. е. увеличением биомассы.

2. Глубина сезонного протаивания, несмотря на значительные межгодовые колебания, реагирует на потепление климата разнонаправленными тенденциями.

3. Проведены статистические исследования временных рядов наблюдений. Выявлены корреляционные связи между различными факторами.

ляционные связи между элементами климата (температура воздуха, сумма осадков, среднезимняя высота снежного покрова, продолжительность зимнего и летнего сезонов) и связи между параметрами температурного режима грунтов ( $T_{\xi}$ ,  $T_0$ ,  $\xi$ ) и элементами климата по экспериментальным площадкам в склоновом и мелкодолинном типах местности.

4. Результаты исследований теплового режима грунтов можно распространить на однотипные ландшафты Центральной Якутии, а также они могут быть использованы в математическом моделировании эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов и разработке методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем.

#### Список литературы / References

1. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии*. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2021. 156 с.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of the thermal regime of soils in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 2021. 156 p. (In Russ.)

2. Иванов Н.С. О тепловом режиме верхнего слоя земной коры в районе Якутска. *Тепло- и массообмен в мерзлых толщах земной коры*. Салтыков Н.И. (ред.). М.: Изд-во АН СССР; 1963:9–55.

Ivanov N.S. On the thermal regime of the upper earth crust around Yakutsk area. *Heat and mass exchange in frozen layers of the Earth Crust*. Saltykov N.I. (ed.). Moscow: USSR Academy of Science Press; 1963:9–55. (In Russ.)

3. Арэ Ф.Э. Температурный режим горных пород под усыхающим термокарстовым озером в Центральной Якутии. *Вопросы географии Якутии*. Л.: Гидрометеоиздат; 1973:70–75.

Are F.E. Ground temperature regime beneath a draining thaw lake in Central Yakutia. *Issues of the Geography of Yakutia*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973:70–75. (In Russ.)

4. Гаврилова М.К. Тепловой баланс лиственничного леса на Лено-Амгинском междуречье. *Гидроклиматические исследования в лесах Сибири. Взаимотношение леса и среды*. М.: Наука; 1967:28–52.

Gavrilova M.K. Thermal balance of larch forest in the Leno-Amginsky interfluvium. *Hydro-Climatic studies in the forests of Siberia. Relationship between the forest and the environment*. Moscow: Nauka; 1967:28–52. (In Russ.)

5. Павлов А.В. *Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР*. Якутск: Книжное изд-во; 1975. 302 с.

Pavlov A.V. *Heat exchange between soil and atmosphere in high and mid-latitudes of the USSR*. Yakutsk: Publishing House; 1975. 302 p. (In Russ.)

6. Павлов А.В. *Теплофизика ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1979. 285 с.

Pavlov A.V. *Thermal physics of landscapes*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 285 p. (In Russ.)

7. Павлов А.В., Прокопьев А.Н., Скачков Ю.Б., Вотякова Н.И. Тепловой режим и промерзание грунтов намывной насыпи в пойме р. Лены. *Теплофизические исследования криолитозоны Сибири*. Новосибирск: Наука, 1983:135–147.

Pavlov A.V., Prokopyev A.N., Skachkov Y.B., Votyakova N.I. Thermal regime and freezing of soils of the alluvial embankment in the floodplain of the river Lena. *Thermophysical studies of the permafrost zone of Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1983:135–147. (In Russ.)

8. Замолотчикова С.А., Смирнова В.Н. Температура и сезонное оттаивание пород на Лено-Вилуйском водоразделе. *Мерзлотные исследования*. Вып. 4. М.: Изд-во МГУ; 1974:141–147.

Zamolotchikova S.A., Smirnova V.N. Temperature and seasonal thawing of rocks in the Leno-Vilyuy watershed. Iss. 14 *Permafrost research*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1974:141–147. (In Russ.)

9. Заболотник С.И. Динамика температурного поля сезонно – и многолетнемерзлых пород при нарушении покровов в Центральной Якутии. *Общее мерзлотоведение: Материалы к III Междунар. конф. по мерзлотоведению*. Новосибирск: Наука; 1978:210–214.

Zabolotnik S.I. Dynamics of the temperature field of seasonally - and permafrost rocks in violation of the covers in Central Yakutia. *General permafrost: Materials for the 3rd International conference on permafrost*. Novosibirsk: Nauka; 1978:210–214. (In Russ.)

10. Полтев Н.Ф., Ершов Э.Д., Свердлов М.Ф. Мерзлотные условия на участке междуречья Ханчалы–Кенкеме. *Мерзлотные исследования*. Вып. 10. М.: Изд-во МГУ; 1970:198–202.

Poltev N.F., Ershov E.D., Sverdlov M.F. Permafrost conditions in the interfluvium section of Khanchaly-Kenkeme. *Permafrost research*. Iss. 10. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1970:198–202. (In Russ.)

11. Турбина М.И. Изменение природных условий на одном из участков действующего газопровода (Центральная Якутия). *Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР*. Новосибирск: Наука; 1980:31–36.

Turbina M.I. Changes in natural conditions on one of the sections of the existing gas pipeline (Central Yakutia). *Permafrost research in the developing regions of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1980:31–36. (In Russ.)

12. Константинов И.П., Матковский В.Н. Изменение геокриологических условий трасс газопроводов Якутии. *Природные условия осваиваемых регионов Сибири*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1987:126–134.

Konstantinov I.P., Matkovsky V.N. Changes in geocryological conditions of gas pipeline routes in Yakutia.

*Natural conditions of the developing regions in Siberia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1987:126–134. (In Russ.)

13. Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1988. 240 с.

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

14. Федоров А.Н., Максимов Т.Х., Гаврильев П.П. и др. «Спасская падь»: *Комплексные исследования мерзлотных ландшафтов.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН; 2006. 210 с.

Fedorov A.N., Maximov T.Kh., Gavriliev P.P. et al. *Spasskaya Pad: Integrated Investigations of the Permafrost Landscapes;* Yakutsk: Permafrost Institute Press; 2006. 210 p. (In Russ.)

15. Федоров А.Н. Роль вырубок в развитии мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии. *Региональные инженерные геокриологические исследования.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1985:111–117.

Fedorov A.N. The role of logging in the development of permafrost landscapes in Central Yakutia. *Regional and Engineering Permafrost Investigations in Yakutia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1985:111–117. (In Russ.)

16. Павлов А.В. *Мониторинг криолитозоны.* Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2008. 229 с.

Pavlov A.V. *Permafrost Monitoring.* Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2008. 229 p. (In Russ.)

17. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V. et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes.* 2010;21(2): 136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>

18. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Шендер Н.И. Тепловое состояние верхних горизонтов криолитозоны Центральной Якутии при современном изменении климата. *Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, г. Якутск, 03–07 сентября 2011 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2011:398–403.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N., Shender N.I. Thermal state of upper permafrost in Central Yakutia under contemporary climate change. *Permafrost Engineering. Proceedings of the 9th International Symposium, September 03–07, 2011.* Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press; 2011:398–403. (In Russ.)

19. Varlamov S., Skachkov Y., Skryabin P. Current climate change effects on the ground thermal regime in Central Yakutia. *Sciences in Cold and Arid Regions.* 2014;6(4):282–292.

20. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Evolution of the thermal state of permafrost under climate warming in Central Yakutia. *The Holocene.* 2019;29(9): 1401–1410. <https://doi.org/10.1177/0959683619855959>

21. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of climate change on the thermal condition of Yakutia’s permafrost landscapes (Chabyda Station). *Land.* 2020;9(5):132. <https://doi.org/10.3390/land9050132>

22. Варламов С.П., Скрыбин П.Н. Трансформация мерзлотных компонентов экосистем под влиянием природно-технических систем. *Успехи современного естествознания.* 2012;(11):74–76.

Varlamov S.P., Skryabin P.N. Transformation of frozen parts ecosystems under the influence of natural and technical systems. *Advances in current natural sciences.* 2012;(11):74–76. (In Russ.)

23. Варламов С.П., Скрыбин П.Н. *Антропогенные воздействия на тепловой режим грунтов Центральной Якутии.* Saarbrücken, Deutschland, Германия: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing; 2013. 80 с.

Varlamov S.P., Skryabin, P.N. *Anthropogenic impact on the thermal regime of soils in Central Yakutia.* Saarbrücken, Germany; LAP LAMBERT Academic Publishing; 2013. (In Russ.)

24. Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н., Варламов С.П. Изменения температуры грунтов слоя годовых теплооборотов на якутском теплобалансовом стационаре за последние сорок лет. *Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума, г. Якутск, 03–07 сентября 2011 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН; 2011:444–449.

Skachkov Y.B., Skryabin P.N., Varlamov S.P. Near-surface ground temperature variations at the Yakutsk permafrost thermal monitoring site during the last 40 years. *Permafrost Engineering: Proceedings of the 9th International Symposium.* Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2011:444–449. (In Russ.)

25. Варламов С.П. Ландшафтно-типологическое картирование как основа экстраполяции стационарных исследований. *Региональные и инженерные геокриологические исследования.* Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1985:132–137.

Varlamov S.P. Landscape-typological mapping as a basis for extrapolation of stationary studies. *Regional and Engineering Permafrost Investigations in Yakutia.* Yakutsk: Permafrost Institute; 1985:132–137. (In Russ.)

26. Скрыбин П.Н., Варламов С.П., Скачков Ю.Б. *Межгодовая изменчивость теплового режима грунтов района Якутска.* Новосибирск: Изд-во СО РАН; 1998. 144 с.

Skryabin P.N., Varlamov S.P., Skachkov Yu.B. *Inter-annual variability of the ground thermal regime in the Yakutsk area.* Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 1998. 144 p. (In Russ.)

27. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. *Температурный режим грунтов мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии.* Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН; 2002. 218 с.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Ground temperature regime in permafrost landscapes of Cen-*

*tral Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute; 2002. 218 p. (In Russ.)

28. Скачков Ю.Б. Аномальные зимы и их роль в формировании термического режима грунтов. *Материалы Третьей конференции геокриологов России*. М.: Изд-во МГУ; 2005;3:239–244.

Skachkov Yu.B. Anomalous winters and their role in the formation of the thermal regime of soils. *Proceedings of the 3rd conference of Geocryologists of Russia*. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2005;4: 239–244. (In Russ.)

29. Скачков Ю.Б. Современное потепление климата в Якутии. *VIII научное совещание географов Сибири и Дальнего Востока: Материалы Российской конференции*. Иркутск: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН; 2007;1:92–93.

Skachkov Yu.B. Modern climate warming in Yakutia. *8th Scientific Meeting of Geographers of Siberia and the Far East: Materials of Russian Conference*. Irkutsk: Publishing House of the Sochava Institute of Geography SB RAS; 2007;1:92–93. (In Russ.)

30. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Современная изменчивость термического режима грун-

тов Тунгюлюнской террасы долины р. Лены. *Вопросы географии Якутии: Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны*. Якутск: СММК-МАСТЕР; 2013;11:38–43.

Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. Modern variability of the thermal regime of soils of the Tyungyulyunskaya terrace of the valley of the river Lena. *Questions of the geography of Yakutia: the impact of climate change on the natural processes of the permafrost*. Yakutsk: SMIK-MASTER; 2013;11:38–43. (In Russ.)

31. Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами. *Криосфера Земли*. 2004;8(4):3–11.

Pavlov A.V., Skachkov Yu.B., Kakunov N.B. The correlation between perennial changes of soil seasonal thawing depth and meteorological factors. *Kriosfera Zemli*. 2004;8(4):3–11. (In Russ.)

32. Орлов А.И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии. *Научный журнал КубГАУ*. 2020;160(06). <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-160-011>

#### Об авторах

ВАРЛАМОВ Степан Прокопьевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus AuthorID: 22958732100, РИНЦ AuthorID: 63432, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

СКАЧКОВ Юрий Борисович, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus Author ID: 15120142400, РИНЦ AuthorID: 63431, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

СКРЯБИН Павел Николаевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus AuthorID: 6508006475, РИНЦ AuthorID: 63433, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

БАЛУТА Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, РИНЦ AuthorID: 879007, e-mail: vbaluta@yandex.ru

#### About the authors

VARLAMOV, Stepan Prokopievich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2021-9686>, ResearcherID: V-9370-2018, Scopus Author ID: 22958732100, RISC AuthorID: 63432, e-mail: svarlamov@mpi.ysn.ru

SKACHKOV, Yuri Borisovich, Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5602-8956>, Scopus AuthorID: 15120142400, RISC AuthorID: 63431, e-mail: ubskachkov@mpi.ysn.ru

SKRYABIN, Pavel Nikolayevich, Cand. Sci. (Geogr.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus Author ID: 6508006475, RISC AuthorID: 63433, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

BALUTA, Victor Ivanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, RISC AuthorID: 879007, e-mail: vbaluta@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 26.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.07.2023

Принята к публикации / Accepted 02.09.2023

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424>

Оригинальная статья

## Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных

Г. П. Стручкова<sup>1,✉</sup>, Т. Г. Крупнова<sup>2</sup>, О. В. Ракова<sup>2</sup>, С. А. Тихонова<sup>1</sup>,  
Н. С. Шеин<sup>1</sup>, Т. А. Капитонова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физико-технических проблем Севера  
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

✉ [pandoramy8@list.ru](mailto:pandoramy8@list.ru)

### Аннотация

Тепловые аномалии города, называемые еще «тепловыми островами», образуются под влиянием антропогенных факторов. В г. Якутск влияние на возникновение температурных аномалий оказывают ГРЭС-1, ГРЭС-2 и другие промышленные комплексы. Скудность жилых построек и сооружений, препятствующих движению воздушных масс, не дает возможность поддерживать состояние криолитозоны на должном уровне, что в условиях потепления климата способствует деградации многолетней мерзлоты. В работе для определения подобных «тепловых островов» на территории г. Якутск предлагается использование методов дистанционного зондирования, основанных на данных теплового инфракрасного диапазона спутника Landsat 8, обеспечивающего получение информации с интервалом 16 суток. На основе предложенной методики проведен анализ тепловых аномалий различных районов г. Якутск и его окрестностей в летнее и зимнее время, которые создают зоны возможной оттайки мерзлоты и влияют на геокриологическую безопасность города. Наличие подобной информации позволит отслеживать процесс изменения температурного поля территории и проводить превентивные мероприятия по устойчивости зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** температурные аномалии, тепловой остров, тепловой инфракрасный диапазон космоснимков, антропогенное воздействие, температурные карты поверхности земли, Landsat 8

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Пер. № 121032200040-5, научная тема FWRS-2021-0018).

**Для цитирования:** Стручкова Г.П., Крупнова Т.Г., Ракова О.В., Тихонова С.А., Шеин Н.С., Капитонова Т.А. Определение тепловых аномалий г. Якутск по результатам дешифрирования спутниковых данных. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):415–424. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424>

Original article

## Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data

G. P. Struchkova<sup>1,✉</sup>, T. G. Krupnova<sup>2</sup>, O. V. Rakova<sup>2</sup>, S. A. Tikhonova<sup>1</sup>,  
N. S. Shein<sup>1</sup>, T. A. Kapitonova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North,

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

<sup>2</sup>Chemistry Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

✉ [pandoramy8@list.ru](mailto:pandoramy8@list.ru)

### Abstract

Thermal anomalies in the city, otherwise called “heat islands, “ are formed under the influence of anthropogenic factors. In Yakutsk, temperature anomalies were caused by GRES-1, GRES-2, and other industrial complexes. The crowding of residential buildings and structures prevents the movement of air masses and makes it impossible to

maintain the condition of the cryolithozone at the proper level, which contributes to the degradation of permafrost in a warming climate. We propose to identify “heat islands” in Yakutsk using remote sensing methods, based on the data of the thermal infrared range of the Landsat 8 satellite, which provides information with an interval of 16 days. The thermal anomalies in various areas of Yakutsk and its vicinity in summer and winter, which create zones of possible permafrost degradation and affect the geocryological safety of the city, were analyzed based on the proposed methodology. This information will make it possible to monitor the process of changes in the temperature field of a territory and implement preventive measures for the stability of buildings and structures.

**Keywords:** thermal anomalies, heat island, thermal satellite images, anthropogenic impact, temperature maps of the earth's surface, Landsat 8

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Reg. number: 121032200040-5, theme number: FWRS-2021-0018).

**For citation:** Struchkova G.P., Krupnova T.G., Rakova O.V., Tikhonova S.A., Shein N.S., Kapitonova T.A. Identification of thermal anomalies in Yakutsk using satellite data. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):415–424. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-415-424>

## Введение

**Тепловые аномалии города** являются проявлением интенсивных антропогенных преобразований земной поверхности, а именно, последствием использования энергии, транспорта, промышленности и давления на природные ресурсы, вызванного быстрой урбанизацией, незапланированными застройками и недостаточно корректно спроектированной городской структурой. Дороги, здания и другие объекты инфраструктуры поглощают и повторно излучают солнечную энергию в большей степени, чем леса, водные объекты и природные ландшафты. Районы города, где сильно сконцентрированы эти структуры и мало зелени, становятся «островами» с более высокими температурами, чем территории отдаленных районов. Подобные очаги тепла называются «тепловыми островами». Исследование температурных аномалий города как природно-антропогенного комплекса является одним из инструментов в определении экологического состояния города. «Острова тепла» могут формироваться как днем, так и ночью, в небольших и больших городах, пригородах, южном и северном климате и в любое время года.

В 1810-х годах Люком Ховардом [1] впервые был обнаружен феномен «теплого острова» города, т. е. повышение температуры городского пространства в сравнении с пригородными районами. В середине XX в. начались основные исследования «тепловых островов». В настоящее время накоплено достаточно много исследований этого феномена [2–5 и др.].

Обзор научных исследований и данных показал, что эффект «теплого острова» в будущем будет увеличиваться по мере роста и изменения инфраструктуры, плотности населения и пространственной протяженности городских терри-

торий [4]. Подобные исследования актуальны и потому, что на данный момент проблеме городских «тепловых островов» в РФ по сравнению с зарубежными странами уделено гораздо меньше внимания.

Осуществление исследований эффекта «теплого острова» городов традиционными методами, основанными на натурных наблюдениях, является крайне трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому рационально привлечение материалов спутниковых изображений в тепловом инфракрасном диапазоне.

«Тепловые острова» обычно определяются разницей температур между городами и прилегающими районами. Температура также может быть разной внутри города. В некоторых областях гораздо теплее, чем в других, из-за неравномерного распределения теплопоглощающих зданий и тротуаров, в то время как в других местах прохладнее из-за наличия деревьев и зелени. Существует два типа «тепловых островов»: поверхностные «тепловые острова» и атмосферные. Они различаются способами их формирования, методами, используемыми для выявления и измерения, воздействием и, в некоторой степени, методами, доступными для их охлаждения.

**Поверхностные «острова тепла».** Эти «тепловые острова» образуются из-за того, что городские поверхности, такие как дороги и крыши, поглощают и излучают тепло в большей степени, чем большинство естественных поверхностей. В жаркий день при температуре 32 °C обычные кровельные материалы могут нагреваться на 15 °C выше, чем температура воздуха [5]. «Тепловые острова» на поверхности, как правило, наиболее интенсивны в дневное время, когда светит солнце. Размеры зданий и расстояние между ними в городе воздействуют на возмож-

ность поглощать и излучать солнечную энергию и влиять на потоки ветра. В районах, где застройка достаточно плотная, конструкции и поверхности, перекрытые соседними зданиями, становятся большими термальными массами, которые недостаточно быстро отдают свое тепло.

**Атмосферные «тепловые острова».** Эти «тепловые острова» образуются в результате более теплого воздуха в городских районах по сравнению с более холодным в отдаленных. Атмосферные «тепловые острова» различаются по интенсивности гораздо меньше, чем поверхностные.

Повышенные температуры на «тепловых островах» могут влиять на окружающую среду, экономику и здоровье человека.

Исследования температурных аномалий на различных участках территории города методами полевых измерений являются дорогостоящими, трудоемкими и сложными работами. Использование методов и данных дистанционного зондирования территории с применением космоснимков – альтернативный информативный и качественный подход исследования изменений состояния окружающей среды. Тепловые космические снимки имеют широкий спектр возможностей. Данные дистанционного зондирования в тепловом инфракрасном диапазоне применяются для мониторинга природно-антропогенных объектов и в разных отраслях исследований земной поверхности [6].

Возможности использования космоснимков в тепловом инфракрасном диапазоне:

- своевременное обнаружение техногенных выбросов и тепловых аномалий, например, контроль тепловых выбросов промышленных объектов и ТЭЦ, выявление аномальных источников теплового излучения и классификация территорий по значениям радиационной температуры, выделение границ неоднородных областей и выявление дымовых шлейфов на основе специальных алгоритмов;

- обнаружение суммарных загрязнений природной среды объектами промышленного и городского хозяйства, обнаружение погодных аномалий с применением ГИС-технологий, методов географического дешифрирования и компьютерной обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ);

- разработка тематических методик обработки спутниковых данных и построение температурных карт городов.

Во многих российских и зарубежных исследованиях приводится и обосновывается связь между городским «тепловым островом» и городским «островом загрязнения» [2, 3, 7–15]. В данной работе делается попытка использования результатов дешифрирования тепловых данных космической съемки в зимний и летний периоды с 2013 по 2020 г. для определения зон геокриологических рисков на территории г. Якутск. Проблема влияния антропогенных факторов и современного тренда изменения климата на уменьшение мощности многолетней мерзлоты и, тем самым, на устойчивость и безопасность фундаментов и грунтов под зданиями и сооружениями является жизненно важной для городов Севера, построенных на многолетнемерзлых грунтах. Этим обусловлена чрезвычайная актуальность исследований, использующих как методы численного моделирования, так и организацию наземного геокриологического мониторинга, результаты которых позволили установить, что вследствие современных изменений климата температура мерзлых пород в старой части г. Якутск на глубине 10 м повысилась на 1–2, а местами даже на 3 °С [16–21]. В ряде работ [22–25] для обнаружения и исследования «тепловых островов» использовались спутники Landsat, обеспечивающие получение данных в инфракрасном диапазоне с различной детализацией.

Наличие «тепловых островов» в условиях Севера повышает температуру поверхности земли и может значительно повлиять на состояние грунта и устойчивость строений на прилегающей территории как отдельных сооружений, так и больших промышленных комплексов. Повышение температуры влияет на гидрологические условия, образование таликов, нарушение стока воды и образование наледей в черте города [19, 20]. «Острова тепла» оказывают определенное влияние на тепло- и влагосодержание почвенного покрова, что может вызвать как пучение, так и термопросадку грунта. Это необходимо также учитывать при расчете геокриологического прогноза в городской среде [17].

«Тепловые острова» в условиях Севера повышают температуру поверхности земли и могут значительно повлиять на состояние грунта и устойчивость строений на прилегающей территории. Скуденность жилых построек и сооружений препятствует движению воздушных масс,

тем самым, не давая возможности поддерживать состояние криолитозоны на должном уровне, что особенно актуально в условиях потепления климата.

### Материалы и методы

В данной работе рассмотрены разновременные и разносезонные снимки, сделанные в тепловом инфракрасном диапазоне в зимний (декабрь–январь) и летний (май–июнь) периоды с 2013 по 2020 г.

Для исследования «теплого острова» в г. Якутск были использованы снимки со спутника Landsat 8 OLI с 2013 по 2020 г. за декабрь–январь. Для сравнения зимних и летних снимков были исследованы май–июнь 2019–2020 гг. с того же спутника. Анализ осуществлялся с помощью программных продуктов ArcGIS 10.2, QGIS 2.18.28. по методике, описанной в работах [22–25].

В программном комплексе QGIS 2.18.28 был установлен модуль LAND SURFACE TEMPERATURE.

Принципы работы модуля заключаются в следующем.

1. Вкладка Radiance: подгружаем температурный канал у Landsat 8 OLI – 10 канал THERMAL INFRARED и файл метаданных, затем преобразуем цифровые числа в яркость и калибруем значения яркости.

2. Вкладка Brightness Temperature: подгружаем расчет Radiance и производим преобразование яркости в яркостную температуру.

3. Вкладка NDVI: подгружаем 4 (RED) и 5 (NIR) каналы и производим расчет нормированного разностного индекса растительности NDVI.

4. Вкладка Land Surface Emissivity: подгружаем расчет NDVI и производим оценку коэффициента излучения земной поверхности с использованием подхода на основе NDVI.

5. Вкладка Land Surface Temperature Algorithm: требуется расчет атмосферных параметров, который можно сделать на сайте NASA: <https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>, в данной там таблице необходимо внести дату и время, когда был сделан снимок, и координаты нужного участка. Расчет отправляется на электронную почту. Далее подгружаем расчеты Radiance и Land Surface Emissivity и получаем необходимую нам карту – температуру поверхности Земли [22, 23].

В конце работы выходит карта температур, которую можно подкрасить для наглядности в

нужные цвета с помощью инструмента LAYER STYLING. На полученной карте более яркий красный цвет соответствует более высокой температуре поверхности (рис.1, 2).

Исследование проблемы «тепловых островов» методами географического дешифрирования позволяет определить основные закономерности распределения тепловых аномалий в пространстве и времени, их связь с антропогенными и природными объектами различных типов.

### Результаты

Результаты исследований показали, что созданные на основе дешифрирования тепловых данных космической съемки картографические материалы позволяют выделить промышленные объекты, зоны скученности жилых районов, пустыри без озеленения – места, оказывающие сильное влияние на общую интенсивность теплового излучения города и, тем самым, образующие зоны геокриологических рисков, влияющих на безопасность и устойчивость сооружений.

В тепловом балансе города участвуют антропогенная и природная составляющие. Природная составляющая – это радиационный баланс, являющийся одним из главных климатообразующих факторов. Техногенная составляющая – это поступление тепла от транспорта, со сточными водами, от стационарных источников тепла (предприятий промышленности и теплоснабжения), образованного при нагреве солнечными лучами асфальта и зданий. В последние годы все составляющие антропогенного теплового баланса города становятся сравнимы с природной составляющей.

В результате анализа снимков выделены области тепловых аномалий, связанные с техногенными проявлениями (городские территории, загрязнение водной и воздушной среды). Лучше всего тепловые аномалии техногенных объектов наблюдаются на зимних снимках. Температурная разница между «тепловым островом» города и пригородной зоной составляет от 10 до 25 °С на зимних и около 10 °С на летних снимках.

В г. Якутск на возникновение температурных аномалий оказывают влияние в основном стационарные источники: ГРЭС-1 и после ввода в эксплуатацию в 2018 году ГРЭС-2, промышленные предприятия – объекты лесопромышленной отрасли, домостроительный комбинат и др. Скученные жилые постройки и сооружения препятствующие движению воздушных масс, в какой-то

степени дорожная сеть, также являются источниками выделения тепла. На протяжении всего года эти источники выделяют большое количество тепла, притом что количество выбросов неизменно нарастает.

На рис. 1 представлено распределение средней температуры в пикселе зимних снимков 2013–2020 гг. Температурное поле неоднородно. Район ГРЭС, ГРЭС-2, центральная часть города, водная поверхность возле лесопилки имеют выраженные области более высоких значений температур. Минимальная средняя температура на территории города и его окрестностей составила  $-43^{\circ}\text{C}$ , максимальная  $-32^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура внутри городской черты превышает среднюю температуру удаленных окрестностей на 8–10 градусов.

На рис. 2 представлено распределение средней температуры в пикселе летних снимков 2019–2020 гг. Температурное поле также неоднородно. К местам с аномально высокими температурами поверхности добавляются места скученности жилых построек и сооружений: 203 микрорайон, торговые центры, аэропорт, ДСК (домостроительный комбинат) и открытые местности без озеленения – пустыри. Также заметно влияние рельефа местности – температура земной поверхности повышена у подножия сопок. Минимальная средняя температура на территории города и его окрестностей составила  $18-20^{\circ}\text{C}$ , максимальная  $35^{\circ}\text{C}$ . Средняя температура внутри городской черты превышает среднюю температуру удаленных окрестностей на 8–10 градусов.

**Уменьшение «тепловых островов».** Существует множество стратегий для уменьшения серьезности эффекта «теплого острова». Многие сообщества принимают меры по сокращению городских «тепловых островов», используя пять основных стратегий: 1) увеличение древесного и растительного покрова, 2) установка зеленых крыш, 3) установка прохладных, в основном отражающих, крыш, 4) использование прохладных тротуаров (отражающих), 5) использование методов разумного роста.

#### *Стратегии и технологии*

*Деревья и растительность.* Расширение растительного и древесного покрова снижает температуру поверхности и воздуха, создавая тень и охлаждение за счет эвапотранспирации [12, 25]

Зеленые крыши – выращивание растительного слоя (растений, кустарников, трав и / или де-

ревьев) на крыше снижает температуру поверхности крыши и окружающего воздуха и улучшает управление ливневыми водами.

Прохладные крыши – установка прохладной крыши, сделанной из покрытий или материалов, значительно отражающих солнечный свет и тепло от зданий, снижает температуру крыш, повышает комфорт жителей и снижает потребность в энергии [12].

Прохладные тротуары – использование материалов для мощения тротуаров, стоянок и улиц, которые остаются более прохладными, чем обычные тротуары (за счет отражения большей солнечной энергии и усиления испарения воды), не только остужают окружающий воздух и поверхность тротуара, но также может повысить видимость в ночное время и уменьшить сток ливневой воды [12].

Умный рост – эти методы охватывают ряд стратегий развития и сохранения, которые помогают защитить природную среду и в то же время делают наши сообщества более привлекательными, экономически более выгодными и более пригодными для жизни.

#### **Заключение**

По данным, основанным на тепловых изображениях инфракрасного диапазона с использованием спутника LANDSAT 8, были получены изображения температур поверхности земли в г. Якутск и его окрестностях.

На основе построенных карт выполнен анализ динамики тепловых аномалий поверхности земли различных районов г. Якутск и его окрестностей в летнее и зимнее время, а также установлены пределы территориальной изменчивости температуры городской поверхности. Результаты исследований показали, что созданные на основе дешифрирования тепловых данных инфракрасного диапазона с использованием спутника Landsat 8 картографические материалы, позволяют выделить промышленные объекты, зоны скученности жилых районов, пустыри без озеленения – места, оказывающие большое влияние на общую интенсивность теплового излучения города и, тем самым, образующие зоны геоэкологических рисков, влияющих на геоэкологическую безопасность. Наличие подобной информации позволит отслеживать процесс изменения температурного поля территории города и, используя комплексный анализ совместно с результатами традиционных методов наземного мони-

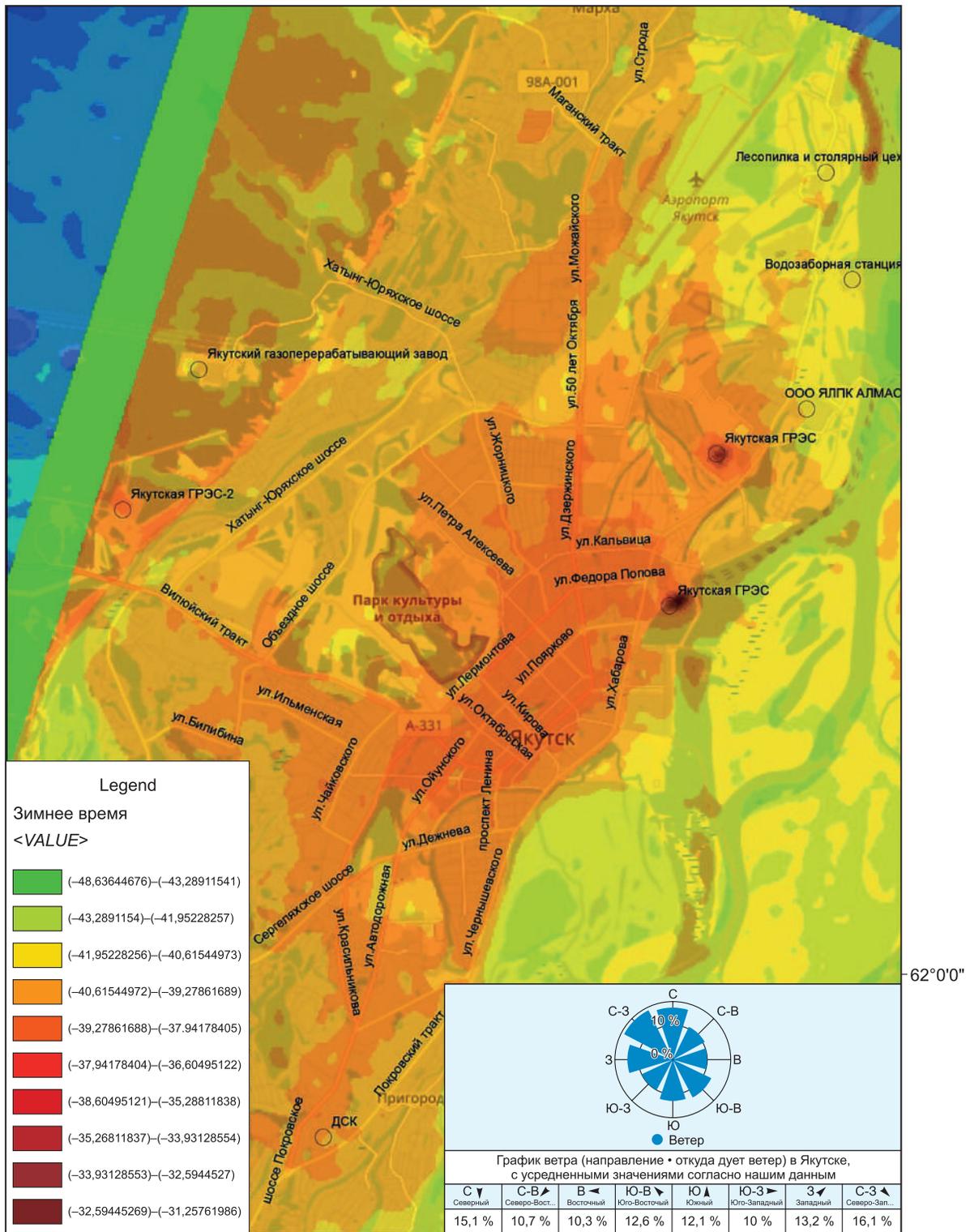


Рис. 1. Распределение средней температуры в пикселе по зимним снимкам 2013–2020 г.

Fig. 1. Distribution of average temperature in a pixel, according to winter images (2013–2020)

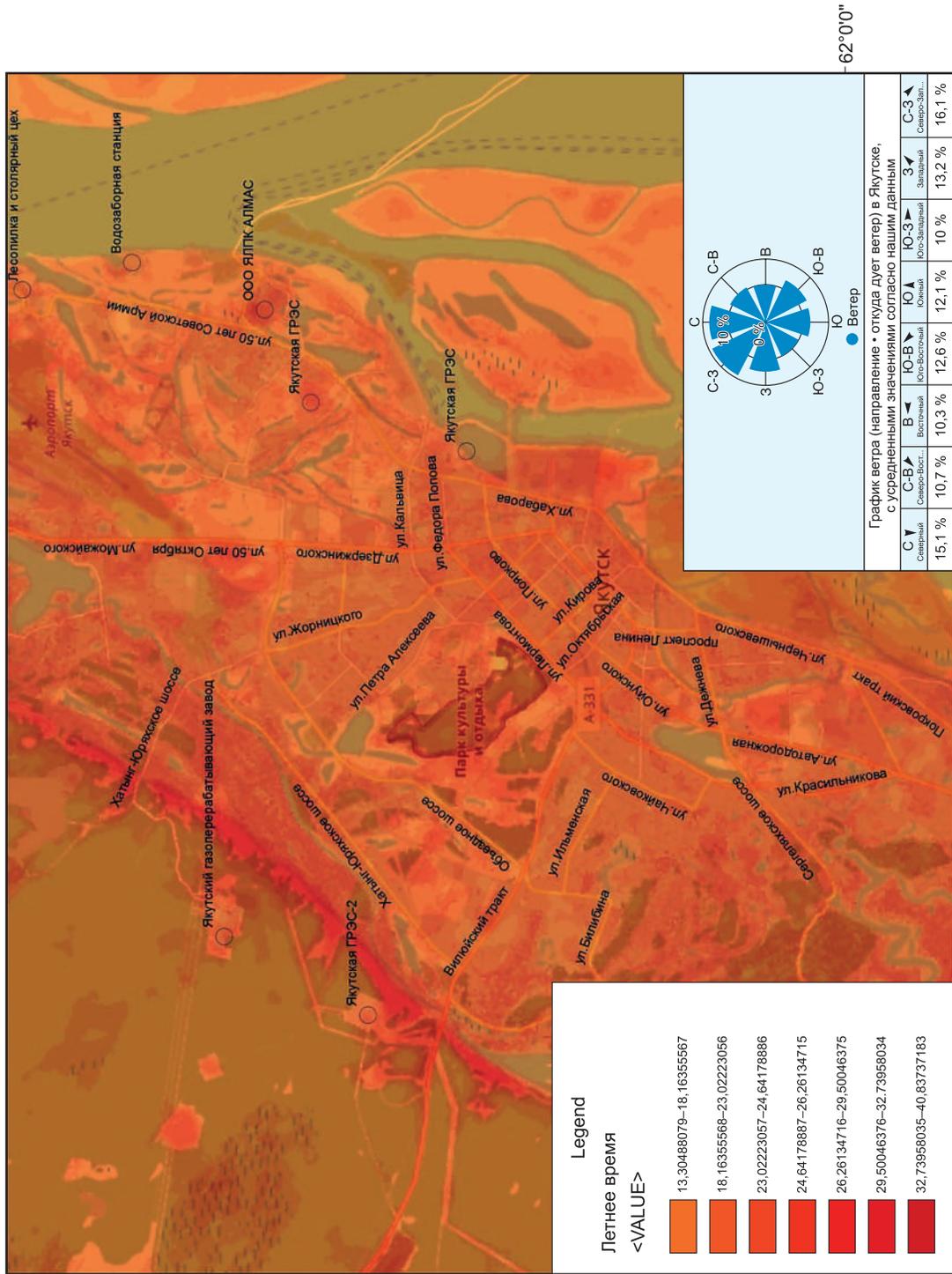


Рис. 2. Распределение средней температуры в пикселе по летним снимкам 2019–2020 г.

Fig. 2. Distribution of average temperature in a pixel, according to summer images (2019–2020)

торинга состояния мерзлых грунтов, проводить превентивные мероприятия по предотвращению деградации многолетней мерзлоты, поддерживать устойчивость зданий и сооружений в условиях меняющегося (потепление) климата.

### Список литературы / References

1. Локощенко М.А. Особенности городского «острова тепла» в Москве. *Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы: Тезисы докладов XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых, г. Борок, 30 мая – 04 июня 2011 г.* Борок; 2011:9–20.

Lokoshchenko M.A. Features of urban “heat island” in Moscow. *Atmospheric composition. Atmospheric electricity. Climatic processes: Proceedings of the 15th All-Russian school-conference of young scientists, Borok, May 30 – June 04, 2011.* Borok; 2011:19–20. (In Russ.)

2. Дубровская С.А., Ряхов Р.В. Тепловые структуры и аномалии города Магнитогорска по результатам дешифрирования мультиспектральных изображений. *Вестник Оренбургского гос. университета.* 2015; 10(185):286–288.

Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V. Thermal structures and anomalies of the city of Magnitogorsk based on the results of interpretation of multispectral images. *Vestnik Orenburgskogo gos. Universiteta= Bulletin of the Orenburg state. university.* 2015;10(185):286–288. (In Russ.)

3. Грищенко М.Ю., Константинов П.И. Дешифрирование поверхностного острова тепла Москвы по тепловым космическим снимкам с ресурсных спутников. *Збірник наукових праць.* 2016;(23):27–34.

Grishchenko M.Yu., Konstantinov P.I. Decoding of surface heat island of Moscow by thermal space images from resource satellites. *Collection of scientific papers.* 2016;(23):27–34. (In Russ.)

4. Hibbard K.A., Hoffman F.M., Huntzinger D., West T.O. Changes in land cover and terrestrial biogeochemistry. *Climate Science Special Report: A Sustained Assessment Activity of the U.S. Global Change Research Program.* Washington; 2017:405–442.

5. Simmons M.T., Gardiner B., Windhager S. et al. Green roofs are not created equal: The hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a subtropical climate. *Urban Ecosystems.* 2008(11):339–348. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>

6. Kalinicheva S.V., Fedorov A.N., Zhelezniak M.N. Mapping Mountain permafrost landscape in Siberia using Landsat thermal imagery. *Geosciences (Switzerland).* 2019;9(1). <https://doi.org/10.3390/geosciences9010004>

7. Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Мониторинг температуры земной поверхности территории Красноярска и окрестностей на основе спутниковых данных Landsat-8. *Успехи современного естествознания.*

2018;(7):177–182. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36822>

Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Monitoring of Earth surface temperature in Krasnoyarsk and its surroundings based on Landsat-8 satellite data. *Advances in current natural sciences.* 2018;(7):1770182. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36822>. (In Russ.)

8. Ying Ding, Huihui Feng, Bin Zou, Yunfeng Nie. Heterogeneous air pollution controls its correlation to urban heat island: A satellite perspective. *Advances in Space Research.* 2022;69;12(15):4252–4262. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.03.027>

9. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8. *Известия высших учебных заведений. Электроника.* 2021;26(3-4):314–323. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323>

Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Study of Anthropogenic Changes in the Urban Landscape Based on the Landsat-8 Infrared Range. *Proceedings of Universities. Electronics.* 2021;26(3-4):314–323. (In Russ.) <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2021-26-3-4-314-323>

10. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Detection of changes in urban environment based on infrared satellite data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;537(6):062051. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062051>

11. Гостева А.А., Матузко А.К., Якубайлик О.Э. Выявление изменения городской среды на основе спутниковых данных инфракрасного диапазона (на примере Красноярска). *ИнтерКарто. ИнтерГИС.* 2019; 25(2):90–100. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100>

Gosteva A.A., Matuzko A.K., Yakubaylik O.E. Detection of urban environment changes based on infrared satellite data (on the example of Krasnoyarsk). *InterCarto. InterGIS.* 2019;25(2):90–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-2-25-90-100>

12. Ulpiani Giulia. On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *The Science of the Total Environment.* 2020;751(38):141727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141727>

13. Li Y., Zhang J., Sailor D.J., Ban-Weiss G.A. Effects of urbanization on regional meteorology and air quality in Southern California. *Atmospheric Chemistry and Physics.* 2019;19(7):4439–4457. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-19-4439-2019>

14. Воронина П.В., Чубаров Д.Л., Добрецов Н.Н. Исследование температурного режима Новосибирской агломерации по данным спутникового зондирования. *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019): Сборник трудов Всероссийской конференции с международным участием, г. Бердск, 26–30 августа 2019 г.* Новосибирск: Изд-во ИВТ СО РАН; 2019:327–334.

Voronina P.V., Chubarov D.L., Dobretsov N.N. Investigation of temperature conditions in Novosibirsk agglomeration based on satellite sensing data. In: *Spatial data processing for monitoring natural and anthropogenic processes (SDM-2019): Proceedings of All-Russian conference with international participation, Berdsk, August 26–30, 2019*. Novosibirsk: IVT SO RAN; 2019: 327–334. (In Russ.)

15. Santamouris M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*. 2020;(207):109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>

16. Пермяков П.П., Варламов С.П., Скрыбин П.Н., Скачков Ю.Б. Численное моделирование термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата. *Наука и образование*. 2016;2(82):43–48.

Permyakov P.P., Varlamov S.P., Skryabin P.N., Skachkov Yu.B. Numerical simulation of the thermal state of cryolithozone in a changing climate. *Nauka i obrazovanie*. 2016;2(82):43–48. (In Russ.)

17. Пермяков П.П. Идентификация параметров математической модели теплообмена в мерзлых грунтах. Новосибирск: Наука; 2002. 86 с.

Permyakov P.P. *Identification of parameters of the mathematical model of heat and moisture transfer in frozen ground*. Novosibirsk: Nauka; 2002. 86 p. (In Russ.)

18. Чжан Р.В., Куницкий В.В., Павлова Н.А., Сыромятников И.И. О возобновлении геокриологического мониторинга на территории г. Якутска. *Наука и техника в Якутии*. 2020;1(38):12017.

Zhang R.V., Kunitsky V.V., Pavlova N.A., Syromyatnikov I.I. On the resumption of geocryological monitoring in the territory of Yakutsk. *Science and technology in Yakutia*. 2020;1(38):12–17. (In Russ.)

19. Алексеева О.И., Балабаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В.

Природные и техногенные проблемы г. Якутска. *Наука и образование*. 2006;4(44):94–98.

Alexeeva O.I., Balabaev V.T., Grigoryev M.N., Makarov V.N., Zhang R.V., Shatz M.M., Shepelev V.V. Natural and anthropogenic problems of Yakutsk. *Nauka i obrazovanie*. 2006;4(44):94–98. (In Russ.)

20. Шац М.М. Городская инфраструктура города Якутска (современное состояние и пути повышения надежности). *Наука и образование*. 2011;4(64):28–35.

Shatz M.M. Urban infrastructure of Yakutsk (current state and ways to improve reliability). *Nauka i obrazovanie*. 2011;4(64):28–35. (In Russ.)

21. Алексеева О.И., Демченко Р.Я., Курчатова А.Н. Мониторинг мерзлых оснований зданий в Якутске. *Криосфера Земли*. 1999;3(4):9–14.

Alexeeva O.I., Demchenko R.Ya., Kurchatova A.N. Monitoring of frozen foundations of buildings in Yakutsk. *Earth Cryosphere*. 1999;3(4):9–14. (In Russ.)

22. Оценка температуры поверхности из снимка Landsat-8 при помощи Land Surface Temperature QGIS Plugin. <https://wiki.gis-lab.info/w/>.

Estimation of the surface temperature from the Landsat-8 image using the Land Surface Temperature QGIS Plugin. <https://wiki.gis-lab.info/w/>. (In Russ.)

23. Isaya Ndossi M., Avdan U. Application of open source coding technologies in the production of land surface temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS Plugin. *Remote Sensing*. 2016;8(5):413. <https://doi.org/10.3390/rs8050413>

24. Jumari N.A., Ahmed A.N., Huang Yu.F., Ng J.L., Koo Ch.H., Chong K.L., Sherif M., Elshafie A. Analysis of urban heat islands with landsat satellite images and GIS in Kuala Lumpur Metropolitan City. *Heliyon*. 2023; (9):e18424. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18424>

25. Jain Sh., Sannigrahi Sr., Sen S., Bhatt S., Chakraborti S., Rahmat Sh. Urban heat island intensity and its mitigation strategies in the fast-growing urban area. *Journal of Urban Management*. 2020;9(1):54–66. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.09.004>

#### Об авторах

СТРУЧКОВА Галина Прокопьевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5161-979X>, ResearcherID: K-3234-2018, e-mail: pandoramy8@list.ru

КРУПНОВА Татьяна Георгиевна, кандидат химических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>, ResearcherID: N-4304-2014, e-mail: krupnovatg@susu.ru

РАКОВА Ольга Викторовна, кандидат химических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>, ResearcherID: ABC-5896-2020, e-mail: rakovaov@sus.ru

ТИХОНОВА Сардана Алексеевна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, e-mail: sardankobeleva@gmail.com

ШЕИН Николай Сергеевич, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-000107665-6944>, e-mail: shnnc@yandex.ru

КАПИТОНОВА Тамара Афанасьевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, ResearcherID: K-4201-2018, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

*About the authors*

STRUCHKOVA, Galina Prokopevna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5161-979X>, ResearcherID: K-3234-2018, e-mail: pandoramy8@list.ru

KRUPNOVA, Tatyana Georgievna, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0862-710X>, ResearcherID: N-4304-2014, e-mail: krupnovatg@susu.ru

RAKOVA, Olga Viktorovna, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5788-5933>, e-mail: rakovaov@susu.ru

TICHONOVA, Sardana Alekseevna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, e-mail: sardankobeleva@gmail.com

SHEIN, Nikolay Sergeevich, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0001-7665-6944>, e-mail: shnck@yandex.ru

KAPITONOVA, Tamara Afanesevna, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8513-032X>, ResearcherID: K-4201-2018, e-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 20.08.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 20.06.2023*

*Принята к публикации / Accepted 17.08.2023*

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

### Экология

УДК 502.175(470.21): [634.18:632.15]  
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>

Оригинальная статья

### Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark.

Н. В. Василевская✉, А. И. Сикалюк

Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Российская Федерация  
✉[n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Аннотация

В импактной зоне экологически опасных предприятий г. Мурманск (ТЭЦ, мусоросжигательный завод, морской торговый порт) проведены исследования содержания тяжелых металлов (Cu, Ni, V, Cd, Zn) в репродуктивных органах рябины Городкова (*Sorbus gorodkovii* Pojark.). Наиболее загрязнены тяжелыми металлами образцы из окрестностей мусоросжигательного завода. В окрестностях ТЭЦ, работающих на мазуте, выявлены высокие концентрации ванадия (4,2–4,8 мг/кг), превышение ПДК по Cu, Ni, Cd, Zn. Биомониторинг жизнеспособности пыльцы *S. gorodkovii* показал, что во всех образцах понижено содержание фертильной пыльцы по сравнению с контролем. На пробных площадках Центральной и Южной ТЭЦ доля фертильной пыльцы составляет 35–41 % (в контроле – 72 %). Индуцированная стерильность более чем в 2 раза превышает спонтанную. Высокие концентрации ванадия и других токсичных металлов в выбросах мурманских ТЭЦ оказывают гаметоцидное воздействие на мужской гаметофит *S. gorodkovii*. Выделены размерные группы фертильных и стерильных пыльцевых зерен по длине полярного диаметра: карликовая, нормальная, гипертрофированная. Показано, что в окрестностях ТЭЦ на угле и мазуте снижается доля фертильной пыльцы нормальных размеров (62–69 %), увеличивается содержание карликовой (16–18 %) и гипертрофированной (17,4–22,7 %). Стерильные пыльцевые зерна в основном имеют карликовые размеры (63–70 %). Результаты биомониторинга свидетельствуют о том, что ТЭЦ загрязняют городскую среду ванадием и другими токсичными металлами, вызывающими стерилизацию мужских гамет *S. gorodkovii*. Для улучшения экологической ситуации необходим переход котельных г. Мурманск на использование природного газа.

**Ключевые слова:** биомониторинг, Арктика, тяжелые металлы, *Sorbus gorodkovii* Pojark., стерильность пыльцы

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Центра лабораторного анализа и технических измерений по Мурманской области за помощь в выполнении атомно-абсорбционной спектрофотометрии на содержание тяжелых металлов.

**Для цитирования:** Василевская Н.В., Сикалюк А.И. Биомониторинг окружающей среды арктической урбанизированной территории с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii* Pojark. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):425–434. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>

Original article

### Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of *Sorbus gorodkovii* Pojark.

N. V. Vasilevskaya✉, A. I. Sikalyuk

Murmansk Arctic University, Murmansk, Russian Federation  
✉[n.v.vasilevskaya@gmail.com](mailto:n.v.vasilevskaya@gmail.com)

#### Abstract

This article investigates the content of heavy metals (Cu, Ni, V, Cd, Zn) in the reproductive organs of the Gorodkov's rowan (*Sorbus gorodkovii* Pojark.) growing in the impact zone of environmentally hazardous facilities in Murmansk

(CHP plants, waste incineration plant and trade sea port). The samples most contaminated by heavy metals were registered in the vicinity of the incineration plant. High concentrations of vanadium (4,2–4,8 mg/kg) and Cu, Ni, Cd, and Zn exceeding the limits of MPC are revealed in the impact zone of CHP plants operating on fuel oil. Biomonitoring of the viability of *S. gorodkovii* pollen showed that in all samples, the content of fertile pollen grains was reduced compared to that in the control. At the test sites of the Central and South CHP plants, the proportion of fertile pollen was 35–41 % (compared to 72 % in the control sample). The induced sterility was more than two times higher than the spontaneous sterility. High concentrations of vanadium and other toxic metals in emissions of Heating Plants have a gametocidal effect on the male gametophyte of *S. gorodkovii*. Groups of fertile and sterile pollen grains were selected according to their size: dwarf, normal, or hypertrophied. In the vicinity of the CHP plants, the proportion of fertile pollen of normal size decreased (62–69 %), whereas the content of dwarf (16–18 %) and hypertrophic pollen (17.4–22.7 %) increased. Sterile pollen grains were mostly dwarf (63–70 %). The results of biomonitoring indicated that CHP plants polluted the urban environment with vanadium and other toxic metals, which caused sterilization of *S. gorodkovii* male gametes. To improve the ecological situation in Murmansk, it is necessary to switch the thermal stations for the use of natural gas.

**Keywords:** biomonitoring, Arctic, heavy metals, *Sorbus gorodkovii* Pojark., pollen sterility

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the staff of the Center of Laboratory Analysis and Technical Measurements in the Murmansk Region for their help with atomic absorption spectrophotometry for heavy metals.

**For citation:** Vasilevskaya N.V., Sikalyuk A.I. Biomonitoring of the environment of the Arctic urbanized area using the pollen of *Sorbus gorodkovii* Pojark. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):425–434. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-425-434>

## Введение

Обеспечение экологической безопасности – одно из условий устойчивого развития арктических территорий. Для Арктической зоны России характерны экстремальные природно-климатические условия, уязвимость экосистем, кластерный характер освоения территорий, невысокая плотность населения. Мурманск – единственный незамерзающий порт российской Арктики с развитой инфраструктурой и промышленными объектами. Состояние окружающей среды города в последние годы ухудшается за счет выбросов ТЭЦ, работающих на мазуте низкого качества, мусоросжигательного завода, пылевого загрязнения Мурманским морским торговым портом в результате перевалки угля открытым способом.

Мурманск – один из последних региональных центров Северо-Запада РФ, где в котельных используется мазут. Городские ТЭЦ в Петрозаводске, Вологде и Архангельске переоборудованы и работают на природном газе. В выбросах мурманских ТЭЦ содержатся загрязняющие вещества, обладающие высокой мутагенностью (ванадий, бенз(а)пирен, марганец и его соединения и др.). Мурманский морской торговый порт лидирует среди портов Северо-Запада России по объему перерабатываемых сухих грузов, основным из которых является каменный уголь (93,5 %). В состав угольной пыли входят горючие летучие элементы, двуокись кремния, пирит, зола и шлак, состоящие из ок-

сидов кремния, алюминия, железа (III), кальция, калия, редких и рассеянных элементов (Ge, V, W, Ti и т. д.) [1]. Мурманский завод по термической обработке твердых бытовых отходов относится к I классу экологической опасности и к I категории негативного воздействия на окружающую среду. Специфическими выбросами мусоросжигательных заводов являются супертоксиканты: диоксины и фураны, а также тяжелые металлы. Основными загрязнителями окружающей среды г. Мурманск являются полициклические ароматические углеводороды и летучие вещества (SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub>), тяжелые металлы, нефть [2]. Почвы сильно загрязнены тяжелыми металлами (Cu, Zn, Ni, V) [3], аналогичные данные получены при изучении донных отложений малых озер города [2, 4].

Известно, что многие виды растений рассматриваются как биомониторы и биоиндикаторы генотоксичности загрязненного воздуха за счет накопления поллютантов [5]. В качестве биомониторов на гаметоцидное воздействие загрязняющих веществ могут быть использованы репродуктивные органы растений как наиболее чувствительные к антропогенным факторам [6]. Воздействие поллютантов приводит к формированию стерильной пыльцы, нарушению ее размеров и формы. Использование пыльцевых зерен для выявления мутагенного воздействия загрязняющих веществ обусловлено тем, что именно в гаплоидном состоянии проявляются летальные

мутации [7]. Разработаны биотесты по мутагенности загрязняющих веществ и окружающей среды, основанные на жизнеспособности мужских гамет растений [8, 9], при этом чем выше содержание abortивной пыльцы, тем выше токсичность среды. В Мурманской области исследования эмбриологического состояния пыльцы на фертильность и стерильность проведены на древесных видах растений (*Pinus sylvestris*, *Larix sibirica*, *Sorbus gorodkovii*, *Syringa josicaea*) в городах Мурманск, Североморск, Мончегорск, Заполярный, Апатиты [9–11].

Цель работы – биомониторинг качества окружающей среды в окрестностях экологически опасных объектов г. Мурманск с использованием пыльцы *Sorbus gorodkovii*.

### Материалы и методы исследования

*Sorbus gorodkovii* Pojark. (рябина Городкова) – европейский гипоарктомонтанный вид, ареал которого расположен за Полярным кругом. Эндемик Восточной Фенноскандии, встречается в тундровой и лесной зонах, горнолесном и горно-тундровом поясах. Таксономический статус *S. gorodkovii* остается предметом дискуссий, ее рассматривают как отдельный вид [12], региональную расу *S. aucuparia* [13] или как гибрид *S. aucuparia* и *S. sibirica* [14]. Согласно С. К. Черепанову [15], данный таксон является отдельным видом. *S. gorodkovii* занесена в Красную книгу Восточной Фенноскандии и Красную книгу Мурманской области, подлежит бионадзору. Повсеместно распространена в городских насаждениях Мурманской области как вид, наиболее устойчивый к субарктическому климату. Неприхотливость к условиям произрастания, хорошая приживаемость позволяют широко использовать *S. gorodkovii* для озеленения улиц в виде рядовых посадок, групп и куртин. Составляет основу зеленых насаждений г. Мурманск [16].

В конце мая 2020 г. на территории г. Мурманск, в зоне воздействия экологически опасных объектов, заложено пять пробных площадок:

1. «Росляково Южное» – ул. Молодежная, в 170 м от котельной «Росляково Южное». Основным видом топлива является уголь, который складирован открытым способом. Котельная не оборудована фильтрами очистки выбросов.

2. «ТО ТБО» – ул. Домостроительная, в 482 м от завода по термической обработке твердых бытовых отходов. В выбросах предприятия присутствуют высокотоксичные тяжелые металлы

(Ni, Cu, Cd, V, Pb, Co), относящиеся к I и II классам опасности.

3. «Мурманский порт» – Портовый проезд, в 950 м от Мурманского морского торгового порта. На его территории осуществляются перегрузка каменного угля, апатита, марганцевой руды, хранение мазута в резервуарах мазутного хозяйства, хранение нефтепродуктов в резервуарах АЗС и др.

4. «Центральная ТЭЦ» – ул. Траловая, в 353 м от Котлотурбинного цеха (Центральная ТЭЦ). Технологической особенностью ПАО «Мурманская ТЭЦ» является его работа на мазуте.

5. «Южная ТЭЦ» – ул. Баумана, в 930 м от Котлотурбинного цеха № 1 (Южная ТЭЦ). Самая мощная котельная на территории г. Мурманск и области. Основной вид топлива – мазут.

Контрольная площадка расположена в пос. Верхнетуломский, в 83 км от г. Мурманск в юго-западном направлении. В поселке и его окрестностях отсутствуют промышленные объекты. Сбор соцветий *S. gorodkovii* для анализа на содержание тяжелых металлов проводился в конце июня 2020 г., в период массового цветения. С каждого из 10 маркированных деревьев на площадках отобраны по 10 соцветий, которые были высушены до воздушно-сухого состояния (N = 100). Определение содержания тяжелых металлов (Cu, Ni, V, Cd, Zn) в соцветиях проводилось на атомно-абсорбционном спектрометре contrAA 300 в аккредитованной лаборатории ЦЛАТИ по Мурманской области. Для определения ПДК тяжелых металлов в репродуктивных органах рябины использовали СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (для плодов и ягод)» от 14.11. 2001.

Для цитологического анализа с каждого из 10 маркированных деревьев на пробных площадках собраны по 10 соцветий с созревшей пыльцой, из которых случайным образом отобраны по пять цветков и сформирована общая проба (N = 500). В качестве фиксатора использовали 40-градусный этиловый спирт. Исследования проводили ацетокарминовым методом [17]. Фертильная пыльца содержит крахмал и окрашивается в малиновый цвет, в отличие от стерильной, которая остается бесцветной. Цитологический анализ проводили на временных препаратах с помощью световой микроскопии (увеличение в 400 раз). Подсчитывалось число фертильной и стерильной пыльцы, всего про-

смотрено не менее 500 пыльцевых зерен в каждой общей пробе. На основе полученных данных проведен расчет индекса стерильности пыльцы *S. gorodkovii*, который показывает, во сколько раз частота индуцированного уровня стерильности, вызванная загрязнением среды, выше уровня спонтанной стерильности в контроле [6]. С помощью окулярмикрометра измерялись размеры полярной оси пыльцевых зерен. Выделены три размерные группы пыльцы: карликовая, нормальная (средняя) и гипертрофированная. К мелким пыльцевым зернам по общепринятой классификации отнесены зерна с длиной полярной оси до 25 мкм. Нормальными (средними) по размерам считались пыльцевые зерна с полярным диаметром 25–27,5 мкм, гипертрофированными – более 27,5 мкм. Данные по жизнеспособности и размерам пыльцевых зерен *S. gorodkovii* обработаны однофакторным дисперсионным анализом с использованием критерия Фишера. Результаты считались статистически достоверными при  $p \leq 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

#### Содержание тяжелых металлов в репродуктивных органах *Sorbus gorodkovii*

Атомно-абсорбционная спектрофотометрия соцветий рябины показала, что тяжелые металлы содержатся во всех исследованных образцах. В контроле превышение ПДК по Cu, Ni, V, Cd и Zn незначительно, в окрестностях экологически опасных объектов г. Мурманск – в несколько раз выше (табл. 1). Концентрация меди в репродуктивных органах *S. gorodkovii* в контроле –

1,49 мг/кг, на пробных площадках города варьирует от 2,98 («Морской порт») до 6,33 мг/кг («Южная ТЭЦ») (см. табл. 1). Медь – высокотоксичное, канцерогенное и мутагенное вещество, относящееся ко 2 классу опасности по воздействию на окружающую среду. Значительное превышение ПДК (в 5–6 раз) выявлено в окрестностях городских котельных (Росляково Южное, Центральная и Южная ТЭЦ) и мусоросжигательного завода (см. табл. 1).

Никель содержится в пробах в меньших концентрациях: в контроле – 0,62 мг/кг, в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск варьирует от 0,98 («Росляково Южное») до 2,11 мг/кг («ТО ТБО»), превышая ПДК в 2–4 раза (см. табл. 1). Особенно высокое содержание никеля обнаружено в соцветиях рябины пробных площадок «Морской порт» и «ТО ТБО». Среди тяжелых металлов никель имеет особенно высокую токсичность и большую скорость поступления в надземные органы растений, оказывая сильное влияние на их рост и развитие. В образцах выявлено очень высокое содержание ванадия, от 2,46 («ТО ТБО») до 4,81 мг/кг («Южная ТЭЦ») (см. табл. 1). В связи с тем что ПДК для ванадия не разработано, полученные данные сравнивались с его концентрацией в образце контрольной площадки (0,27 мг/кг). Содержание ванадия в пробах из окрестностей экологически опасных промышленных объектов превысило значения контроля в 9 («ТО ТБО») – 18 раз («Южная ТЭЦ»). Максимальная концентрация (в 16–18 раз выше, чем в контроле) выявлена в

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в соцветиях *Sorbus gorodkovii* (мг/кг) в г. Мурманск

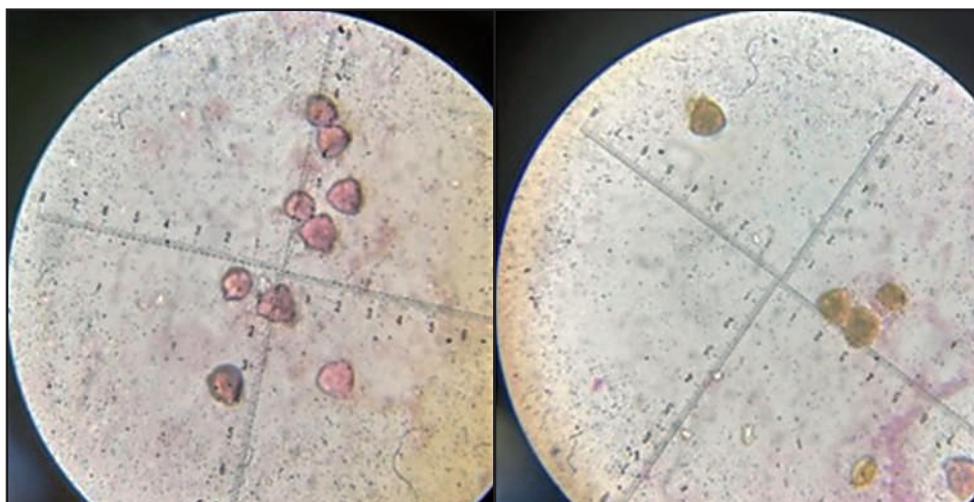
Table 1

The content of heavy metals in the inflorescences of *Sorbus gorodkovii* (mg/kg) in Murmansk

Металл/ Metal	ПДК*/ MPC	Контроль/ Control	Росляково/ Roslyakovo	ТО ТБО/ Incineration plant	Морской порт/ Sea Port	Центральная ТЭЦ/ Central Heating plant	Южная ТЭЦ/ South Heating plant
Cu	1,0	1,49±0,45	5,13±1,54	5,45±1,63	2,98±0,90	5,35±1,60	6,33±1,90
Ni	0,50	0,62±0,19	0,98±0,29	2,11±0,63	1,91±0,57	1,14±0,34	1,18±0,36
V	–	0,27±0,08	2,80±0,84	2,46±0,74	2,54±0,76	4,20±1,26	4,81±1,44
Cd	0,03	0,04±0,01	0,04±0,01	0,11±0,03	0,04±0,01	0,05±0,01	0,05±0,02
Zn	1,0	1,89±0,57	3,0±0,90	6,74±2,02	2,56±0,77	3,22±0,97	3,43±1,03

\* ПДК приводится по: СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (для плодов и ягод)» от 14.11. 2001.

\* MPC according to SanPiN 2.3.2.1078-01 “Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products (for fruits and berries)” dt. 14.11.2001.



**Рис. 1.** Пыльцевые зерна *Sorbus gorodkovii* при увеличении в 400 раз (пыльца с желтой окраской – стерильная, пыльца с розовой окраской – фертильная)

**Fig. 1.** Pollen grains of *Sorbus gorodkovii* at 400 times magnification (pollen with yellow color – sterile, pollen with pink color – fertile)

образцах пробных площадок Центральной и Южной ТЭЦ, работающих на мазуте низкого качества (см. табл. 1). Ванадий – один из рассеянных элементов, присутствует в различных минералах, в природной среде в свободном виде не встречается, очень токсичен. Является основным веществом, входящим в состав мазутной золы. Кадмий накапливается в репродуктивных органах рябины менее значительно, чем другие тяжелые металлы, от 0,04 («Росляково Южное») до 0,11 мг/кг («ТО ТБО») (см. табл. 1). Концентрация кадмия в окрестностях угольной котельной «Росляково Южное» и Мурманского морского торгового порта аналогична контролю. Превышения ПДК выявлены на пробных площадках Центральной и Южной ТЭЦ (1,6–1,7 ПДК) и мусоросжигательного завода (3,6 ПДК). По уровню токсичности кадмий является одним из наиболее опасных химических элементов для растений и окружающей среды [3]. Содержание цинка в соцветиях рябины варьирует от 2,56 («Морской порт») до 6,74 мг/кг («ТО ТБО»), в контроле – 1,89 мг/кг (см. табл. 1). Превышения концентраций цинка обнаружены на всех пробных площадках – от 2,6 («Морской порт») до 6,7 ПДК («ТО ТБО»). При повышенных концентрациях цинк может вызывать нарушения роста и морфогенеза растений [3].

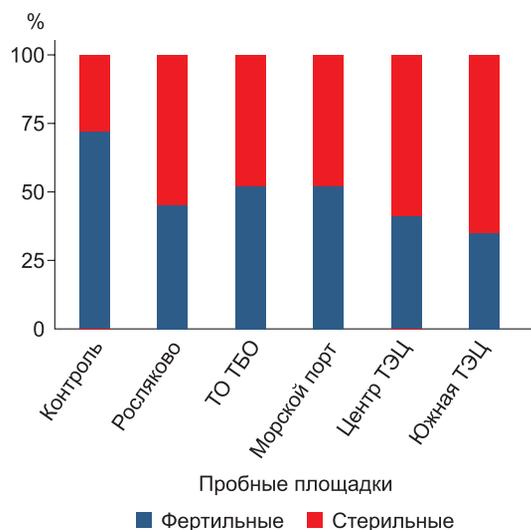
Анализ результатов атомно-абсорбционной спектрофотометрии показал, что в репродуктивных органах *S. gorodkovii* из окрестностей му-

соросжигательного завода и ТЭЦ г. Мурманск (Южная и Центральная ТЭЦ) содержатся высокие концентрации тяжелых металлов. На пробной площадке «ТО ТБО» выявлены максимальные превышения ПДК тяжелых металлов: меди (5,4 ПДК), никеля (4,2), кадмия (3,6) и цинка (6,7). В зоне воздействия Центральной и Южной ТЭЦ в образцах обнаружен чрезвычайно высокий уровень содержания ванадия (в 16–18 раз выше контроля), в 5–6 раз превышены ПДК по меди, в 3 – по цинку, в 2 – по никелю, в 1,6–1,7 раза – по кадмию.

#### *Воздействие тяжелых металлов на фертильность пыльцы Sorbus gorodkovii*

В результате цитологического анализа получено, что при окрашивании препаратов ацетокармином пыльца *S. gorodkovii* приобретает розовую, малиновую, желтую окраску или остается бесцветной (рис. 1). Пыльцевые зерна, окрашенные в розовый и малиновый цвет, рассматривались как фертильные, желтые и бесцветные – как стерильные (абортивные).

В образцах контрольной площадки пос. Верхнетуломский доля фертильной пыльцы рябины составляет 72 %. В пробах из окрестностей экологически опасных промышленных предприятий г. Мурманск выявлено низкое содержание фертильной пыльцы (35–52 %). Минимальная доля фертильных пыльцевых зерен – на пробных площадках Южной (35 %) и Центральной



**Рис. 2.** Соотношение фертильной и стерильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных объектов г. Мурманск (%)

**Fig. 2.** The ratio of fertile and sterile pollen of *Sorbus gorodkovii* in the vicinity of industrial facilities in Murmansk (%)

ТЭЦ (41 %), котельной «Росляково Южное» (45 %) (рис. 2, табл. 2).

Доля стерильной (абортивной) пыльцы в контроле составила 28 % (см. рис. 2, табл. 2). Для

*S. gorodkovii* характерна достаточно высокая спонтанная стерильность мужского гаметофита в природных популяциях, что определяется ее происхождением. Количество стерильной пыльцы увеличивается в зоне воздействия промышленных объектов г. Мурманск. Наибольшее ее содержание выявлено в окрестностях Южной (65 %) и Центральной ТЭЦ (59 %), работающих на мазуте, а также угольной котельной «Росляково Южное» (55 %). Это индуцированная стерильность, вызванная промышленным загрязнением окружающей среды, которая свидетельствует о высокой токсичности выбросов мурманских ТЭЦ. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что тяжелые металлы влияют на количество стерильной и фертильной пыльцы. Данные по содержанию фертильной ( $F = 33,8$ ;  $p \leq 0,05$ ) и стерильной пыльцы ( $F = 158,4$ ;  $p \leq 0,05$ ) между площадками статистически значимо различаются. Полученные результаты согласуются с исследованиями, проведенными в г. Североморск, где доля абортивной пыльцы *S. gorodkovii* составляла 38–44 % на пробных площадках в окрестностях городской ТЭЦ, работающей на мазуте [9].

Таблица 2

**Доля фертильной и стерильной пыльцы, индекс стерильности *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск**

Table 2

**The ratio of fertile and sterile pollen, the index of sterility of *Sorbus gorodkovii* in the vicinity of industrial enterprises in Murmansk**

Пробная площадка/ Test sites	Общее число пыльцевых зерен/ Total number of pollen grains	Стерильной пыльцы/ Sterile pollen		Фертильной пыльцы/ Fertile pollen		Индекс стерильности/ Index of sterility
		Всего/ Total	%	Всего/ Total	%	
Росляково Roslyakovo	500	275	55,0	225	45,0	2,0
ТО ТБО Incineration Plant	521	251	48,2	270	51,8	1,8
Морской порт Sea Port	520	252	48,0	268	52,0	1,8
Центральная ТЭЦ Central Heating Plant	509	299	58,7	210	41,3	2,1
Южная ТЭЦ South Heating Plant	516	334	64,7	182	35,3	2,4
Контроль Control	505	141	28,0	364	72,0	–

Расчет индекса стерильности (ИС) *S. gorodkovii* показал, что индуцированная стерильность пыльцы в окрестностях мурманских котельных в два раза и более превышает спонтанную (в контроле). Наиболее высокие значения индекса стерильности выявлены в окрестностях Южной (2,4) и Центральной ТЭЦ (2,1), котельной «Росляково Южное» (2,0) (см. табл. 2). На пробных площадках мусоросжигательного завода и Морского порта значения индекса стерильности ниже.

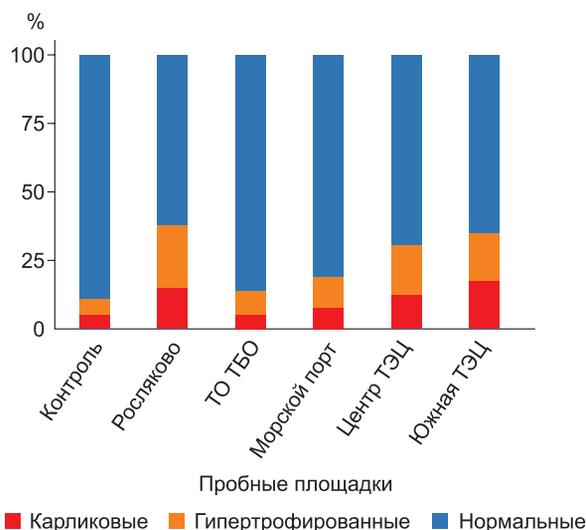
Высокое содержание abortивной пыльцы в соцветиях (48–65 %) и значения индекса стерильности (1,8–2,4) являются индикаторами гаметоцидного воздействия выбросов промышленных предприятий г. Мурманск на процесс формирования гамет *S. gorodkovii*. Причинами стерильности пыльцевых зерен являются генетические мутации, цитоплазматическая мужская стерильность, химическая кастрация [17]. Для стерильной пыльцы характерны деформация и дегенерация ядер, цитоплазмы или целых клеток. Образование такой пыльцы у растений, как правило, связано с нарушениями в ходе мейоза и микроспорогенеза [7].

#### *Влияние тяжелых металлов на размеры пыльцевых зерен*

Пыльца *S. gorodkovii* имеет трехлопастную форму с полюса и эллиптическую с экватора. В результате измерения полярного диаметра пыльцевых зерен получено, что фертильная и стерильная пыльца *S. gorodkovii* значительно варьируют по размерам. Выделено три размерные группы: карликовые, средние (нормальные) и гипертрофированные. Средний размер полярной оси нормальной фертильной пыльцы варьирует от 25,7 до 25,9 мкм, в контроле – 25,8 мкм. Наибольшее содержание фертильных пыльцевых зерен нормальных размеров выявлено в образцах «ТО ТБО» (85,6 %) и «Морской порт» (80,5 %) (рис. 3), ее доля значительно снижается в окрестностях мурманских котельных (61,8–69 %).

В протестированных образцах выявлено много карликовой фертильной пыльцы. Длина полярной оси карликовой фертильной пыльцы 21,9–22,5 мкм, в контроле – 22,3 мкм. В окрестностях мурманских котельных выявлено повышенное содержание нанопыльцы *S. gorodkovii* – от 12,9 до 17,9 % (см. рис. 33), в контроле (поселок Верхнетуломский) – 5,5 % ( $F = 21,8; p \leq 0,05$ ).

Размер полярной оси гипертрофированной фертильной пыльцы *S. gorodkovii* 30,3–31,1 мкм,



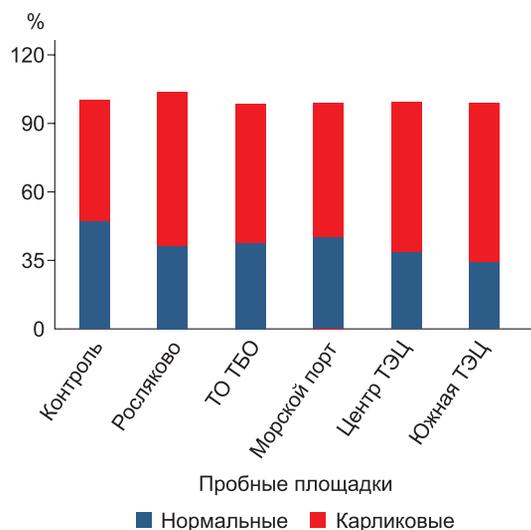
**Рис. 3.** Соотношение размерных групп фертильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск (%)

**Fig. 3.** Ratio of normal, dwarf and hypertrophied fertile pollen grains of *Sorbus gorodkovii* in the city of Murmansk (%)

в контроле – 30,5 мкм. Значительное увеличение ее доли выявлено в окрестностях мурманских ТЭЦ (17,4–22,7 %), в контроле – 6 % ( $F = 25,7; p \leq 0,05$ ) (см. рис. 3). Предположительно, это диплоидная пыльца, в 1,2 раза превышающая нормальную в диаметре. Появление гипертрофированной пыльцы связано с воздействием мутагенов на процесс мейоза, а также с асинхронностью расхождения тетрад микроспор при микроспорогенезе [6].

Измерение полярного диаметра стерильной пыльцы *S. gorodkovii* показало, что в основном она имеет карликовые размеры (59–70 %) (рис. 4). При этом она достоверно мельче (19,7–20,8 мкм), чем фертильная (21,9–22,8 мкм). Максимальное количество abortивной нанопыльцы выявлено в окрестностях мурманских котельных (63–70 %) (см. рис. 4). Данные по пробным площадкам статистически значимо различаются ( $F = 163; p \leq 0,05$ ).

Длина полярной оси средних по размеру стерильных пыльцевых зерен 25,2–25,5 мкм. Значительное снижение ее доли отмечено в зоне промышленного воздействия всех предприятий Мурманска, особенно около Южной и Центральной ТЭЦ (см. рис. 4). Средний размер полярной оси гипертрофированной стерильной пыльцы варьирует от 30 до 35 мкм (в контроле – 30 мкм), ее содержание во всех образцах единично (0,6–1,2 %).



**Рис. 4.** Соотношение размерных групп стерильной пыльцы *Sorbus gorodkovii* в окрестностях промышленных предприятий г. Мурманск (%)

**Fig. 4.** Ratio of size groups of sterile *Sorbus gorodkovii* pollen in the vicinity of industrial enterprises in Murmansk (%)

Исследования показали, что наибольшее токсическое воздействие на пыльцу *S. gorodkovii* оказывают выбросы котельных г. Мурманск, работающих на мазуте и угле. Южная и Центральная ТЭЦ относятся ко 2 классу экологической опасности, угольная котельная «Росляково Южная» – к 3. ТЭЦ, использующие в качестве топлива мазут или уголь, являются наиболее опасными для живых организмов, в том числе человека. Выбросы от любых тепловых станций на мазуте имеют повышенное содержание Fe, V, Ni, Cr и других элементов [18]. Летучая зола, образующаяся при сжигании мазута тепловыми станциями, обычно содержит 3–4 % никеля и 2–6 % ванадия [4]. Ванадий и никель являются примесями в мазуте, который в настоящее время используется на Мурманской ТЭЦ [2]. При сжигании топлива образуется пентаоксид диванадия ( $V_2O_5$ ), который обладает высокой токсичностью [19]. В результате исследования малых озер г. Мурманск учеными Кольского научного центра РАН получено, что в воде озер Среднее и Окуновое, близко расположенных к ТЭЦ, содержатся наиболее высокие концентрации ванадия [4]. Соединения ванадия представляют наибольшую опасность для растений в связи с высокой токсичностью, вызывая ингибирование процессов развития. По-видимому, именно большие концентрации ванадия в выбросах мурманских ТЭЦ оказывают гаметоцидное воздей-

ствие и вызывают стерилизацию мужского гаметофита *S. gorodkovii*. Превышающие ПДК концентрации меди, никеля, цинка, кадмия также оказывают токсическое воздействие на формирование мужских гамет. При превышении пороговых концентраций меди в растениях возникает токсический эффект, в результате которого происходит торможение роста и развития [3]. Никель влияет на репродукцию растений, вызывая аномальное развитие гамет и нарушение эмбриогенеза [3]. Тяжелые металлы вызывают хромосомные нарушения в мужских гаметах на разных стадиях мейоза у хвойных, произрастающих в условиях хронического загрязнения предприятиями цветной металлургии [20]. Есть исследования, в которых показано, что тяжелые металлы аккумулируются пылью, снижая ее фертильность [21]. Их микрочастицы оседают и накапливаются на экзине пыльцевых зерен [22], что может привести к ее разрыву и способствует выбросу аллергенов в окружающую среду.

В исследовании на территории г. Мурманск выявлено, что под воздействием выбросов котельных формируется много стерильной пыльцы *S. gorodkovii*, имеющей карликовые размеры. Размеры пыльцевых зерен являются стабильным видовым (чаще родовым) признаком, для них характерна очень низкая индивидуальная, внутривидовая и внутривидовая географическая изменчивость [23]. В условиях загрязнения среды пыльца растений варьирует в размерах больше, чем в природных популяциях. Изменение величины пыльцы связано с нарушением процессов роста и деления клеток при формировании первичных клеток археспория и тетрад микроспор, что приводит к генетической разнокачественности. На образование мелкой пыльцы в условиях промышленного загрязнения и под воздействием автотранспорта указывают многие авторы [24]. Появление карликовой пыльцы связано с нарушениями мейоза, при которых происходит потеря части генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций [25]. Размеры пыльцы можно использовать как индикатор изменения ее морфологии в условиях антропогенного стресса.

### Заключение

Исследования на территории г. Мурманск показали, что выбросы ТЭЦ токсичны, содержат высокие концентрации тяжелых металлов (осо-

бенно ванадия), оказывают мутагенное воздействие на процесс формирования мужских гамет *S. gorodkovii*, в результате которого в основном образуется очень мелкая стерильная (абортивная) пыльца. Стерильность пыльцы, вызванная промышленным загрязнением среды, является большой экологической проблемой, затрагивающей продуктивность многих видов растений. В экологических исследованиях высокая доля абортивной пыльцы является индикатором загрязнения среды и присутствия в ней мутагенов, которые вызывают нарушения процесса микрогаметогенеза у высших растений. Результаты биомониторинга в г. Мурманск свидетельствуют о том, что пыльцу гипоарктических видов растений можно использовать для выявления гаметоцидного воздействия токсичных металлов на арктических урбанизированных территориях. Для улучшения экологической ситуации в г. Мурманск необходим переход тепловых станций на использование природного газа.

### Список литературы / References

1. Воробьев А.Е., Мозолькова А.В. Минеральные включения угольных пластов: формы нахождения и основные способы растворения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;3:141–148.
2. Vorobyov A.E., Mozolkova A.V. Mineral inclusions of coal seams: forms of occurrence and main methods of dissolution. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;3:141–148. (In Russ.)
3. Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Myazin V.A. Geochemical features of lakes located in an urbanized area of the Russian Arctic (Murmansk region). *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:511–512. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-511>
4. Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A. Vanadium as an indicator of the impact of fuel oiled thermal power plants on the environment: paleolimnological reconstructions. *Limnology and Freshwater Biology*. 2020;4:513–514. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-513>
5. Greguskova E., Mičičeta K. Phytoindication of the ecogenotoxic effects of vehicle emissions using pollen abortion test with native flora. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2013;22:1069–1076.
6. Ибрагимова Э.Э. Генеративные органы высших растений – биомониторы токсического действия аэро-поллютантов. *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Серия: Биология и Химия*. 2017;1:13–23.
7. Ибрагимова Е.Е. Generative organs of higher plants as biomonitors of the toxic effect of air pollutants. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Series: Biology and Chemistry*. 2017;1:13–23. (In Russ.)
8. Бессонова В.П., Фендюр Л.М., Пересыпкина Т.Н. Влияние загрязнения окружающей среды на мужскую фертильность декоративных цветочных растений. *Ботанический журнал*. 1997;82(5):38–45.
9. Bessonova V., Fendyur L., Peresyupkina T. Effect of environmental pollution on male fertility of ornamental flower plants. *Botanicheskii Zhurnal*. 1997;82:38–45. (In Russ.)
10. Fleck A.S., Moresco M.B., Rhoden C.R. Assessing the genotoxicity of traffic-related air pollutants by means of plant biomonitoring in cities of a Brazilian metropolitan area crossed by a major highway. *Atmospheric Pollution Research*. 2016;7:488–493. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.12.002>
11. Vasilevskaya N.V. Pollution of the Environment and Pollen: A Review. *Stresses*. 2022;2: 515–530. <https://doi.org/10.3390/stresses2040035>
12. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.) in the Arctic urbanized territory. *Czech Polar Reports*. 2018;8(1):24–36. <https://doi.org/10.5817/CPR2018-1-2>
13. Vasilevskaya N.V., Osechinskaya P.V. Palynoidication of the environment in the impact zone of the Apatit mining processing plant with the use of pollen of *Pinus sylvestris* L. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021;723:032010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/3/032010>
14. Сальникова Л.И. Сравнительная анатомия побегов *Sorbus aucuparia*, *S. gorodkovii* и *S. sibirica* (*Rosaceae*). *Ботанический журнал*. 1980;65(11):1591–1600.
15. Salnikova L.I. Comparative anatomy of the shoots of *Sorbus aucuparia*, *S. gorodkovii* and *S. sibirica* (*Rosaceae*). *Botanicheskii Zhurnal*. 1980;65(11):1591–1600. (In Russ.)
16. Шауло Д.Н., Драчев Н.С., Кузьмин И.В. Интрогрессивная гибридизация в роде *Sorbus* (*Rosaceae*) таежной зоны Тюменской области. *Вестник Тюменского государственного университета*. 2009;3:209–215.
17. Shaulo D.N., Drachev N.S., Kuzmin I.V. Introgresive hybridization in the genus *Sorbus* (*Rosaceae*) of the taiga zone of the Tyumen region. *Tyumen State University Herald*. 2009;3:209–215. (In Russ.)
18. Зайконникова Т.И. Рябина – *Sorbus* L. *Флора Восточной Европы*. СПб. 2001;X:535–543.
19. Zaikonnikova T.I. Rowan – *Sorbus* L. *Flora of Eastern Europe*. Saint Petersburg. 2001;X:535–543. (In Russ.)
20. Черепанов С.К. *Сосудистые растения России и сопредельных государств*. СПб.: Мир и семья-95; 1995. 990 с.
21. Czerepanov S.K. *Vascular Plants of the Russia and Neighboring States*. Saint Petersburg: Mir i semya-95; 1995. 990 p. (In Russ.)
22. Гонтарь О.Б., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н., Коробейникова Н.М., Шлапак Е.П., Носатенко О.Ю. Мониторинг состояния древесных насаждений на некоторых объектах озеленения в центральной части

города Мурманска. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2013;15(3):621–625.

Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N., Korobeynikova N.M., Shlapak E.P., Nosatenko O.Yu. Monitoring of the state of woody plants at some objects of gardening in central part of the city of Murmansk. *Izvestiya of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science*. 2013;15(3):621–625. (In Russ.)

17. Паушева З.П. *Практикум по цитологии растений*. М.: Агропромиздат; 1988. 271 с.

Pausheva Z.P. *Workshop on Plant Cytology*. Moscow: Agropromizdat; 1988. 271 p. (In Russ.)

18. Teng Y.S., Zhang Ni C., Wang J., Lin X., Huang Y. Environmental geochemistry, and ecological risk of vanadium pollution in Panzhihua mining and smelting area, Sichuan, China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 2006; 25:379–385. <https://doi.org/10.1007/s11631-006-0378-3>

19. Старостина И.В., Пендюрин Е.А., Смоленская Л.М. Оценка токсикологических свойств шламовых отходов феррованадиевого производства. *Современные проблемы науки и образования*. 2012;6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7979>

Starostina I.V., Pendyrin E.A., Smolenskaya L.M. Toxicological properties of sludge waste production ferrovanadium. *Modern Problems of Science and Education*. 2012;6. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7979>. (In Russ.)

20. Калашник Н.А. Оценка чувствительности цитогенетических методов при мониторинговых исследованиях состояния хвойных насаждений. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2011;13(5):179–183.

Kalashnik N.A. Asses of the sensitivity of cytogenetic methods in monitoring research of condition of coniferous forests. *Izvestia of Samara Scientific Center of*

*the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(5):179–183. (In Russ.)

21. Yousefi N., Chehregani A., Malayeri B.E., Lorestani B., Cheraghi M. Investigating the effect of heavy metals on developmental stages of anther and pollen in *Chenopodium botrys* L. (Chenopodiaceae). *Biological Trace Element Research*. 2011;140:368–376. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8701-6>

22. Wang X., Gong S., Nakamura S., Kurihara K., Suzuki M., Sakamoto K., Miwa M., Lu S. Air pollutant deposition effect and morphological change of *Cryptomeria japonica* pollen during its transport in urban and mountainous areas of Japan. *WIT Trans. Biomed. Health*. 2009;11:77–89.

23. Козубов Г.М. *Биология плодоношения хвойных на Севере*. Л.: Наука; 1974. 136 с.

Kozubov G.M. *Biology of Fruiting of Conifers in the North*. Leningrad: Nauka; 1974. 136 p. (In Russ.)

24. Махнева С.Г., Меншиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь». *Лесной вестник*. 2021; 25:32–44.

Makhneva S.G., Menshchikov S.L. Quality of pollen of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the impact zone of the “Karabashmed”. *Forestry Bulletin*. 2021;25:32–44. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-1-32-44>. (In Russ.)

25. Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами. *Экология*. 1992;4:45–50.

Bessonova V.N. The state of pollen as an indicator of environmental pollution by heavy metals. *Russian Journal of Ecology*. 1992;4:45–50. (In Russ.)

#### Об авторах

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, Scopus AuthorID: 15926526000, РИНЦ AuthorID: 141850, e-mail: n.v.asilevskaya@gmail.com

СИКАЛЮК Анна Игоревна, магистр биологии, e-mail: <https://orcid.org/0000-0001-8317-1814>, e-mail: anna.sikalyuk@yandex.ru

#### About the authors

VASILEVSKAYA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6926-9353>, Scopus AuthorID: 15926526000, RISC AuthorID: 141850, e-mail: n.v.asilevskaya@gmail.com

SIKALYUK, Anna Igorevna, M. Biol., <https://orcid.org/0000-0001-8317-1814>, e-mail: anna.sikalyuk@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 18.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.07.2023

Принята к публикации / Accepted 25.07.2023

Оригинальная статья

## Рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro* под влиянием метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород

Н. О. Ренёв<sup>✉</sup>, В. А. Мальчевский, А. М. Субботин, С. А. Петров

Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация

<sup>✉</sup>[solitary\\_72@mail.ru](mailto:solitary_72@mail.ru)

### Аннотация

В 2019–2021 гг. была проведена оценка влияния штаммов бактерий из многолетнемерзлых пород на морфогенез, ризогенез, активность протекания процессов фотосинтеза в микрорастениях картофеля в условиях *in vitro*. В исследовании использовали три штамма бактериальных культур из коллекции отдела биоресурсов криосферы Тюменского научного центра СО РАН. Исследования проводили на микрорастениях трех сортов картофеля: Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт. В результате исследования из ядер многолетнемерзлых пород были выделены два штамма бактерий. Установлено, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с вторичными метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в пробирки в момент черенкования в дозе 250 мкл (1,63 мкл метаболитов на 1 мм<sup>2</sup> площади питательной среды), оказывают наибольший стимулирующий эффект на морфогенез растений, ризогенез и процесс фотосинтеза. Это способствует ускорению метода клонального микроразмножения *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

**Ключевые слова:** метаболиты, бактерии, картофель, *in vitro*, пигменты, спектрофотометрия

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания (№ 121041600036-6).

**Для цитирования:** Ренёв Н.О., Мальчевский В.А., Субботин А.М., Петров С.А. Рост и развитие микрорастений картофеля *in vitro* под влиянием метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):435–442. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-435-442>

Original article

## Growth and development of potato microplants *in vitro* under the influence of bacterial metabolites isolated from permafrost

N. O. Renev<sup>✉</sup>, V. A. Malchevskiy, A. M. Subbotin, S. A. Petrov

Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation

<sup>✉</sup>[solitary\\_72@mail.ru](mailto:solitary_72@mail.ru)

### Abstract

The effects of permafrost bacterial strains on morphogenesis, rhizogenesis, and photosynthesis in potato micro-plants under *in vitro* conditions were assessed from 2019 to 2021. We used three bacterial culture strains from the collection of the Cryosphere Bioresources Department, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The study was conducted on microgrowers of three potato varieties: Zhukovsky Early, Rozara and Red Scarlett. Two strains of bacteria were isolated from the cores of perennially frozen rocks. We found that the combined cultivation of potato microgrowers under *in vitro* conditions on Murasige-Skug nutrient medium with secondary metabolites of the bacterial strains *Bacillus cereus* 9-08-CH9 and *Achromobacter spanius* 10-50TS2, introduced at the time of cutting at a dose of 250 µL, had the greatest stimulatory effect on its morphogenesis, rhizogenesis, and photosynthesis. Thus, the proposed cultivation method accelerates clonal micropropagation of *in vitro* materials for original potato seed production.

**Keywords:** metabolites, bacteria, potatoes, *in vitro*, pigments, spectrophotometry

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment (number 121041600036-6).

**For citation:** Renev N.O., Malchevskiy V.A., Subbotin V.A., Petrov S.A. Growth and development of potato microplants *in vitro* under the influence of bacterial metabolites isolated from permafrost. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):435–442. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-435-442>

## Введение

Повышение эффективности культивирования клеток и тканей растений *in vitro* является важной задачей для развития агробιοтехнологии. Традиционные подходы к решению данной проблемы основаны на поиске химических, физических или генетических параметров культивирования. Гораздо хуже изучена возможность применения биологических факторов, таких как ассоциативные бактерии и их метаболиты [1].

В настоящее время в России и за рубежом проводятся широкие исследования по изучению возможности использования полезных форм микроорганизмов для повышения продуктивности сельскохозяйственных культур и улучшения качества продукции [2, 3].

Микроорганизмы, присутствующие в тканях растений и в ризосферной почве, играют ключевую роль в росте и развитии растений, поддерживая баланс питательных веществ в экосистеме. Эти микроорганизмы обеспечивают важные преимущества для растений-хозяев, поэтому они ценятся как важный и перспективный инструмент для устойчивого сельского хозяйства [4, 5].

Микроорганизмы способны осуществлять целый ряд функций: улучшать минеральное питание растений, фиксировать атмосферный азот, стимулировать рост растений, подавлять фитопатогенную микрофлору, повышать устойчивость растений к стрессам [6–8].

В Тюменском научном центре СО РАН создана коллекция микроорганизмов, выделенных из многолетнемерзлых пород Западной и Восточной Сибири (Коллекция почвенных микроорганизмов многолетнемерзлых пород Арктики (ПМММПА)). Используя бактериальные культуры из этой коллекции, мы исследуем влияние «реликтовых» микроорганизмов на морфофизиологические, биохимические и цитогенетические показатели современных биологических объектов разного уровня организации, от одноклеточных организмов до высших растений и животных. Результаты исследований указывают на положительное влияние ряда штаммов микроорганизмов, выделенных из толщи многолетнемерзлых пород, на морфофизиологические, био-

химические и адаптивные параметры культурных злаковых растений [9–12] и картофеля [13].

Цель работы – оценить влияние вторичных метаболитов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, на рост и развитие микрорастений картофеля в условиях *in vitro*.

## Методы и материалы исследования

Исследования были проведены с использованием одного штамма вида *Achromobacter spanius* 10-50-TS2 и двух штаммов вида *Bacillus cereus*: 875-TS и 9-08-CH9.

Штаммы идентифицированы по 16SpPHK и депонированы во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов ФГУП ГосНИИГенетика: 875-TS – № В-12242, 9-08-CH9 – № В-12401, 10-50-TS2 – № В-12405.

Штамм 875-TS вида *Bacillus cereus* выделен из многолетнемерзлых пород возрастом 10–12 тысяч лет, отобранных из бурового керна с глубины 10 м при бурении скважины в районе Тарко-Сале (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Пуровский район). Штамм 9-08-CH9 вида *Bacillus cereus* выделен из многолетнемерзлых пород (серого ожелезненного песка ниже торфяного горизонта, глубина места отбора пробы 2 м ниже берегового растительного покрова) при отборе проб с правого берега реки Чара на 9 км выше по течению реки от пос. Новая Чара (Россия, Забайкальский край, Каларский район, пос. Новая Чара). Штамм 10-50-TS2 вида *Achromobacter spanius* выделен из многолетнемерзлых пород (сине-серых пластичномерзлых глин), отобранных из бурового керна с глубины 30 м при бурении скважины в районе Тарко-Сале (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Пуровский район).

Исследуемые штаммы бактериальных культур находятся в Коллекции почвенных микроорганизмов многолетнемерзлых пород Арктики (ПМММПА) ТюмНЦ СО РАН при ТРЦКП «Биокосные системы криосферы» ТюмНЦ СО РАН под номером скр\_77024, дата регистрации 02.09.2011 г.

Культивирование микроорганизмов проводили в лаборатории отдела биоресурсов криосфе-

ры ТюмНЦ СО РАН. Штаммы бактерий высевали в пробирки на приготовленный стандартным методом скошенный питательный агар (ГРМ-агар, г. Оболенск, ТУ 9398-020-78095326-2006) и культивировали в термостате 48 ч при  $t = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем производили смыв микроорганизмов из каждой пробирки 5 мл дистиллированной воды [14]. Концентрацию микроорганизмов определяли культуральным методом серийных разведений по количеству КОЕ на агаризованной питательной среде в чашках Петри [15]. После определения количества клеток бактерий в исходной маточной суспензии плотность культур доводили до рабочей концентрации в  $1 \times 10^9$  микробных клеток в 1 мл дистиллированной воды. Затем суспензию клеток замораживали на 8 ч при температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , после чего ее оттаивали при температуре  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 16 ч. Цикл замораживания-оттаивания повторяли 3 раза. По экспериментальным данным отдела биоресурсов криосферы ТюмНЦ СО РАН, этот способ увеличивает выход вторичных метаболитов бактерий в водную среду в 2 раза. Общая масса пептидных комплексов в фильтрах составляла 200 мкг/мл. Масса пептидных комплексов определялась биуретовым методом [16] и методом жидкостной препаративной хроматографии на хроматографе фирмы «Gilson». Стерильный раствор метаболитов получали путем фильтрования бактериальных суспензий через фильтры фирмы «Millipore» с диаметром пор 0,22 мкм (Durapore membrane filters, type 0,22 mm GV). Полученные фильтраты, содержащие метаболиты бактерий, использовали для дальнейшей работы.

Исследования проводили на микрорастениях трех сортов картофеля: Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт.

Для оценки влияния штаммов бактерий на морфометрические и биохимические показатели *in vitro* микрорастений картофеля в эксперименте использовали водные растворы метаболитов микроорганизмов. Метаболиты в количестве (дозе) 250 мкл (50 мкг по пептидным комплексам) раскапывали (наносили) на поверхность питательной среды Мурасиге–Скуга, разлитую по 5 мл в пробирки ПБ2-16x150 (ТУ 9461-008-52876351-2008) с внутренним диаметром 14 мм. Площадь поверхности питательной среды  $S$  равнялась  $153,86\text{ мм}^2$ , соответственно доза метаболитов составляла 1,63 мкл метаболитов (0,33 мкг по пептидным комплексам) на  $1\text{ мм}^2$  площади

питательной среды. В контрольном варианте, в том же объеме, добавляли отфильтрованный смыв с поверхности питательного агара для культивирования микроорганизмов. Через 60 минут в эти пробирки начинали высаживать микрочеренки растений картофеля. Размножение *in vitro* материала картофеля проводили методом клонального микроразмножения согласно методическим рекомендациям по тиражированию *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха [17]. После черенкования материал размещали для дальнейшего роста и развития в условиях фитотрона с температурой  $23\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и освещенностью 5000–8000 люкс с фотопериодом 16 ч. Повторность трехкратная по 10 микрорастений каждого сорта. На 10-, 20-, 30-й дни от начала эксперимента у растений проводили измерение биометрических показателей (количество междоузлий на побеге, длина побега, количество корней, максимальная длина корня).

На 30-е сутки исследовали количество пигментов фотосинтеза в соответствии со стандартными методиками [18, 19]. Эксперимент проводили в двух повторностях. В качестве растворителя при приготовлении вытяжки пигментов фотосинтеза применяли 96%-й этиловый спирт. Окрашенную жидкость помещали в кювету спектрофотометра с толщиной поглощающего слоя 10 мм и снимали оптическую плотность экстракта при длине волны 665, 649 и 440 нм. Количество хлорофилла *a* и *b* в объеме кюветы спектрофотометра рассчитывали по формулам I.F. Wintermans и A. DeMots (1965). Концентрацию каротиноидов в суммарной вытяжке пигментов рассчитывали по формуле D. Wettstein (1957).

Статистическая обработка результатов проведена с использованием программы IBM «SPSS 11,5 for Windows». Достоверность различий средних значений измеряемых морфометрических параметров между опытными и контрольным вариантами определена по *t*-критерию Стьюдента при уровне значимости  $p \leq 0,05$ . Все данные в таблицах представлены как среднее значение  $\pm$  стандартная ошибка среднего ( $\pm$  SE).

### Результаты и обсуждения

Одним из показателей при работе с культурой ткани является число сформированных междоузлий на регенерируемом растении. Чем выше их выход, тем больше микрорастений можно по-

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из ММП  
на морфогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro***

Table 1

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost  
on the morphogenesis of potato micro-plants under *in vitro* conditions**

Сорт Variety	Штамм Strain	Количество междоузлий, шт. Number of internodes, pcs.			Высота растений на 30-е сутки, мм Plant height on the 30th day, mm
		Период культивирования, дни Cultivation period, days			
		10	20	30	
Жуковский ранний	Контроль Control	2,7±0,15	4,1±0,16	5,2±0,22	87,4±2,13
	9-08-CH9	3,1±0,18*	4,5±0,13*	6,2±0,24*	90,2±2,69
	10-50TS2	2,7±0,15	4,7±0,11*	6,8±0,29*	89,8±2,52
	875TS	2,2±0,16*	3,4±0,17*	5,7±0,30	79,2±3,04*
Розара	Контроль Control	2,5±0,26	4,0±0,19	5,3±0,24	78,0±3,33
	9-08-CH9	2,7±0,25	4,9±0,16*	6,7±0,16*	83,5±2,41
	10-50TS2	2,9±0,24	5,1±0,22*	6,4±0,22*	89,0±2,75*
	875TS	2,4±0,21	4,4±0,21	5,2±0,23	74,8±2,77
Ред Скарлетт	Контроль Control	2,9±0,24	3,6±0,24	5,5±0,22	84,3±2,16
	9-08-CH9	3,3±0,25	4,2±0,19*	6,4±0,20*	89,8±2,22*
	10-50TS2	3,5±0,24*	4,4±0,21*	6,1±0,24*	92,4±3,17
	875TS	2,5±0,27	3,4±0,22	5,8±0,19	82,2±2,41

\* – достоверность отличия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the MMP bacterial strain from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

лучать при черенковании в процессе ускоренного размножения.

Влияние метаболитов штаммов бактерий на морфогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro* показано в табл. 1.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в момент черенкования в дозе 250 мкл, оказывают наибольший стимулирующий эффект. Вторичные метаболиты данных штаммов бактерий достоверно ( $p \leq 0,05$ ) увеличивают число междоузлий на всех этапах культивирования микрорастений картофеля у сортов Жуковский ранний, Розара и Ред Скарлетт, что может способст-

вовать ускорению тиражирования *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение числа междоузлий микрорастений картофеля сорта Жуковский ранний на начальных этапах культивирования.

Важным моментом при клональном микро-размножении является усиление процесса ризогенеза. Основными показателями ризогенеза для растений *in vitro* можно считать число корней и их длину. Хорошо сформированная корневая система оказывает положительное влияние на онтогенез микрорастений.

Влияние метаболитов штаммов бактерий на ризогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro* показано в табл. 2.

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из МПП  
на ризогенез микрорастений картофеля в условиях *in vitro***

Table 2

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost  
on rhizogenesis of potato micro-plants under *in vitro* conditions**

Сорт Variety	Штамм Strain	Количество корней, шт. Number of roots, pcs.			Длина корней на 30-е сутки, мм Root length on the 30th day, mm
		Период культивирования, дни Cultivation period, days			
		10	20	30	
Жуковский ранний	Контроль Control	3,5±0,48	4,9±0,59	7,9±0,45	74,5±3,01
	9-08-CH9	3,9±0,51	5,7±0,60	8,2±0,30	76,3±3,74
	10-50TS2	4,0±0,41	5,5±0,50	8,9±0,42*	79,3±3,86
	875TS	3,3±0,30	4,5±0,56	6,5±0,52*	67,5±3,45*
Розара	Контроль Control	3,1±0,37	4,6±0,33	5,7±0,42	61,5±3,33
	9-08-CH9	3,7±0,25	5,9±0,42*	7,5±0,41*	73,7±3,39*
	10-50TS2	3,7±0,27	6,1±0,39*	7,6±0,40*	83,5±3,44*
	875TS	3,5±0,36	4,5±0,44	5,9±0,39	71,5±4,11*
Ред Скарлетт	Контроль Control	2,8±0,47	5,7±0,33	7,1±0,32	73,8±3,33
	9-08-CH9	3,3±0,39	6,9±0,37*	8,8±0,41*	79,4±3,86
	10-50TS2	3,9±0,45*	6,5±0,40*	9,2±0,42*	88,2±3,77*
	875TS	3,5±0,51	5,3±0,54	8,5±0,33*	73,2±3,41

\* – достоверность отличия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из МПП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the MMP bacterial strain from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

Лучшее корнеобразование на 30-е сутки отмечается на питательной среде с добавлением вторичных метаболитов штаммов бактерий *Achromobacter spanius* 10-50TS2, *Bacillus cereus* 9-08-CH9 и *Bacillus cereus* 875TS. Вторичные метаболиты данных штаммов достоверно ( $p \leq 0,05$ ) оказывают положительное влияние на количество и длину корней на заключительном этапе культивирования микрорастений. Достаточно развитая корневая система способствует в будущем хорошей приживаемости, более полному поглощению питательных веществ, а также развитию всего микрорастения.

Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение числа и длины корней у микрорастений картофеля сорта

Жуковский ранний на заключительном этапе культивирования.

Известно, что пигменты (хлорофиллы *a* (Chl.a) и *b* (Chl.b), каротиноиды (Car.)) играют решающую роль в процессе фотосинтеза и, в конечном итоге, продуктивности растений в целом [20]. Хлорофилл *a* – главный функциональный пигмент, служащий донором энергии для фотосинтезирующих реакций. Хлорофилл *b* – компонент фотосинтетического аппарата высших растений, основной функцией которого считается повышение светособирающей способности [21, 22]. Содержание хлорофилла может быть использовано в качестве важного диагностического показателя для исследования роста растений [23]. Каротиноиды играют роль вспомогательных пигментов. Они передают дополнительную энергию

**Влияние метаболитов штаммов бактерий из ММП на содержание пигментов фотосинтеза в листьях микрорастений картофеля**

Table 3

**Effects of metabolites of bacterial strains from permafrost on photosynthetic pigments in leaves of potato micro-plants**

Сорт Variety	Штамм Strain	Chl.a*, мг Chl.a, mg	Chl.b*, мг Chl.b, mg	Chl.a Chl.b	Car. *, мг Car., mg
Жуковский ранний	Контроль Control	0,227±0,00067	0,139±0,00033	0,366±0,00088	0,038±0,00033
	9-08-СН9	0,225±0,00033	0,193±0,00068*	0,418±0,00058*	0,034±0,00072
	10-50TS2	0,236±0,00058*	0,180±0,00033*	0,416±0,00067*	0,035±0,00033
	875TS	0,219±0,00033*	0,158±0,00033*	0,377±0,00033*	0,025±0,00088*
Розара	Контроль Control	0,222±0,00066	0,124±0,00033	0,346±0,00077	0,033±0,00013
	9-08-СН9	0,233±0,00021*	0,199±0,00019*	0,432±0,00033*	0,038±0,00042*
	10-50TS2	0,236±0,00033*	0,187±0,00027*	0,423±0,00033*	0,033±0,00011
	875TS	0,220±0,00054	0,161±0,00033*	0,381±0,00068*	0,030±0,00033*
Ред Скарлетт	Контроль Control	0,240±0,00067	0,159±0,00033	0,399±0,00088	0,041±0,00011
	9-08-СН9	0,246±0,00033*	0,193±0,00068*	0,439±0,00058*	0,050±0,00033*
	10-50TS2	0,242±0,00058*	0,189±0,00053*	0,431±0,00067*	0,045±0,00031*
	875TS	0,230±0,00033*	0,180±0,00077*	0,410±0,00033*	0,033±0,00065*

\* – достоверность различия значений с опытным вариантом с использованием штамма бактерий из ММП от значений, полученных в контрольном варианте (\* –  $p \leq 0,05$ ).

\* – reliability of the difference between the values with the experimental variant using the bacterial strain from the MMP from the values obtained in the control variant (\* –  $p \leq 0.05$ ).

на хлорофиллы, выполняя светособирающую функцию, и отводят избыточную энергию от хлорофиллов, выполняя светозащитную функцию [24, 25].

Влияние метаболитов штаммов бактерий на содержание пигментов фотосинтеза в листьях микрорастений картофеля показано в таблице 3.

Анализ полученных данных по влиянию вторичных метаболитов штаммов бактерий на содержание пигментов фотосинтеза в листьях микрорастений картофеля показывает, что штаммы *Bacillus cereus* 9-08-СН9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2 достоверно ( $p \leq 0,05$ ) повышают содержание хлорофилла *a*. Метаболиты штаммов бактерий *Bacillus cereus* 875TS в указанных концентрациях вызывают достоверное ( $p \leq 0,05$ ) снижение содержания хлорофилла *a* и каротиноидов в микрорастениях картофеля всех изучаемых сортов, тем самым снижая рост и развитие микрорастений.

В свою очередь все варианты штаммов достоверно повышают содержание хлорофилла *b*,

тем самым активизируя светособирающую способность растения и повышая общую активность процесса фотосинтеза. Это говорит о том, что штаммы *Bacillus cereus* 875TS потенциально могут обладать уникальными биохимическими, физиологическими свойствами, способными влиять на морфофизиологические и биохимические показатели растений.

### Выводы

В результате исследования из кернов многолетнемерзлых пород были выделены два штамма бактерий. Установлено, что при совместном выращивании микрорастений картофеля в условиях *in vitro* на питательной среде Мурасиге–Скуга с вторичными метаболитами бактерий штаммов *Bacillus cereus* 9-08-СН9 и *Achromobacter spanius* 10-50TS2, внесенными в момент черенкования в дозе 250 мкл, оказывают наибольший стимулирующий эффект на морфогенез, ризогенез и процесс фотосинтеза что способствует ускорению метода клонального микро-

множения *in vitro* материала для оригинального семеноводства картофеля.

### Список литературы / References

1. Ткаченко О.В., Евсеева Н.В., Бурьгин Г.Л., Каргаполова К.Ю., Лобачев Ю.В., Матора Л.Ю., Щеголев С.Ю. Эффективность культивирования клеток и тканей растений *in vitro* в присутствии бактерий и их метаболитов. *Биология клеток растений in vitro и биотехнология. Медисонт. XI Международная конференция «Биология клеток растений in vitro и биотехнология» (23–27 сентября 2018 года, г. Минск, Республика Беларусь)*. Минск; 2018:238–239.

Tkachenko O.V., Yevseeva N.V., Burygin G.L., Kargapolova K.Yu., Lobachev Yu.V., Matora L.Yu., Shchegolev S.Yu. *The biology of plant cells in vitro and biotechnology: Proceedings of the 11th International conference, September 23-27, 2018. Minsk, Republic of Belarus*. Minsk; 2018:238–239. (In Russ.)

2. Devi A.R., Kotoky R., Pandey P., Sharma G.D. Application of Bacillus spp. for Sustainable Cultivation of Potato (*Solanum tuberosum* L.) and the Benefits. *Bacilli and Agrobiotechnology*. Islam M., Rahman M., Pandey P., Jha C., Aeron A. (eds) 2016:185–221. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44409-3_9)

3. Poveda J., González-Andrés F. *Bacillus* as a source of phytohormones for use in agriculture. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2021;105:8629–8645. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11492-8>

4. Yadav A.N., Singh J., Rastegari A.A., Yadav N. *Plant microbiomes for sustainable agriculture*. Berlin: Springer; 2020.

5. Тимофеева С.В. *Исследование роли биотических и абиотических факторов в приживаемости интродуцируемых бактерий на первых этапах онтогенеза растений*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб.; 2000. 22 с.

Timofeeva S.V. *Investigation of the role of biotic and abiotic factors in the survival of introduced bacteria at the first stages of plant ontogenesis*: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., St.-Petersburg. 2000. 27 p. (In Russ.)

6. Субботин А.М., Нарушко М.В., Симонова Е.О. Отбор штаммов бактерий, выделенных из многолетнемерзлых пород, по влиянию на адаптивные показатели растений. *Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции, г. Тюмень, 02–05 июля 2015 г.* Тюмень: Эпоха; 2015:372–374.

Subbotin A.M., Narushko M.V., Simonova Ye.O. Selection of strains of bacteria isolated from permafrost, according to their influence on the adaptive parameters of plants: *Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the Cryosphere: Proceedings of the International conference, Tyumen, July 02-05, 2015 Tyumen': Ehpokha*. 2015:372–374. (In Russ.)

7. Субботин А.М., Нарушко М.В., Боме Н.А., Петров С.А., Мальчевский В.А., Габдуллин М.А. Влияние микроорганизмов из многолетнемерзлых пород

на морфофизиологические показатели яровой пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016; 20(5):666–672. <https://doi.org/10.18699/VJ16.119>

Subbotin A.M., Narushko M.V., Bome N.A., Petrov S.A., Malchevskiy V.A., Gabdullin M.A. Influence of permafrost microorganisms on morphophysiological indicators of spring wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii= Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(5):666–672. (In Russ.). <https://doi.org/10.18699/VJ16.119>

8. Субботин А.М., Нурпеисова А.С., Нарушко М.В. Влияние метаболитов бактерий из многолетнемерзлых пород на развитие меристемных растений *SALANUM TUBEROSUM*. *ВАВИЛОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2018: Международная научно-практическая конференция, посвященная 131-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. Саратов, 28–29 ноября 2018 года*. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова; 2018:94–96.

Subbotin A.M., Nurpeisova A.S., Narushko M.V. Influence of bacterial metabolites from permafrost on the development of meristem plants *SALANUM TUBEROSUM*. *VAVILOV READINGS – 2018: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 131st anniversary of Academician N.I. Vavilov*. Saratov, November 28–29, 2018. Saratov: Saratov State Vavilov Agrarian University; 2018:94–96. (In Russ.)

9. Ренев Н.О., Мальчевский В.А., Субботин А.М. Использование метаболитов бактерий из многолетнемерзлых пород для повышения урожайности мини-клубней меристемных растений картофеля. *Биологически активные препараты для растениеводства: научное обоснование – рекомендации – практические результаты, г. Минск, 22 октября 2020*. Минск: БГУ; 2010:131–133.

Renev N.O., Malchevskiy V.A., Subbotin A.M. The use of bacterial metabolites from permafrost to increase the yield of mini-tubers of potato meristem plants. *Biologically active preparations for crop production: scientific rationale – recommendations – practical results, Minsk, October 22, 2020*. Minsk: BSU; 2020;131–133. (In Russ.)

10. Gerhardt P. *Manual of methods for general bacteriology*. Washington, DC 20006: American Society for Microbiology; 1981.

11. Dawson R.M.C., Elliott Daphne C., Elliott W.H., Jones K.M. (eds). *Data for Biochemical Research*. Oxford: Clarendon press, 1986.

12. Овэс Е.В., Анисимов Б.В. *Методические рекомендации по тиражированию in vitro материала для оригинального семеноводства картофеля*. М.: ФГБНУ ВНИИКХ; 2017. 25 с.

Oves Ye.V., Anisimov B.V. *Guidelines for in vitro replication of material for original potato seed production*. Moscow; 2017. 25 p. (In Russ.)

13. Удовенко Г.В., Семушина Л.А., Синельникова В.Н. Особенности различных методов оценки со-

леустойчивости растений. *Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды*. Л.: Колос; 1976:228–238.

Udoenko G.V., Semushina L.A., Sinelnikova V.N. Osobennosti razlichnykh metodov otsenki soleustoychivosti rasteniy. *Metody otsenki ustoychivosti rasteniy k neblagopriyatnym usloviyam sredy*. Leningrad: Kolos; 1976:228–238. (In Russ.)

14. Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В. *Большой практикум по фотосинтезу*. М.: АКАДЕМИА; 2003. 256 с.

Gavrilenko V.F., Zhigalova T.V. *A guide to photosynthesis*. Moscow: ACADEMIA; 2003. 256 p. (In Russ.)

15. Wellburn A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 1994. 144 (3):307.

16. Björn L.O., Papageorgiou G.C., Blankenship R.E. Govindjee. A viewpoint: why chlorophyll a? *Photosynth. Res.* 2009;(99):85–98.

17. Esteban R., Barrutia O., Artetxe U., Fernández-Marín B., Hernández A., García-Plazaola J.I. Internal and external factors affecting photosynthetic pigment composition in plants: a meta-analytical approach. *N. Phytol.*; 2015:268–280.

18. Kiang N.Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R.E. Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms. *Astrobiology.* 2007;7(1):222–251

19. Kunugi M., Satoh S., Ihara K., Shibata K., Yamagishi Y., Kogame K., Obokata J., Takabayashi A., Tanaka A. Evolution of green plants accompanied changes in light-harvesting systems. *Plant Cell Physiol.*; 2016:1231–1243

20. Croft H., Chen J.M. *Leaf pigment content*. Amsterdam: Elsevier Inc. 2017.

21. Croft H. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. *Global Change Biol.* 2017. 23 (9). P. 3513–24.

22. Tamburini E. Development of FT-NIR models for the simultaneous estimation of chlorophyll and nitrogen content in fresh apple (*Malus domestica*) leaves. *Sensors*; 2015; 15(2):2662–2679.

23. Hotta Y. New physiological effects of 5-aminolevulinic acid in plants: the increase of photosynthesis, chlorophyll content, and plant growth. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* 1997; 61 (12):2015–2028.

24. Wilkinson D.M. The adaptive significance of autumn leaf colours. *Oikos.* 2002; 99 (2): 402–407.

25. Davison P.A., Hunter C.N., Horton P. Overexpression of  $\beta$ -carotene hydroxylase enhances stress tolerance in *Arabidopsis*. *Nature*; 2002:418.

#### Об авторах

РЕНЁВ Николай Олегович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3531-2624>, Scopus AuthorID: 57222066155, РИНЦ AuthorID: 1034698, e-mail: solitary\_72@mail.ru

МАЛЬЧЕВСКИЙ Владимир Алексеевич, доктор медицинских наук, профессор РАН, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1308-2899>, Scopus AuthorID: 57190758790, ResearcherID: G-9557-2015, РИНЦ AuthorID: 194927, e-mail: malchevski@mail.ru

СУББОТИН Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, Scopus AuthorID: 35776939200, ResearcherID: S-3256-2017, РИНЦ AuthorID: 607480, e-mail: subbotin.prion@yandex.ru

ПЕТРОВ Сергей Анатольевич, доктор медицинских наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, Scopus AuthorID: 57190756454, ResearcherID: A-7886-2016, РИНЦ AuthorID: 607480, e-mail: tumiki@yandex.ru

#### About the authors

RENEV, Nikolay Olegovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3531-2624>, Scopus AuthorID: 57222066155, RISC AuthorID: 1034698, e-mail: solitary\_72@mail.ru

MALCHEVSKY, Vladimir Alekseevich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Med.), <https://orcid.org/0000-0002-1308-2899>, ResearcherID: G-9557-2015, Scopus AuthorID: 57190758790, RISC AuthorID: 194927, e-mail: malchevski@mail.ru

SUBBOTIN, Andrey Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5135-3194>, ResearcherID: S-3256-2017, Scopus AuthorID: 35776939200, RISC AuthorID: 607480, e-mail: subbotin.prion@yandex.ru

PETROV, Sergey Anatolievich, Dr. Sci. (Med.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1566-2299>, ResearcherID: A-7886-2016, Scopus AuthorID: 57190756454, RISC AuthorID: 607480, e-mail: tumiki@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.08.2022

Поступила после рецензирования / Revised 14.07.2023

Принята к публикации / Accepted 31.08.2023

Original article

## Seasonal changes in the profile of blood plasma fatty acids as a mechanism of human adaptation to the extreme conditions of the North

O. N. Kolosova<sup>✉</sup>, B. M. Kershengolts, N. A. Solovieva

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

<sup>✉</sup>[kololgonik@gmail.com](mailto:kololgonik@gmail.com)

### Abstract

Extreme environmental factors lead to changes in the metabolism of the body and, in particular, to the predominant use of proteins and fats. The aim of our study was to reveal seasonal differences in the blood plasma fatty acid profile of people with evolutionarily developed mechanisms of adaptation to the specific conditions of the North. The subjects of the study were young male aborigines of the North (Yakuts), virtually healthy volunteers whose mean age was  $19.1 \pm 2.2$  (n = 26). Venous blood samples were collected in the morning from 8:00 am to 9:00 am in different seasons (summer, fall, and winter). Temperature variations during these seasons were more than 100 °C. Identification and determination of fatty acid (FA) concentrations in the blood plasma samples were performed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Statistical analysis of blood plasma lipid profile data was performed using MetaboAnalyst 5.0. The results showed that the ratio of unsaturated fatty acids (USFA) to saturated fatty acids (SFA) increases by 1.8 times in winter compared to other periods (summer, and autumn). The leading role of polyunsaturated fatty acids (PUSFA) in the adaptation of the human body to interseasonal changes has been revealed. The most important role is played by the winter increase of 11,14,17-eicosatrienoic acid (omega-3) and the winter decrease of arachidonic acid, cis-11,14-eicosadienoic acid and 8,11,14-eicosatrienoic acid.

**Keywords:** seasonal changes, chronobiology, fatty acids, adaptation, cold, metabolomics, lipidomics, student, indigenous people, blood plasma

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project “Physiological and biochemical mechanisms of adaptation of plants, animals, humans to the conditions of the Arctic / Subarctic and the development of biological products based on natural northern raw materials that increase the efficiency of the adaptation process and the level of human health in extreme environmental conditions” (theme number: FWRS-2021-0025; registration number: AAAA-A21-121012190035-9), using the Core Shared Research Facility of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the SB RAS”.

**For citation:** Kolosova O.N., Kershengolts B.M., Solovieva N.A. Seasonal changes in the profile of blood plasma fatty acids as a mechanism of human adaptation to the extreme conditions of the North. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):443–450. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-443-450>

Оригинальная статья

## Сезонные изменения профиля жирных кислот плазмы крови как механизм адаптации человека к экстремальным условиям Севера

О. Н. Колосова<sup>✉</sup>, Б. М. Кершенголец, Н. А. Соловьева

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

<sup>✉</sup>[kololgonik@gmail.com](mailto:kololgonik@gmail.com)

### Аннотация

Экстремальные факторы окружающей среды приводят к изменениям в метаболизме организма и, в частности, к преимущественному использованию белков и жиров в обмене веществ. Целью нашей работы было выявить сезонные различия в содержании жирных кислот в плазме крови людей с эволюционно развитыми механизмами адаптации к специфическим условиям Севера. Объектами исследования были молодые мужчины-абориге-

ны Севера (якуты), практически здоровые добровольцы, средний возраст которых составил  $19,1 \pm 2,2$  года ( $n = 26$ ). Образцы венозной крови брали в утренние часы с 8:00 до 9:00 в разное время года (лето, осень, зима). Колебания температуры в течение этих сезонов составляли более 100 °С. Идентификацию и определение концентрации жирных кислот (ЖК) в образцах плазмы крови проводили методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии (GC-MS). Статистический анализ данных липидного профиля плазмы крови проводился с использованием платформы MetaboAnalyst 5.0. Результаты показывают, что отношение ненасыщенных жирных кислот (UFA) к насыщенным жирным кислотам (SFA) зимой увеличивается в 1,8 раза по сравнению с другими периодами (летом, осенью). Выявлена ведущая роль полиненасыщенных жирных кислот в адаптации человеческого организма к межсезонным изменениям. Наиболее важную роль играют зимнее увеличение содержания 11,14,17-эйкозатриеновой кислоты (омега-3) и зимнее снижение арахидоновой кислоты, цис-11,14-эйкозодиеновой кислоты и 8,11,14-эйкозатриеновой кислоты.

**Ключевые слова:** сезонные изменения, годовой ритм, жирные кислоты, адаптация, экстремальные условия, метаболомика, липидомика, север, коренные народы, плазма крови

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ по проекту «Физиологические и биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики» (код научной темы: FWRS-2021-0025; гос. регистр. номер: АААААА-А21-121012190035-9), а также с использованием оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

**Для цитирования:** Колосова О.Н., Кершенгольц Б.М., Соловьева Н.А. Сезонные изменения профиля жирных кислот плазмы крови как механизм адаптации человека к экстремальным условиям Севера. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):443–450. (In Eng.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-443-450>

## Introduction

Seasonally recurring patterns in physiology and behavior are common in nature [1–4]. They often reflect adaptive, proactive responses to annual energy constraints [5–8]. The North-East of Russia is one of the harshest regions of the globe, where a complex of environmental factors of extreme nature affects a living organism: specific photoperiodism (polar day and polar night), cold, sharply continental climate, and geomagnetic disturbances. In this regard, there is a need to study the ecological, physiological and biochemical mechanisms of adaptation of the body to the complex effects of extreme factors both during short-term and long-term human residence in the North. The question of how the constancy of the internal environment of the body is maintained in various seasons of the year in extreme conditions is especially relevant. Extreme environmental factors lead to changes in all types of metabolic processes and, above all, to the predominant use of proteins and fats in metabolism, as well as to a significant decrease in the proportion of carbohydrates [9]. Fatty acids (LC), being structural elements of lipids and their derivatives, are involved in almost all the most important physiological processes, thereby ensuring the vital activity of the human body and its optimal interaction with the environment. LC are involved in the processes of synthesis and energy formation, maintaining the integrity of cell membranes, regulation of inflammatory processes, regulation of transcription and intracellular signaling. In recent years, more and more attention has

been paid to the study of the role of LC as biomarkers of the functional state of the body. At the same time, there is currently insufficient information about the presence of seasonal changes in the fatty acid profile of human blood plasma adapted to the extreme conditions of the North.

The aim of this study was to identify seasonal differences in the profile of fatty acids in the blood plasma of people with evolutionarily developed mechanisms of adaptation to specific conditions of the North.

## Materials and methods

A longitudinal study was conducted during three seasons (summer, autumn, and winter) in 2019. The object of the study was young aboriginal men of the North (Yakuts), practically healthy volunteers, whose average age was  $19.1 \pm 2.2$  ( $n = 26$ ). All the subjects at the time of the study had no signs of the disease and were found to be practically healthy. Venous blood sampling was carried out from 8:00 am to 9:00 am after night fasting in summer from June 21 to June 22, in autumn – September 23, in winter – December 21–22. Temperature differences in these seasons were more than 100 °C. The study was conducted in full compliance with the ethical recommendations of the Helsinki Declaration of the World Medical Association and the “Fundamentals of the Legislation of the Russian Federation on Public Health Protection” (1993).

Identification and determination of the concentration of fatty acids (FAs) in blood plasma samples was carried out by gas chromatography with mass

spectrometry (GC-MS) [10]. To obtain methyl esters of FAs, the method of acid hydrolysis was used, 100 ml of serum was placed in sealed containers, 1 ml of 2.5 % methanol  $H_2SO_4$  solution was added and placed for one hour in a thermoshaker at 80 °C. and 1000 rpm. After cooling to room temperature (20 °C), 1 ml of 0.9 % NaCl solution was added to the resulting solution. Next, methyl esters of fatty acids were extracted with 0.5 ml of hexane. The resulting mixture was placed in a shaker for 1 min, then centrifuged for 1 min at 6.5 g. methyl esters of FAs were taken by decantation from the infusion liquid. 200  $\mu$ l were taken for analysis.

Hexane extract of FAs esters was placed in the autosampler of the MAESTRO 7820/5975 chromatograph based on the Agilent 7820 gas chromatograph and the 5975 mass spectrometric detector of the same manufacturer. An HP-INNOWax capillary column (30 m, 0.25 mm, 0.25 microns) was used for separation; the velocity of the carrier gas (helium) was 2 ml/min. A non-separating insert was used to inject samples with a volume of 10  $\mu$ l; the injector temperature was 2700°C. Temperature separation program: 40 °C (5 min); 2500 °C (40 °C/min, 5 min). The temperature of the line connecting the chromatograph and the mass spectrometer is 2700 °C, the temperature of the ion source is 2300 °C, the temperature of the detector is 1500 °C. Registration was carried out by full ion current (SCAN mode).

The identification of methyl esters of FAs was carried out using a set of standards for methyl esters of LC from Supelco. 37-component mixture of FAME (cat. No. 18919-1MP) and using the NIST database. The concentration of LC methyl esters was determined by the areas of chromatographic peaks of the corresponding compounds by internal normalization [2]. The total area of the peaks of methyl esters of FAs was taken as 100 % and the percentage concentration of individual FAs in relation to the total content of FAs was calculated.

All analytical measurements were carried out three times. The results of the experiment are presented in the form of the arithmetic mean and its standard deviation. The calculation was carried out using the AnalystSoft package, StatPlus – statistical analysis program, v.2007. A Principal Component Analysis (PCA) method based on the use of a web server for the analysis of metabolic data called MetaboAnalyst was used.

## Results and Discussion

One of the main features of the ecological and physiological mechanisms of adaptation of the or-

ganism of the indigenous inhabitants of the North is the protein-lipid type of metabolic processes, based on the use of lipids in bioenergy processes, which ensure the economical and most optimal functioning of the body under extreme conditions. At the same time, it is known that lipids can fulfill their bioenergy function, “only by burning in the flame of a candle of carbohydrates.” Therefore, we studied the seasonal changes in glucose, cholesterol and fatty acid spectrum of blood serum MY. The lowest concentration of cholesterol in the blood was noted in winter (Fig. 1). The glucose level does not significantly change.

The dynamics of the content of individual fatty acids (FAs) in the blood plasma of men of the indigenous inhabitants of the North is presented in the table. By GC-MS method, 32 FAs were identified in the blood plasma of young men. The largest percentage of all FAs is occupied by palmitic saturated fatty acid (SFA, C16:0), which ranges from 38.23 % in winter to 44.37 % in autumn.

In winter, compared with the fall, the content of saturated fatty acids (SFA) in blood serum decreases by 11.4 %, the concentration of monounsaturated fatty acids (MUSFA) increases by 6.92 % and the content of polyunsaturated fatty acids increases by 4.5 % (PUSFA) (Fig. 2A).

The results obtained indicate that in winter, in comparison with other periods, the ratio of unsaturated fatty acids (USFA) to SFA increases by 1.8 times (Fig. 2B). And the proportion of PUSFA increases approximately as many times compared with MUSFA (Fig. 2B).

A decrease in the level of SFA in the blood during the winter period indicates an increase in their use as bioenergetic raw materials. A higher content

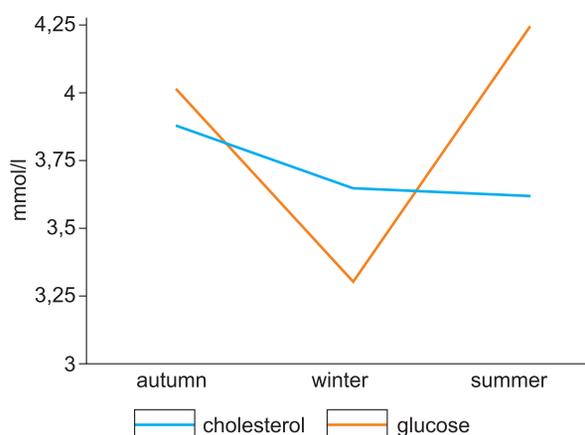


Fig. 1. Seasonal dynamics of glucose concentration and serum cholesterol level (mmol/l)

**Seasonal dynamics of the content of some fatty acids in the blood plasma of young Yakut men (% of the sum of fatty acids M±SD)**

Chemical class	Fatty acids	Summer (1)	Autumn (2)	Winter (3)	
SFA	Hexanoic acid, C6:0	0.0083±0.003	0.0068±0.002	0.0031±0.001	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{1,2} \leq 0.001$
SFA	Caprylic acid, C8:0	0.0004±0.0001	0.0004±0.0001	0.0005±0.0001	
SFA	Capric acid, C10:0	0.0013±0.0005	0.0006±0.002	0.0022±0.001	$p \leq 0.05$
SFA	Undecanoic acid, C11:0	0.0022±0.0009	0.0006±0.001	0.0032±0.001	$P_{1,2} \leq 0.001$ $P_{2,3} \leq 0.001$
SFA	Lauric acid, C12:0	0.0072±0.002	0.0117±0.003	0.0014±0.001	$P_{1,2} \leq 0.05$ $P_{1,3} \leq 0.0001$
SFA	Tridecanoic acid, C13:0	0.0038±0.001	0.0045±0.003	0.0032±0.001	
SFA	Myristic acid, C14:0	0.0052±0.002	0.0049±0.002	0.0021±0.002	$p \leq 0.05$
ω 5-MUSFA	Myristoleic acid, C14:1	0.0238±0.006	0.0188±0.006	0.1710±0.006	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
SFA	Pentadecanoic acid, C15:0	0.0339±0.004	0.0183±0.004	0.0066±0.001	$p = 0.001$
SFA	cis-10-Pentadecenoic acid, C15:1	0.0023±0.0001	0.0024±0.0001	0.0403±0.0001	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
SFA	Palmitic acid, C16:0	43.91±0.841	44.37±0.641	38.23±0.895	
ω 7-MUSFA	Palmitoleic acid, C16:1Δ7	0.0311±0.004	0.0290±0.0026	0.2512±0.062	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
SFA	Heptadecanoic acid, C 17:0	0.4359±0.034	0.4190±0.041	0.0088±0.003	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
ω 7-MUSFA	cis-10-Heptadecenoic, C 17:1Δ10	0.0016±0.0004	0.0021±0.006	0.1207±0.011	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
ω 6-PUSFA	γ-Linolenic acid, C 18:3Δ6,9,12	0.0077±0.001	0.0058±0.001	0.0087±0.001	
ω 6-PUSFA	Linoleic acid, C 18:2Δ9,12	13.1382±0.454	13.8441±0.231	12.1904±0.641	
ω 9-MUSFA	Oleic acid, C 18:1Δ9	4.7712±0.124	4.5493±0.655	8.8852±0.676	$P_{1,3} \leq 0.001$ $P_{2,3} \leq 0.001$
ω 3-PUSFA	Linolenic acid, C 18:3Δ3	0.1401±0.004	0.1617±0.008	0.0102±0.003	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
SFA	Stearic acid, C 18:0	29.9621±1.024	31.1415±1.008	26.3863±2.548	
ω 6-PUSFA	Arachidonic acid, C 20:4Δ5,8,11,14	3.7447±0.104	3.2598±0.023	3.6719±0.034	
ω 3-PUSFA	cis-5,8,11,14,17-Eicosapenoic acid, C 20:5Δ5,8,11,14,17	0.1186±0.004	0.1208±0.004	0.0365±0.001	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
ω 6-PUSFA	cis-8,11,14 -Eicosatrienic acid, C 22:3Δ11,14,17	0.7274±0.112	0.7026±0.104	0.0744±0.133	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
ω 6-PUSFA	cis-11-14-Eicosadienoic acid, C 20:2Δ11,14.	0.0596±0.008	0.0566±0.002	0.0240±0.003	$P_{1,3} \leq 0.001$ $P_{2,3} \leq 0.001$
ω 9-MUSFA	cis-11-Eicosenoic acid, C 20:1Δ11	0.0416±0.004	0.0410±0.003	0.0195±0.005	$P_{1,3} \leq 0.001$ $P_{2,3} \leq 0.001$
ω 3-PUSFA	cis-11-14-17-Eicosatrienic acid, C22:3Δ11,14,17	0.0121±0.004	0.0050±0.002	6.0082±0.001	$P_{1,3} \leq 0.0000$ $P_{2,3} \leq 0.0000$
SFA	Arachidic acid, C20:0	0.2729±0.041	0.2444±0.069	0.0071±0.0005	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
SFA	Heneicosanoic acid C21:0	0.4965±0.042	0.4020±0.012	0.1815±0.005	$P_{1,3} \leq 0.0001$ $P_{2,3} \leq 0.0001$
ω 6-PUSFA	cis-13,16-Docosadienoic acid, C 22:2Δ13,16	0.1466±0.004	0.0370±0.0031	0.0133±0.0024	$P_{1,3} \leq 0.0001$

Chemical class	Fatty acids	Summer (1)	Autumn (2)	Winter (3)	
ω 9-MUSFA	Erucic acid, C 22:1Δ9	0.9796±0.098	0.2566±0.065	2.9959±0.042	p <sub>1,2</sub> ≤0.001 p <sub>1,3</sub> ≤0.001
SFA	Behenic acid, C22:0	0.7616±0.124	0.2059±0.062	0.4093±0.061	p <sub>1,2</sub> ≤0.01 p <sub>2,3</sub> ≤0.05
SFA	Tricosanoic acid, C23:0	0.0162±0.004	0.0126±0.003	0.0286±0.001	
SFA	Lignoceric acid, C24:0	0.1310±0.031	0.0624±0.002	0.2027±0.061	

\* SFA – saturated fatty acid, MUFA – monounsaturated fatty acid, PUSFA – polyunsaturated fatty acid.

of PUFAs in blood plasma in winter indicates an increased need for their use as a structural component of cell membranes that provide optimal membrane viscosity for this season. A significantly higher percentage of PUSFA in winter probably provides the body of indigenous people with a sufficient amount of regulatory substances that determine the optimal functioning of the body in harsh environmental conditions.

A decrease in the “palmitic acid/oleic acid” ratio in winter indicates an increase in the involvement of oleic acid in the composition of biological membranes (Fig. 3). An increase in the concentration of oleic acid in the composition of biological membranes in the central nervous system is important for the course of nervous processes, as it provides greater conductivity, stability and strength of nervous processes.

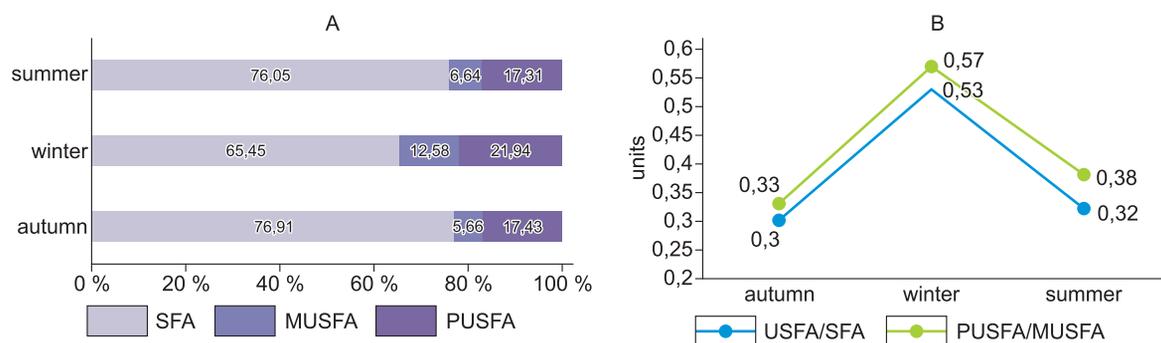
The results of a study of seasonal changes in the content of FSA in blood plasma of young Yakut men, statistically processed by the method of principal components (PCA) are presented in Fig. 4. The first principal component (PC1) values are plotted on the abscissa axis, the variance of which reaches 44.8 % – these are fatty acids whose seasonal changes are

most significant. A significant difference is visible between the content of the total AFs complex in winter and summer-autumn seasons.

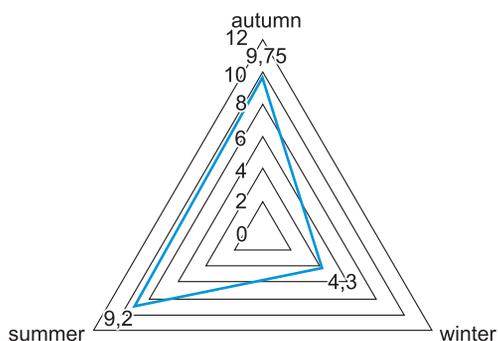
For a detailed analysis of seasonal changes in the content of 32 specific FAs recorded in the blood serum of 20-21-year-old Yakut men an analysis of the results was carried out by the method of assessing the importance of variables (Fig. 5).

It was established which of the investigated FAs are included in PC1 (15 of 32; VIPscores > 1.3) and which in component 2 (4 of 32; VIPscores < 0.3), which is in good agreement with the results shown in Fig. 1. It is seen that of the saturated FAs studied, the most significant role in seasonal changes is played by winter decreases (summer increases) in the contents of palmitic and stearic and tridecane FAs. Apparently, this is due to adaptive changes in the state of the lipid layer of cell membranes - a decrease in viscosity in the winter due to a decrease in the percentage of SFA and its increase in the summer due to an increase in the percentage of SFA.

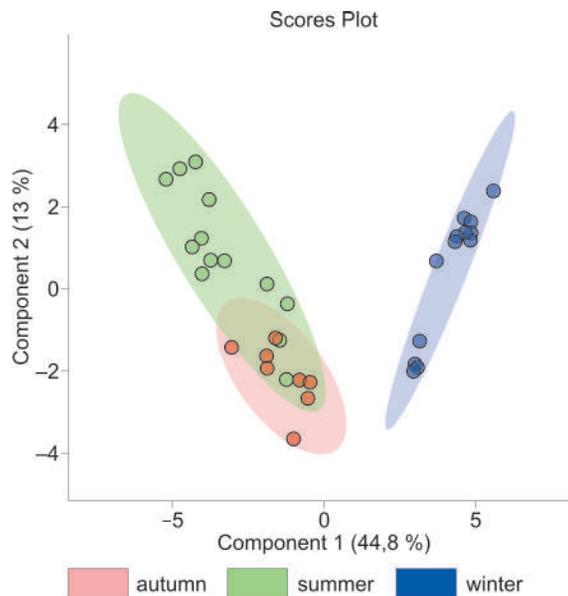
Of the USFA, the most significant role is played by the winter increase in the content of 11, 14, 17-Eicosatrienoic acid and the winter decrease in the content of eicosatrienoic acid, its other deriva-



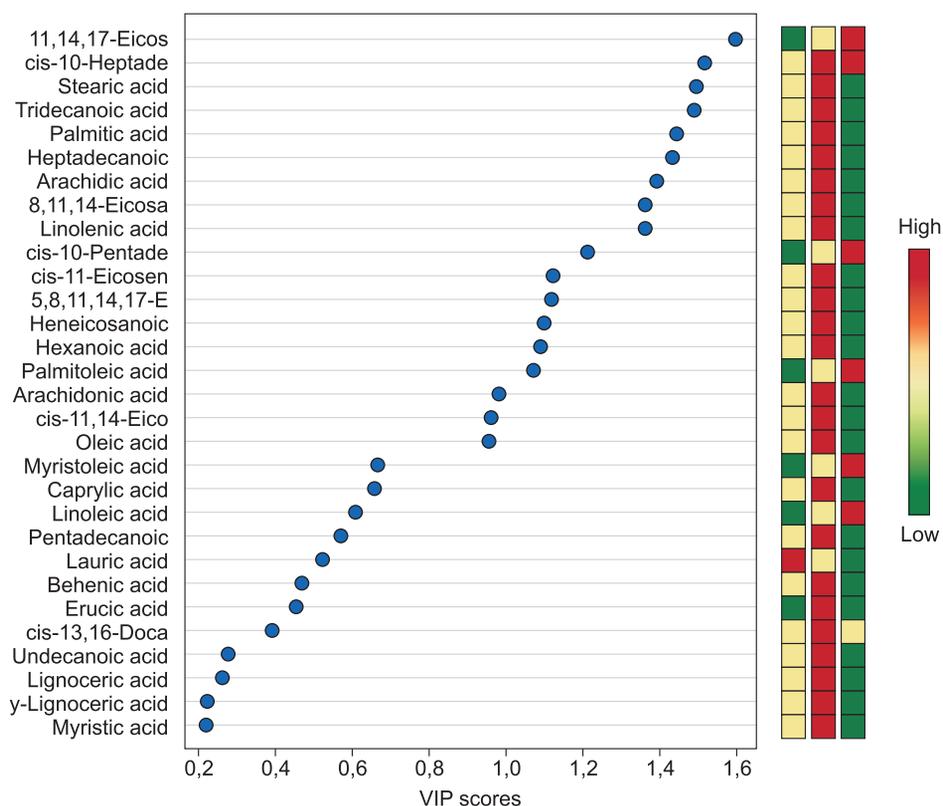
**Fig. 2.** (A) Seasonal dynamics of the concentration (%) of different classes of fatty acids the blood plasma of students: SFA – saturated fatty acid, MUSFA – monounsaturated fatty acid, PUSFA – polyunsaturated fatty acid; (B) The ratio of the total content of PUSFA / MUSFA in the blood plasma of the subjects in different seasons of the year (units)



**Fig. 3.** The ratio of the content of palmitic acid C16:0 SFA to oleic acid C18:1 ω9-MUSFA in the studied groups of students in different seasons of the year (units)



**Fig. 4.** Changes in the content of fatty acids in the blood serum of students depending on the seasons. The resulting image is a graphical representation of the statistical processing of the obtained data by the method of principal components (PCA) with the allocation of PC1 and PC2



**Fig. 5.** The importance of projection variables for the studied plasma fatty acids of students depending on the season. Values Variable Importance in Projection (VIP) – The importance of the variable in the projection. Colored rectangles on the right indicate the trend of seasonal changes in the concentration of the corresponding component in each study group

tives (cis-11,14-Eicosadienoic acid, 8,11,14-Eicosatrienoic acid) and arachidonic acid (see fig. 5 and table). These FAs are the precursors of prostaglandins and their last group are inhibitors of the processes of elongation and saturation of other fatty acids, which is in good agreement with the winter decrease in the limiting FAs in the blood of young Yakut men.

For a more detailed assessment of the role of unsaturated FAs in the processes of seasonal adaptation of the human body in Central Yakutia, an analysis was made of the importance of the variables of various groups of unsaturated FAs. From the results presented in Fig. 3, it is seen that the winter increase in the content of omega-3 and omega-7 PUSFA and a decrease in the content of MUSFA play a leading role in adaptation to seasonal changes. This indicates the intensification of the processes of regulatory processes in the winter period, in which these polyunsaturated FAs take part.

### Conclusion

Thus, there are statistically significant differences in the content of fatty acids in the blood plasma of young Yakut men in the winter and summer-autumn periods. The leading role in the adaptation of the human body to inter-seasonal changes among fatty acids is played by PUFSA, especially 11,14,17-eicosatrienoic acid (omega-3), the concentration of which increases significantly in winter, which may indicate increased secretion of physiologically active substances in the human body.

### References

1. Allebrandt K.V., Teder-Laving M., Kantermann T., Peters A., et al. Chronotype and sleep duration: the in-

fluence of season of assessment. *Chronobiology International*. 2014;31(5):731–740. <https://doi.org/10.3109/07420528.2014.901347>

2. Arntz H.R., Willich S.N., Schreiber C., Brüggemann T., Stern R., Schultheiss H.P. Diurnal, weekly and seasonal variation of sudden death: population-based analysis of 24,061 consecutive cases. *European Heart Journal*. 2000; 21(4):315–320 <https://doi.org/10.1053/ehj.1999.1739>

3. Duffy J.F., Wright K.P., Jr. Entrainment of the human circadian system by light. *Journal of Biological Rhythms*. 2005;20(4):326–338. <https://doi.org/doi:10.1177/0748730405277983>

4. Foster R.G., Kreitzman L. *Seasons of Life: The Biological Rhythms That Enable Living Things to Thrive and Survive*. London: Profile Books Ltd.; 2009. 303 p.

5. Martinez M.E. The calendar of epidemics: Seasonal cycles of infectious diseases. *PLoS Pathogens*. 2018;14(11):e1007327-15. <https://doi.org/doi:10.1371/journal.ppat.1007327>

6. O'Connell S.E., Griffiths P.L., Clemes S.A. Seasonal variation in physical activity, sedentary behavior and sleep in a sample of UK adults. *Annals of Human Biology*. 2014;41(1):1–8. <https://doi.org/10.3109/03014460.2013.827737>

7. Roenneberg T. The decline in human seasonality. *Journal of Biological Rhythms*. 2004;19(3):193–19. <https://doi.org/doi:10.1177/0748730404264863>

8. Roenneberg T., Merrow M. The circadian clock and human health. *Current Biology*. 2016;26(10):R432–R44. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.011>

9. Panin L.E. *Biochemical mechanisms of stress*. Novosibirsk: Nauka, 1983. 232 p. (In Russ.)

10. Ullah S.M., Murphy B., Dorich B., Richter B., Srinivasan K. Fat extraction from acid- and base-hydrolyzed food samples using accelerated solvent extraction. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 2011;59(6): 2169–2174. <https://doi.org/10.1021/jf104001>

### About the authors

KOLOSOVA, Olga Nikolaevna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, ResearcherID: P-6534-2015, RISC AuthorID: 274863, e-mail: kololgonik@gmail.com

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, RISC AuthorID: 88428, e-mail: kerschen@mail.ru

SOLOV'EVA, Natal'ya Alekseevna, Cand. Sci. (Med.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3570-2585>, ResearcherID: Q-9965-2018, Scopus Author ID: 57142280900, RISC AuthorID: 641179, e-mail: sonata60878@yandex.ru

### Об авторах

КОЛОСОВА Ольга Николаевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, ResearcherID: P-6534-2015, РИНЦ AuthorID: 274863, e-mail: kololgonik@gmail.com

*О. Н. Колосова и др. ♦ Сезонные изменения профиля жирных кислот плазмы крови...*

КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, РИНЦ AuthorID: 88428, e-mail: kerschen@mail.ru

СОЛОВЬЕВА Наталья Алексеевна, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3570-2585>, ResearcherID: Q-9965-2018, Scopus Author ID: 57142280900, РИНЦ AuthorID: 641179, e-mail: sonata60878@yandex.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 25.05.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 14.07.2023*

*Принята к публикации / Accepted 03.08.2023*

## Биологические ресурсы

УДК 630\*166.1(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-451-463>

Оригинальная статья

### Недревесные пищевые ресурсы леса как важная составляющая лесоресурсного потенциала Республики Саха (Якутия)

И. В. Самсонова<sup>1,3,✉</sup>, А. П. Исаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉ [e-mail@mail.ru](mailto:e-mail@mail.ru)

#### Аннотация

Приведены данные о биологических и эксплуатационных запасах различных видов недревесных пищевых ресурсов леса на территории Республики Саха (Якутия). Показано, что недревесные пищевые ресурсы леса являются важной составляющей лесоресурсного потенциала в регионе. Рассмотрены законодательная основа, система заготовок и реализация недревесных пищевых ресурсов леса населением республики. Определена социальная значимость пищевых ресурсов леса. Сделан прогноз заготовок по наиболее распространенным дикорастущим ягодам. Прогнозируемые объемы основываются на среднеголетних величинах фактически заготовленных ягод всеми субъектами хозяйствования, занимающимися данным видом хозяйственной деятельности. Предложены направления повышения объема заготовок недревесной пищевой продукции леса, которые могут способствовать социально-экономическому развитию региона. В работе использованы методы экономико-статистического анализа изменения показателей сбора и заготовки недревесных пищевых ресурсов леса, а также ситуационный анализ и социологический метод исследования. Результаты исследования могут быть применены в региональных исследованиях и использованы органами власти при подготовке программ развития лесных территорий региона. На основе научно-практических положений, анализа природных и экономических условий, оценок использования пищевых ресурсов лесов определены возможные направления развития регионального рынка этих ценных природных резервов. Предложенные разработки могут быть использованы при изучении проблем функционирования регионального рынка недревесных пищевых ресурсов леса.

**Ключевые слова:** лесные ресурсы, недревесные пищевые ресурсы леса, заготовка, ягоды, грибы, орехи, социальное использование леса

**Финансирование.** Работа частично выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (код научной темы: FWRS-2021-0023; номер гос. регистрации в ЕГИСУ: АААА-А21-121012190038-0) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант №13.ЦКП.21.0016).

**Для цитирования:** Самсонова И.В., Исаев А.П. Недревесные пищевые ресурсы леса как важная составляющая лесоресурсного потенциала Республики Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):451–463. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-451-463>

Original article

### Non-timber forest products as essential elements of the forest resource in the Republic of Sakha (Yakutia)

I. V. Samsonova<sup>1,3,✉</sup>, A. P. Isaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Institute for Biological Problems of Cryolithozone,

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

<sup>3</sup>Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉ [e-mail@mail.ru](mailto:e-mail@mail.ru)

#### Abstract

This study provides biological and operational data on the reserves of non-timber forest products in the Republic of Sakha (Yakutia), which play an important role in this region. The legal framework and system for harvesting and sell-

ing non-wood forest products by the population of the region were examined. We propose directions for increasing the volume of harvested non-wood forest food products, which can contribute to social and economic development in the region. This study employs economic and statistical analyses, situational analysis, and sociological research methods. A forecast for the most common wild berries was made based on the average annual yields harvested by all entities engaged in this type of economic activity. Information on the natural and economic conditions for the use of forest product resources and the possible development of regional markets for valuable natural reserves can be applied to regional studies to develop programs for forested areas. The proposed developments can be used to study issues related to the functioning of the regional market for non-timber forest products.

**Keywords:** forest resources, non-timber forest food resources, logging, berries, mushrooms, nuts, social use of forest  
**Funding.** This study was partially conducted within the frames of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project “Vegetation cover of the cryolithozone of taiga Yakutia: Biodiversity, environment-forming functions, protection and rational use” (theme number FWRS-2021-0023; state registration number: AAAA-21-121012190038-0), and with the use of equipment of the Core Shared Research Facility of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the SB RAS” (grant number 13.CSRF.21.0016).

**For citation:** Samsonova I.V., Isaev A.P. Non-timber forest products as essential elements of the forest resource in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):451–463. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-451-463>

## Введение

Республика Саха (Якутия) (РС(Я) – самый крупный по территории субъект Российской Федерации, относящийся к Дальневосточному федеральному округу. Площадь региона составляет 3 083 523 км<sup>2</sup> (308352,3 тыс. га). Леса занимают большую часть территории региона. В зональном отношении леса расположены в четырех природных зонах: таежных лесов (примерно 80 % площади), тундры, лесотундры и арктической пустыни [14, 21].

Общая площадь земель, занятых лесами, на территории республики по состоянию на 01 января 2018 г. составила 256 106,4 тыс. га, или 83 % от общей площади субъекта.

Леса выполняют хозяйственную, социальную и экологическую функции. Недревесные пищевые ресурсы леса (дикоросы), получившие признание в фармацевтической, косметической и пищевой промышленности, пользуются спросом населения в России и за рубежом.

## Методы и материалы исследования

Для выявления воздействия институциональных факторов на развитие природно-ресурсных отраслей использован экономико-статистический анализ изменения показателей развития сбора и заготовки недревесных пищевых ресурсов леса, что позволяет выявить происходящие в них изменения.

Методологической основой исследования являются системный подход к выявлению объективной взаимосвязи и взаимовлияния биологических, экономических и институциональных основ

использования недревесной пищевой продукции леса в современных условиях рынка.

Информационной базой исследования явились данные Федеральной службы государственной статистики РФ, территориального органа Федеральной службы государственной статистики по РС (Я), разработок научно-исследовательских институтов, связанных с использованием недревесных пищевых ресурсов леса, данных ряда предприятий, осуществляющих заготовку и переработку пищевых ресурсов леса, базы данных региональной государственной информационной системы «Природопользование и охрана окружающей среды» и открытого портала «Экологический паспорт Республики Саха (Якутия)», имеющиеся в открытом доступе данные государственного лесного реестра и Лесного плана РС(Я) (2009, 2013, 2019 гг.) Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства РС (Я), данные бухгалтерского учета Министерства сельского хозяйства РС (Я), а также ресурсы сети Internet.

Для оценки ситуации по сбору и заготовке недревесных пищевых лесных ресурсов и их реализации на местных рынках был проведен опрос жителей Алданского, Нерюнгринского, Олекминского, Момского и др. районов республики. В опросную анкету входили следующие вопросы: вид собираемых и заготавливаемых недревесных пищевых ресурсов леса (кедровый орех, грибы, ягоды, лекарственные растения и др.); цель, причины сбора и заготовки; мнение респондента по организации заготовительных и перерабатывающих пунктов, созданию специализированного магазина по продаже недревесных

пищевых ресурсов леса; предложения по государственной поддержке местного населения по сбору, заготовке и переработке доступных и законодательно разрешенных недревесных пищевых лесных ресурсов. Анкетирование (опрос) населения имело следующие цели: установить социальные группы, которые занимаются сбором дикорастущей продукции; выявить основные виды недревесных пищевых ресурсов леса, заготавливаемые местным населением; определить причины их сбора и заготовки; узнать мнение местного населения об улучшении сбыта и реализации собранной дикорастущей пищевой продукции леса.

### Результаты исследования

К пищевым лесным ресурсам, заготовка которых осуществляется в соответствии с ЛК РФ, относятся дикорастущие плоды, ягоды, орехи, грибы, семена, березовый сок и подобные лесные ресурсы [13].

В лесах России произрастает большое разнообразие различных видов недревесных пищевых лесных ресурсов и лекарственных растений. По данным Федерального агентства лесного хозяйства, эксплуатационные запасы самых распространенных из них составляют, 7,4 млн т, а биологические запасы – 13,4 млн т. Недревесные пищевые лесные ресурсы имеют важное социальное и экономическое значение, широко используются населением, а во многих субъектах Российской Федерации являются важным источником средств существования сельского населения. Несмотря на большое эколого-экономическое и социальное значение недревесных пищевых ресурсов леса, уровень их освоения остается на низком уровне.

По данным сотрудников ИБПК СО РАН, анализировавших хозяйственную ценность флоры и микобиоты Якутии, список пищевых растений Якутии включает 237 видов [10, 17, 29–36].

**Плодово-ягодные ресурсы.** В Республике Саха (Якутия) в настоящее время насчитывается 59 видов ягодных растений [19], представленных 28 родами и 13 семействами (табл. 1). Из них 18 видов ягодных растений признаны несъедобными или ядовитыми, в том числе виды родов *Juniperus* (2 вида за исключением м. обыкновенного), *Paris* (2 вида), *Polygonatum* (2 вида), *Smilacina* (2 вида), *Streptopus* (2 вида), *Arctous* (2 вида), *Sambucus* (2 вида), а также *Maianthemum bifolium*, *Actea erythrocarpa*, *Swida alba*, *Solanum kitagawae*. Таким образом, к ягодным растениям

Якутии, имеющим определенное пищевое значение, относится 41 вид, принадлежащий 17 родам 7 семейств: Cupressaceae, Ephedraceae, Grossulariaceae, Rosaceae, Empetraceae, Caprifoliaceae, Ericaceae. Интерес в пищевом отношении представляют многолетние травы – земляника (*Fragaria orientalis* и *Fr. viridis*), морошка (*Rubus chamaemorus*); полукустарнички – княженика (*R. arcticus*), костяника (*R. saxatilis*, *R. humulifolius*); кустарнички – брусника (*Vaccinium vitis-idaea*), голубика (*V. uliginosum*), черника (*V. myrtillus*), клюква (*Oxycoccus microcarpus*, *O. palustris*), шикша (*Empetrum nigrum*), толокнянка (*Arctostaphylos uva-ursi*); кустарники – 8 видов смородин (*Ribes*), малина (*Rubus sahalinensis*), жимолости (*Lonicera edulis*, *L. altaica*, *L. pallasii*) и 5 видов шиповников (*Rosa*); деревья – боярышник (*Crataegus dahurica*, *Cr. sanguinea*), рябина (*Sorbus sibirica*), черемуха (*Padus asiatica*) и др. Брусника, голубика, смородины, земляника, морошка, черника и шиповники по обилию и вкусовым качествам являются признанными и широко используемыми ягодными пищевыми растениями.

**Орехоплодные ресурсы.** Из орехоплодных деревьев в республике растут кедр сибирский (*Pinus sibirica* Du Tour) и кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). Кедр сибирский произрастает в Юго-Западной Якутии, а кедровый стланик распространен в горах Восточной и Южной Якутии, реже на тукуланах Центральной Якутии. Сибирский кедр и кедровый стланик произрастают на площади 396,1 тыс. га [9]. Особо ценным является кедр сибирский. Кедровые орехи – уникальный пищевой продукт и основа существования многих животных, они используются главным образом в свежем виде.

Общая площадь зарослей кедрового стланика на территории Якутии равна 7614,2 тыс. га [27]. Урожай ореха в нем повторяется через 2–4 года. Средний биологический урожай орехов – около 10 кг/га, в урожайные годы в густых зарослях может достигать 100 кг и более [30].

На экспертном уровне оценены биологический и эксплуатационный запасы основных видов ягодных и орехоплодных растений Якутии [8, 35], эти сведения приведены в табл. 2.

**Съедобные грибы.** В Республике Саха (Якутия), по рекогносцировочным данным, произрастает более 900 видов грибов [31]. Всего на территории России более 90 видов признаны съедобными и разрешены к заготовке [21]. В [31] при-

## Состав флоры ягодных растений Якутии

Table 1

## Composition of the berry plant flora in Yakutia

Семейство Families	Род Genera	Количество Quantity		
		родов в семействе genera in the family	видов в семействе species in the family	видов в роде species in genera
Кипарисовые – Cupressaceae Gray.	Можжевельник – <i>Juniperus</i> L.*	1	3	3
Эфедровые – Ephedraceae Dumort.	Эфедра – <i>Ephedra</i> L.	2	2	2
Триллиевые – Trilliaceae Chevall.	Вороний глаз – <i>Paris</i> L.*	1	2	2
Ландышевые – Covallariaceae Horan.	Купена – <i>Polygonatum</i> Mill.*	4	7	2
	Майник – <i>Maianthemum</i> Wigg.*			1
	Смилицина – <i>Smilacina</i> Desf.*			2
	Стрептопус – <i>Streptopus</i> L.*			2
Лютиковые – Ranunculaceae Juss.	Воронец – <i>Actaea</i> L.*	1	1	1
Крыжовниковые – Crossulariaceae DC.	Смородина – <i>Ribes</i> L.	1	8	8
Розовые – Rosaceae Juss.	Кизильник – <i>Cotoneaster</i> Medicus	8	18	1
	Рябина – <i>Sorbus</i> L.			1
	Рябинокизильник – <i>Sorbocotoneaster</i> Pojark.			1
	Боярышник – <i>Crataegus</i> L.			2
	Земляника – <i>Fragaria</i> L.			2
	Рубус – <i>Rubus</i> L.			5
	Шиповник – <i>Rosa</i> L.			5
	Черемуха – <i>Padus</i> Mill.			1
Кизилые – Cornaceae Dumort.	Свидина – <i>Swida</i> Opiz*	1	1	1
Шикшевые – Empetraceae Hook. et Lindl.	Шикша – <i>Empetrum</i> L.	1	1	1
Вересковые – Ericaceae Juss.	Арктоус – <i>Arctous</i> (A. Gray.) Niedenzu*	4	10	2
	Брусника (голубика, черника) – <i>Vaccinium</i> L.			5
	Клюква – <i>Oxycoccus</i> Hill			2
	Толокнянка – <i>Arctostaphylos</i> Adanson			1
Пасленовые – Solanaceae Juss.	Паслен – <i>Solanum</i> L.*	1	1	1
Жимолостные – Caprifoliaceae Juss.	Жимолость – <i>Lonicera</i> L.	1	3	3
Бузиновые – Sambucaceae Batsch ex Borkh.	Бузина – <i>Sambucus</i> L.*	1	2	2
Итого		28	59	59

\* Имеются ядовитые виды / Poisonous species.

**Оценочные данные о биологическом запасе и эксплуатационных ресурсах основных видов ягодных и орехоплодных растений Якутии****Estimated data on biological stock and exploitation resources of the main species of berry and nut crops in Yakutia**

Вид растения Type of plant	Вид ресурса Type of resource	Общий биологический запас, т Total biological stock, t	Общий эксплуатационный запас, т Total operating stock, t
Брусника	Ягоды	23609,7	12597,9
Шиповник (все виды)	Ягоды	882,9	695,7
Смородина (все виды)	Ягоды	202,3	168,3
Морошка	Ягоды	434,1	347,2
Голубика	Ягоды	40385,0	21996,0
Клюква	Ягоды	213,9	95,4
Кедровый стланик	Орехи	10182,9	3394,3
Кедр сибирский	Орехи	153,0	52,0
Черника	Ягоды	17,1	3,4

водится описание 54 видов съедобных грибов. Одиннадцать видов грибов занесены в Красную книгу РС (Я) [33], около сорока видов грибов используются в народной медицине, в официальной медицине используют три вида грибов — чагу, листовенничную губку и спорынью [25].

Реформы 90-х годов XX в. социально-политической и экономической системы страны косвенным образом повлияли на уровень потребления недревесных пищевых ресурсов леса из-за сокращения государственных объемов заготовок и их переработки. В период 1970–1990 гг. в РСФСР была создана и функционировала сеть потребительских, кооперативных и государственных промысловых хозяйств с соответствующей материально-технической базой, которые осваивали недревесные пищевые ресурсы леса. Заготавливаемая и производимая ими продукция была представлена широким ассортиментом и пользовалась спросом у потребителей. Но с началом рыночных реформ финансовое положение большинства предприятий и организаций сильно ухудшилось, что привело к закрытию большей части заготовительных контор, цехов переработки сырья, сокращению рабочих мест и в итоге – к снижению объемов заготовок и переработки этого вида ресурса леса.

В настоящее время в РС (Я) инфраструктура заготовки недревесных пищевых ресурсов леса

имеется у 11 сельскохозяйственных организаций в восьми районах. В этих организациях имеется оборудование для переработки дикорастущих ягод, производственная мощность которых составляет 300 л в смену. Основными видами производимой продукции дикорастущих ягод являются сиропы, варенье, джемы, морсы. Средний объем производства плодоовощных консервов составляет более 497 тыс. усл. банок.

Основная часть заготовки дикорастущих ягод осуществляется в Амгинском, Вилюйском, Сунтарском, Хангаласском районах, г. Якутск, что обусловлено наличием рынков сбыта и развитой транспортной инфраструктурой.

В республике закуп дикорастущих ягод, по данным Министерства сельского хозяйства РС (Я), в основном осуществляется у хозяйств населения – 66,4 %, у сельскохозяйственных организаций – 27 %, остальная часть приходится на крестьянские (фермерские) хозяйства – 6,7 % (рис. 1).

Заготовка дикорастущих ягод вариативна, но при этом имеется устойчивый тренд на ее уменьшение. Это обусловлено следующими причинами: отсутствие оборотных средств у сельскохозяйственных организаций для закупа сырья; ограниченность материально-технических ресурсов для заготовки и переработки дикорастущих ягод.

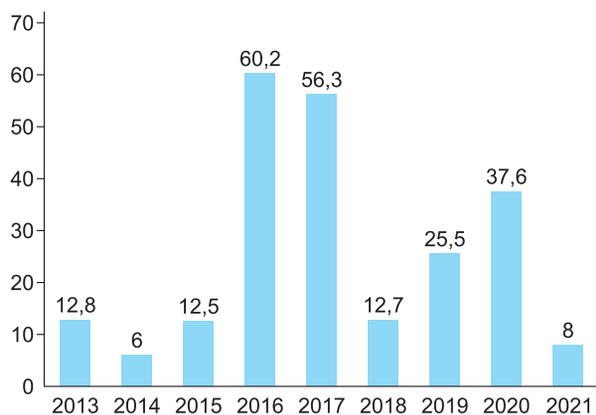


Рис. 1. Динамика заготовки дикорастущих ягод (тонн)\*

Fig. 1. Dynamics of harvesting of wild berries (tons)

\* По первичным данным Министерства сельского хозяйства РС(Я) / According to the primary data by the Ministry of Agriculture of the Republic of Sakha (Yakutia)

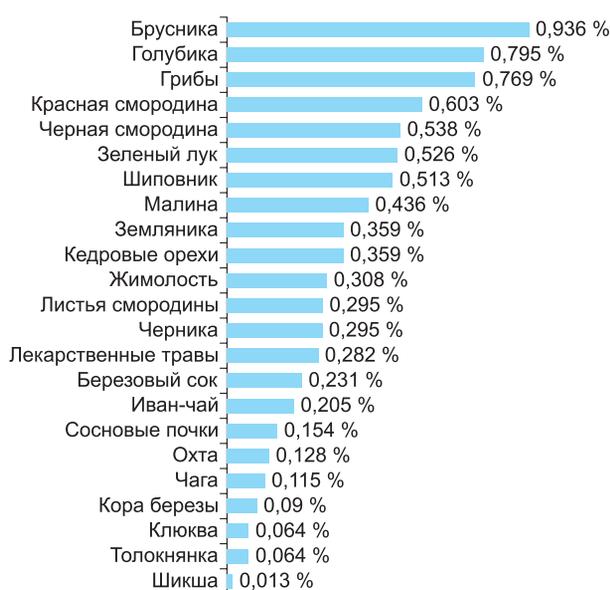


Рис. 2. Доля видов растительных ресурсов леса, собираемых населением РС(Я) (данные социологического опроса)

Fig. 2. Proportion of plant species of forest resources harvested by the population in the Republic of Sakha (Yakutia): data from a sociological survey.

низкая привлекательность заготовки и переработки дикорастущих ягод для привлечения кредитных ресурсов и других источников долгосрочного и краткосрочного финансирования;

значительная удаленность от центров потребления и переработки дикорастущих ягод;

труднодоступность территорий заготовки дикорастущих ягод.

Для исследования сбора и заготовки недревесных пищевых ресурсов леса в 2020–2021 гг. было проведено социологическое исследование путем прямого анкетирования населения, проживающего в различных муниципальных образованиях республики. Выборочная совокупность исследования составила 120 респондентов. Более 91,5 % респондентов проживали в сельской местности, это села Куду-Кюель, Тяня, Бясь-Кюель в Олекминском районе, Иенгра в Нерюнгринском районе, село Хатыстыр в Алданском районе. Остальные 8,5 % респондентов были опрошены в городах Олекминск, Алдан, Нерюнгри, Томмот, также сюда входили продавцы дикоросов, реализующие дикоросы через сервис объявлений и на продовольственном рынке г. Якутск.

Опрос позволил увидеть степень распространенности и традиционную практику собирательства населением в республике и помог оценить значение этого вида экономической деятельности и ее специфику.

Главными видами собираемой и заготавливаемой населением недревесной пищевой продукции леса являются ягоды – брусника, голубика, черная и красная смородина, морошка, реже – шиповник, малина, земляника, жимолость, морошка, грибы, зеленый лук, лекарственные травы. Сбор ягод населением республики сильно различается территориально – на северо-востоке республики (Черский, Среднеколымск, Чокурдах, Абый и т. д.) массово плодоносит морошка, и население ее активно собирает в больших объемах. В рационе северян морошка довольно обычная ягода, в центральной Якутии (Амгинский, Мегино-Кангаласский, Таттинский и др. районы) – красная и черная смородина, земляника, брусника, в юго-западной (Олекминский, Ленский) – красная и черная смородина, голубика, жимолость, земляника, брусника и реже черника.

Более 60,8 % сборщиков дикоросов ответили, что каждый год собирают ягоды, грибы и другие дикоросы в одних и тех же местах. Остальные 39,2 % респондентов каждый год меняли место и собирали в разных местах.

Сбором ягод большинство респондентов занималось в 20–30 км от населенного пункта, где они проживали. Далеко от населенного пункта, примерно в 40–50 км собирали ягоды 15,7 % опрошенных респондентов. В целом ягодные места независимо от дальности у 60 % сборщиков ягод были постоянными, и каждый год они старались собирать ягоды в одних и тех же местах.

Грибы почти 70 % жителей Якутии предпочитали собирать рядом с населенным пунктом. В 20–30 км от дома грибы собирали 28,6 % респондентов. Грибные места для 72,2 % респондентов были постоянными, только 27,8 % каждый год собирали грибы в разных местах.

Значительное большинство опрошенных (96 %) собирают и заготавливают дикоросы для собственных нужд. 41,3 % дарили часть собранных дикоросов своим родственникам и знакомым. Почти каждый пятый респондент продавал собранные дикоросы, из них 2,7 % занимались сбором дикоросов только на продажу, а остальные продавали излишки. 8 % респондентов ответили, что излишки ягод и грибов обменивают на другие продукты, товары и услуги. Чаще всего обменивались на другие виды ягод либо на продукты питания (28,6 %), мясо (23,8), рыбу (9,5), услуги (9,5 %).

Чем больше человек в семье, тем больше ягод собирали респонденты. Так, 33,3 % респондентов, семьи которых состояли из 7 человек и более, за сезон собирали более 7 ведер брусники. 64 % респондентов-одиночек и с семьями из 2–3 человек за сезон обычно собирали одно или два ведра брусники. Большие объемы ягод и грибов собирали семьи с детьми. Чем больше было детей в семье, тем больше старались собрать респонденты. Так 24,9 % многодетных семей запасались на зиму более 7 ведер брусники, тогда как бездетные или семьи с 1–2 детьми в основном собирали 1–2 ведра брусники.

На вопрос «Насколько важным источником питания или дополнительного дохода для вашей семьи является сбор дикоросов (ягод, грибов, орехов и лекарственных трав)?» положительный коэффициент значимости был получен только по ягодам, т. е. для большинства респондентов ягоды как источник питания и дополнительного дохода являлись важными и значимыми. Каждый четвертый респондент ответил, что сбор ягод имеет очень высокую важность для его семьи, а 45,6 % респондентов оценили значимость собираемых ягод как среднюю. Остальные виды дикоросов были оценены большинством респондентов как не важные источники питания или дополнительного дохода.

Наиболее высокую важность сбора ягод, орехов и грибов в опросе отметили женщины (27,3 %), возрастная группа от 51 до 60 лет (33,3), коренные малочисленные народы Севера (30,8), большие семьи с 5 и более членами (40 %), семьи с

детьми (28,8), неработающие пенсионеры и инвалиды (100), респонденты с низкими доходами (38,5 %). Низкую важность сбора дикоросов как источника питания или дополнительного дохода для семьи отмечали в основном мужчины, молодежь в возрасте от 18 до 30 лет, одинокие респонденты, бездетные.

Коэффициент важности сбора дикоросов в исследовании составил 1, что показывает их высокую значимость для населения, его жизнеобеспечения, питания, повышения уровня жизни.

По оценкам жителей Южной Якутии, за последние 5 лет в целом по всем видам ягод происходит уменьшение урожайности. Почти каждый второй респондент отметил уменьшение урожайности брусники и голубики (48,1 и 46,8 % соответственно).

По мнению 91,9 % респондентов, больше всего на урожайность ягод влияют погода и климатические условия. На втором месте респонденты поставили влияние лесных пожаров (48,6 %). Почти 46 % респондентов отметили сильное влияние строительства промышленных объектов на территории Южной Якутии (дорог, карьеров и т. д.). Менее всего, по мнению респондентов, на урожайность дикоросов влияли животные и насекомые.

Почти все респонденты считают, что организация заготовительных пунктов, как временных (на конкретный период), так и постоянных, является очень востребованной. Респонденты предлагают организовать приемные пункты для заготавливаемой ими продукции (несмотря на то что на рынке ее можно продать подороже), так как спрос на продукцию сезонен, а затраты времени на продажу очень значительны.

По экспертным оценкам, от использования недревесных пищевых ресурсов леса можно получать ежегодно в доход государства прибыль в размере, эквивалентном полным затратам на ведение лесного хозяйства и даже на развитие всего лесного сектора экономики. Вовлечение богатейших недревесных пищевых ресурсов леса в промышленную эксплуатацию – одна из задач лесного комплекса России и Республики Саха (Якутия) в частности.

В целях всестороннего исследования перспектив развития регионального рынка недревесных пищевых ресурсов леса выполнен прогноз объемов заготовок распространенных дикоросов (грибов, ягод и орехов) и объемов потребности в них населения в будущем.

В современных условиях хозяйствования для выработки экономической политики и принятия управленческих решений в республике в области лесного хозяйства, развития побочного лесопользования необходимо опираться на достигнутый объем заготовок и уровень потребности в недревесных пищевых ресурсах леса, так как объем и ассортимент их заготовок напрямую зависят от спроса на данную продукцию, что и будет формировать стратегию организации заготовок.

В качестве временных рядов были использованы статистические наблюдения заготовок по одному виду пищевых ресурсов леса по РС (Я) – ягоды за период 2013–2021 гг. Так как во временных рядах заготовок ягод между показателями временного ряда наблюдаются зависимости, т. е. значения последующих лет являются зависимыми от значений предыдущих лет, то для выявления зависимости между показателями выборки или опровержения этой гипотезы был использован метод автокорреляционного анализа.

В результате применения экстраполяции данных и автокорреляционного анализа получен прогноз объемов заготовок ягод в РС (Я) (рис. 3). Авторегрессионная модель прогноза объемов заготовок ягод в республике имеет вид

$$y = -0,4083x^2 + 5,0666x + 12,887 \quad R^2 = 0,3983.$$

Таким образом, в ходе исследования временных рядов объемов заготовки ягод в РС (Я) и потребности населения в данных ресурсах в краткосрочной перспективе предполагается снижение этих показателей, при этом потребности населения в этих ресурсах превышают объемы их возможных заготовок.

Следует отметить, что на территории республики не проводятся маркетинговые исследования рынка недревесной пищевой продукции леса по видам и не ведутся постоянные статистические наблюдения в сфере заготовок и потребления грибов, ягод и орехов населением республики.

На основе проведенного социологического исследования были выявлены среднегодовые объемы потребления дикоросов сельским населением республики – ягод 15,2 кг/чел., грибов 4,9 кг/чел., кедровые орехи 3,0 кг/чел. Прогноз данного элемента рынка осуществлен на основе фактического среднегодового уровня потребления на душу населения с учетом прироста его численности.

Прогноз потребности городского населения в грибах, ягодах и орехах осуществлен исходя из рекомендуемой медицинской нормы потребления [20] этих ресурсов.

Прогноз спроса (потребности) в ягодах и грибах – основных видов пищевых ресурсах леса

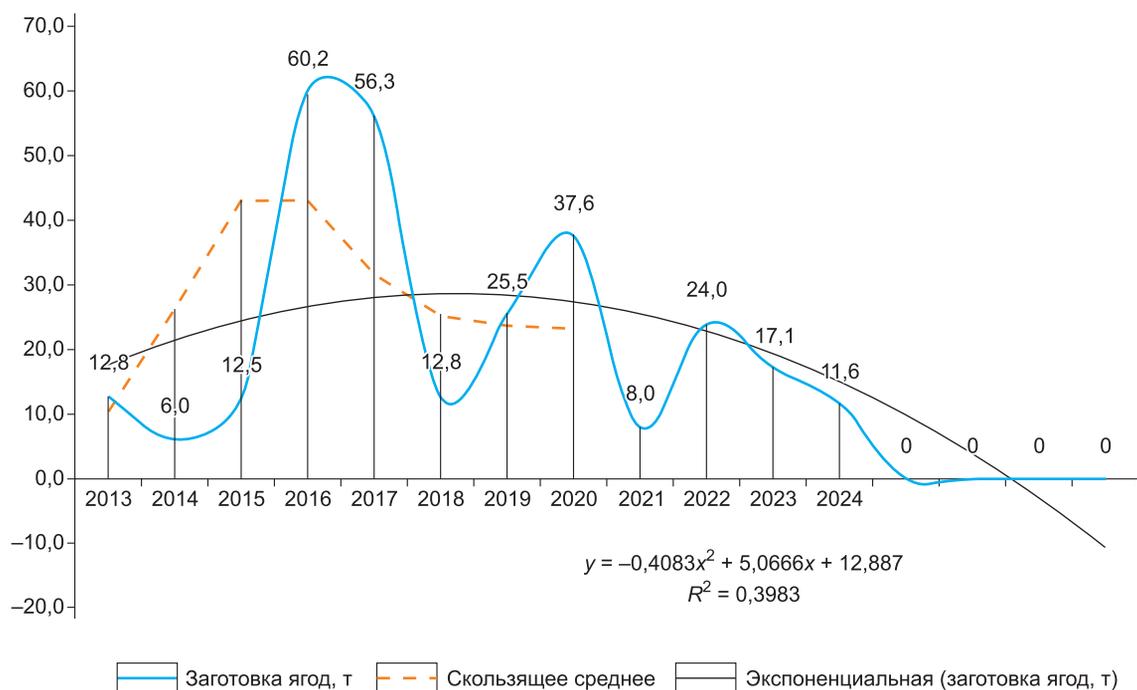


Рис. 3. Авторегрессионная модель прогноза объемов заготовок ягод в РС(Я)

Fig. 3. Autoregressive model of berry production forecast in the Republic of Sakha (Yakutia)

**Потребность населения РС(Я) в пищевых ресурсах леса, т**

Table 3

Год Year	Население* Population	Потребность по видам пищевых ресурсов Demand by type of food resources	
		Ягоды Berries	Грибы Mushrooms
	Всего		
2023	996243	9656	2934
2024	997833	9984	2943
	Городское население		
2023	668840	4679	1330
2024	668425	4677	1329
	Сельское население		
2023	327403	4977	1604
2024	329408	5007	1614

\* <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=yabrowser%3A%2F%>

осуществлен на краткосрочную перспективу и данных темпа прироста населения (табл. 3).

В этой связи для увеличения объемов заготовок ягод и грибов необходимо развивать деятельность по заготовке и переработке пищевых ресурсов леса посредством организации эффективной сети заготовительных и приемных пунктов. Кроме того, создание сети заготовительных и приемных пунктов в республике позволит расширить сырьевые зоны для организации переработки, увеличить доходы населения, осуществляющего заготовительную деятельность, и снизить социальную напряженность в сельской местности.

Актуальность создания разветвленной сети данных пунктов в республике обусловлена объективной ситуацией в сфере заготовок и переработки недревесных пищевых ресурсов леса. Так, в республике сконцентрированы значительные биологические и эксплуатационные запасы недревесной пищевой продукции леса, при этом только 11 сельскохозяйственных организаций занимаются заготовкой и переработкой этой продукции, причем не постоянно. Объемы заготовок недревесных пищевых ресурсов леса этих организаций незначительны по сравнению с объемами заготовок при существовавшей ранее системе заготовок. Кроме того, данные сельскохозяйственные организации из-за финансового положения не в

состоянии оказывать поддержку основной категории заготовителей — населению при решении ряда проблем, связанных с заготовительной деятельностью и реализацией собранной продукции.

Наряду с экономическим аспектом, формирование эффективной заготовительной сети в республике имеет и социальный аспект. Реформирование экономики стало причиной разрушения лесодобывающей промышленности и предприятий сельского хозяйства в республике, что вызвало рост безработицы, снижение доходов не только слабо защищенных слоев населения, но и в целом сельского населения. В этой связи формирование сети заготовительных и приемных пунктов данной продукции на территории республики позволит не только увеличить эффективность функционирования сельскохозяйственных организаций, занимающихся заготовкой и переработкой различных видов продукции, но и решить такие социальные проблемы, как повышение доходов сельского населения и уровня жизни, а также более полное удовлетворение спроса населения республики в недревесных пищевых ресурсах леса.

### Заключение

Состояние ресурсов дикорастущих растений и грибов в Республике Саха (Якутия) довольно стабильно. Большая часть грибов ягод и орехов

остается у сборщиков для личного потребления и продажи на продовольственных рынках, особенно широко практикуемой в последние годы.

В настоящее время специализированных предприятий по заготовкам недревесной пищевой продукции леса нет. Различные предприятия малого бизнеса и сельскохозяйственные организации заготавливают продукцию не систематически и в небольших количествах. Сбором грибов, ягод, орехов и другой побочной продукции леса занимается преимущественно неорганизованное население.

Республика Саха (Якутия) может стать еще одним общероссийским поставщиком ягод, кедрового ореха, грибов. Для этого необходима организация мониторинга недревесных пищевых ресурсов леса, который позволит отслеживать их состояние и при необходимости быстро отреагировать на истощение ресурсов и усиление эксплуатационного пресса введением ограничительных и охранных мер. Для разработки научно обоснованных принципов рационального использования ресурсов дикорастущих растений и грибов необходимо их дальнейшее изучение. Особое внимание следует уделить изучению сроков и особенностей восстановления популяций дикорастущих полезных растений при интенсивном сборе разных видов растительных ресурсов, а также антропогенных воздействиях и техногенных загрязнениях. С целью сохранения генофонда дикорастущих полезных растений для дальнейшего плантационного выращивания необходимы выявление высокопродуктивных зарослей и форм растений, имеющих хозяйственно важные признаки, изучение в природе и в условиях коллекции (коллекционного участка).

В настоящий момент рынок недревесных пищевых ресурсов в республике практически неуправляем, неуправляемо и бесконтрольно их использование, отчего страдают запасы, население, заготовительные организации, местные бюджеты. Ситуация требует разработки комплекса научно-методических подходов и рекомендаций для совершенствования управления и использования недревесных растительных ресурсов в системе хозяйственного комплекса региона.

Приоритетными задачами являются:

1. Усиление роли региональных органов правительства Республики Саха (Якутия) в государственном управлении использованием недревесных пищевых ресурсов леса.

2. Сбор и анализ статистических данных для информационного обеспечения управленческих

решений и мониторинга состояния недревесных пищевых ресурсов.

3. Изучение биологических свойств, показателей продуктивности, уточнение биологического и эксплуатационного запасов сырья отдельных наиболее перспективных видов растительных ресурсов в географическом (экономические зоны, административные районы), временном и экологическом (по типам растительности, формационному и типологическому составу растительного покрова) аспектах.

4. Разработка и совершенствование региональной нормативно-правовой базы регулирования использования недревесных пищевых ресурсов.

5. Стимулирование инвестиций в глубокую переработку недревесных пищевых ресурсов.

6. Развитие стандартизации и сертификации продукции, в том числе и в различных системах добровольной лесной сертификации.

#### Список литературы / References

1. Быковский В.К. *Использование лесов в Российской Федерации: правовое регулирование*. М.: WoltersKluwer; 2009. 220 с.

Bykovsky V.K. *The use of forests in the Russian Federation: Legal regulation*. Moscow: WoltersKluwer; 2009. 220 p. (In Russ.)

2. Васильева Л.Н., Шурдук И.Ф., Медведева Н.С. К изучению съедобных грибов Якутии. *Охрана природы Якутии*. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во; 1971: 105–110.

Vasilyeva L.N., Shurduk I.F., Medvedeva N.S. To the study of edible mushrooms in Yakutia. *Nature Conservation of Yakutia*. Irkutsk: East Siberian Book Publishing House; 1971:105–110. (In Russ.)

3. Вельм М.В. *Рынок пищевых ресурсов леса в Иркутской области: монография*. Иркутск: Байкальский государственный университет экономики и права; 2010. 180 с.

Velm M.V. *Market of forest food resources in the Irkutsk Region*. Irkutsk: Baykalsky State University of Economics and Law Publishing House; 2010. 180 p. (In Russ.)

4. Григорьев А. Ю. Как законопослушно собирать грибы и ягоды. *Лесная Россия. Лес и общество*. 2009;(1):35–39.

Grigoriev A. Yu. How to lawfully collect mushrooms and berries. *Lesnaya Rossiya. Les i obshchestvo*. 2009;(1):35–39. (In Russ.)

5. Дмитриева Т.Е., Максимов А.А. Организационно-экономические аспекты использования грибо-ягодных ресурсов республики Коми. *Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию ВНИИОЗ, 22–25 мая 2007 г. Киров*; 2007:118–119.

Dmitrieva T.E., Maximov A.A. Organizational and economic aspects of the use of mushroom-berry resources of the Komi Republic. *Recent problems of nature use, game biology and fur farming: Proceedings of International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, May 22–25, 2007*. Kirov; 2007:118–119. (In Russ.)

6. Заводовский А.Г. Биологическое разнообразие афиллофороидных грибов в лесных экосистемах на островах Водлозерского архипелага. *Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию ВНИИОЗ, 22–25 мая 2007 г. Киров; Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства*. 2007:159–160.

Zavodovsky A.G. Biological diversity of aphyllorhizoid fungi in forest ecosystems on the islands of Vodlozersky archipelago. *Recent problems of nature use, game biology and fur farming: Proceedings of International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, May 22–25, 2007*. Kirov; 2007:159–160. (In Russ.)

7. Измоленов А.Г. Бабуринов А.А., Далин И.В. Ресурсная и производственная оценка природных пищевых растений. *Экономическая оценка эффективности освоения недревесных биологических ресурсов суши Дальнего Востока: Сб. статей*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1981. 122 с.

Izmodenov A.G., Baburin A.A., Dalin I.V. Resource and production evaluation of natural food plants. *Economic evaluation of the development efficiency of non-timber biological resources of the Far East: Collection of articles*. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences; 1981. 122 p. (In Russ.)

8. Исаев А.П. Перспективы использования ягодных растений Якутии. *Роль ботанических садов в сохранении и обогащении природной и культурной флоры: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 20-летию Ботанического сада Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, г. Якутск, 12–16 июля 2021 г.* Якутск: Издательский дом СВФУ; 2021:146–148.

Isayev A.P. Prospects of using berry plants of Yakutia. *The role of botanical gardens in preservation and enrichment of natural and cultural flora: Proceedings of All-Russian conference with international participation, dedicated to 20<sup>th</sup> anniversary of the Botanical Garden of the North-Eastern federal university*. Yakutsk, July, 12–16, 2021. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2021, pp. 146–148. (In Russ.)

9. Исаев А.П., Кривошапкин К.К. Перспективы развития ботанического туризма в Якутии. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2017;59(3):5–11.

Isaev A.P., Krivoschapkin K.K. Perspectives for the development of botanical tourism in Yakutia. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2017;59(3):5–11. (In Russ.)

10. Конспект флоры Якутии. *Сосудистые растения*. Составители Л.В. Кузнецова, В.И. Захарова. Новосибирск: Наука; 2012. 265 с.

*The flora of Yakutia. Vascular plants*. L.V. Kuznetsova, V.I. Zakharova. Novosibirsk: Nauka; 2012. 265 p. (In Russ.)

11. Коробкова Т.С. Оценка ресурсных видов ягодных растений среднетаежной подзоны Якутии. *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) / Биологические науки*. 2017;11-1(44):22–25.

Korobkova T.S. The evaluation of the resource berry plants of moderate taiga subzone in Yakutia. *Eurasian Union of Scientists. / Biological Sciences*. 2017; 11-1(44):22–25. (In Russ.)

12. Красов О.И. *Комментарий к лесному кодексу Российской Федерации*. М.: Норма; 2007. 415 с.

Krasov O.I. *Commentary on the Forest Code of the Russian Federation*. Moscow: Norma; 2007. 415 p. (In Russ.)

13. Лесной кодекс Российской Федерации от 4.12.2006 № 200-ФЗ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/lesnoj-kodeks-rossijskoj-federacii-lk-rf>. (дата обращения: 05.05.2023)

Forest Code of the Russian Federation dt. 4.12.2006 No. 200-FZ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/lesnoj-kodeks-rossijskoj-federacii-lk-rf>. (accessed: 05.05.2023) (In Russ.)

14. Лесной план Республики Саха (Якутия) 2009, 2013, 2019 URL: <https://deples.sakha.gov.ru/lesnoj-plan-rsj> (accessed: 05.05.2023)

Forest Plan of the Republic of Sakha (Yakutia) 2009, 2013, 2019. URL: <https://deples.sakha.gov.ru/lesnoj-plan-rsj> (accessed: 05.05.2023) (In Russ.)

15. Малышев Л.И. Экология флористического богатства Северной Евразии. *Ботанический журнал*. 2003;88(8):28–36.

Malyshev L.I. Ecology of floristic abundance of Northern Eurasia. *Botanicheskiy Zhurnal*; 2003;88(8):28–36. (In Russ.)

16. Малышева М.С., Самсонова И.В. Основные направления развития рынка недревесных пищевых ресурсов леса в Республике Саха (Якутия). *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2022;(3-2): 224–234. URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=2120> (accessed: 05.05.2023)

17. Malysheva M.S., Samsonova I.V. The main directions of development of the market of non-timber forest food resources in the Republic of Sakha (Yakutia). *Journal of Altai academy of economics and law*. 2022;(3-2): 224–234. URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=2120> (accessed: 05.05.2023) (In Russ.)

18. Никитина Н.В. *Возобновление Pinus sibirica Di Tour на северо-восточной границе ареала (юго-западная Якутия)*. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск; 2005.

Nikitina N.V. *Renewal of Pinus sibirica Du Tour at the northeastern border of the range (southwestern Yakutia)*. Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Yakutsk; 2005. (In Russ.)

19. *Определитель высших сосудистых растений Якутии*. Новосибирск: Наука; 1974. 543 с.

*Identifier of higher vascular plants of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1974. 543 p. (In Russ.)

20. Приказ Рослесхоза от 05.12.2011 № 512 «Об утверждении Правил заготовки и сбора недревесных лесных ресурсов» (Зарегистрировано в Минюсте России 16.04.2012 № 23850). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_128501/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_128501/) (дата обращения: 05.05.2023)

Rosleshoz Order dt. 05.12.2011 No. 512 “On Approval of the Regulations for harvesting and gathering of non-timber forest resources” (registered by the Ministry of Justice of Russia, dt. 16.04.2012 No. 23850). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_128501/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_128501/) (accessed: 05.05.2023) (In Russ.)

21. Приказ здравоохранения Российской Федерации № 614 от 19.08.2016 (с изм. На 01.12.2020 г.) «Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям здорового питания». URL: <https://docs.cntd.ru/document/4203748781>

Ministry of Health of the Russian Federation: Order No. 614 dt. 19.08.2016 (amended on December 1, 2020) “On approval of Recommendations on rational norms of food consumption that meet modern requirements for a healthy diet”. URL: <https://docs.cntd.ru/document/4203748781> (In Russ.)

22. *Разнообразие растительного мира Якутии*. Новосибирск: Наука; 2005. 326 с.

*Diversity of the flora of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 326 p. (In Russ.)

23. Распоряжение Главы Республики Саха (Якутия) от 04 декабря 2019 г №700РГ- «Об утверждении Лесного плана Республики Саха (Якутия на период 2019-2028 гг.» (с изменениями и дополнениями). <https://base.garant.ru/73165174/>. (дата обращения: 05.05 2023)

Decree of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) No. 700RG dt. December 04, 2019 “On Approval of the Forest Plan of the Republic of Sakha (Yakutia) for 2019-2028” (amended and supplemented). <https://base.garant.ru/73165174/> (accessed: 05.05.2023) (In Russ.)

24. Симонова В.В., Самсонова И.В. «Неучтенная традиция»: собирательство как занятие и промысел у эвенков Южной Якутии. *Этнография*. 2022;4(18):56–83. [https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-4\(18\)-56-83](https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-4(18)-56-83)

Simonova V.V., Samsonova I.V. An “Overlooked Tradition”: Gathering as Occupation and Trade Among the Evenkis of South Yakutia. *Ethnografia*. 2022;4(18):56–83. [https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-4\(18\)-56-83](https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-4(18)-56-83). (In Russ.)

25. Санитарные правила по заготовке, переработке и продаже грибов. 1993. СП 2.3.4.009-93. Санитарные правила по заготовке, переработке и продаже

грибов (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 20.08.1993 № 10). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000122/>

Sanitary rules for harvesting, processing and sale of mushrooms. 1993. SP 2.3.4.009-93. Sanitary rules for harvesting, processing and selling mushrooms (approved by the Resolution of the State Committee for Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Russian Federation dt. 20.08.1993 No. 10). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200000122/>. (In Russ.)

26. Стандарт отрасли ОСТ 56-108-98 «Лесоводство. Термины и определения» (утв. приказом Рослесхоза от 3 декабря 1998 г. N 203. URL: <http://base.garant.ru/2157249/>.

Industry Standard OST 56-108-98 “Forestry. Terms and definitions” (approved by Order No. 203 of the Federal Forestry Agency, dt. December 3, 1998). URL: <http://base.garant.ru/2157249/>. (In Russ.)

27. Сухомиров Г.И. *Проблемы освоения недревесных растительных ресурсов*. Хабаровск: Наука; 2001. Sukhomirov G.I. *Problems of development of non-timber plant resources*. Khabarovsk: Nauka; 2001. (In Russ.)

28. Сухомиров Г.И. *Таежное природопользование на Дальнем Востоке России*. Хабаровск: Институт экономических исследований Дальневосточного отделения РАН; 2007. 384 с.

Sukhomirov G.I. *Taiga wildlife management in the Russian Far East*. Khabarovsk: Economic Research Institute of FEB RAS; 2007. 384 p. (In Russ.)

29. Сухомиров Г.И. Ресурсы дикорастущих растений и грибов Дальневосточного федерального округа и их освоение. *Использование и охрана природных ресурсов в России: научно-информационный и проблемно-аналитический бюллетень*. 2007;92(2):53–58.

Sukhomirov G.I. Resources of wild plants and mushrooms of the Far Eastern Federal District and their development. *Use and protection of natural resources of Russia*. 2007;92(2):53–58. (In Russ.)

30. Сухомиров Г.И. Использование недревесных растительных ресурсов Дальнего Востока. *Современное состояние недревесных растительных ресурсов России*. Киров: Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. Б.М. Житкова РАСХН; 2003:13–120.

Sukhomirov G.I. The use of non-timber plant resources of the Far East. In: *Modern state of non-timber plant resources of Russia*. Kirov; 2003:113–120. (In Russ.)

31. Угаров Г.С., Михалева Л.Г., Абрамов А.Ф., Попова М.Г. *Грибы Якутии*. Якутск: Бичик; 2009. 94 с.

Ugarov G.S., Mikhaleva L.G., Abramov A.F., Popova M.G. *Mushrooms of Yakutia*. Yakutsk: Bichik Publishing House; 2009. 94 p. (In Russ.)

32. *Флора Сибири*. Новосибирск: Наука; 1994; Т.7. 310 с.

*Flora of Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1994; Volume 7. 310 p. (In Russ.)

33. *Красная книга Республики Саха (Якутия)*. Т. 1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. М.: Реарт; 2017. 412 с.

*Red Book of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Volume 1: Rare and Endangered Species of Plants and Fungi. Moscow: Reart Publishing House; 2017. 412 p. (In Russ.)

34. *Определитель высших растений Якутии*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2020. 896 с.

*Identifier of Higher Plants of Yakutia*. Moscow: Association of Scientific Editions КМК; 2020. 896 p. (In Russ.)

35. *Система ведения сельского хозяйства в Республике Саха (Якутия) на период 2021–2025 годы*: методическое пособие. Владимиров Л.Н. (ред.) Белгород: Изд-во Сангалова К.Ю.; 2021. 592 с.

*System of farming in the Republic of Sakha (Yakutia) from 2021 to 2025*: study guide. Vladimirov L.N. (ed.) Belgorod: Sangalov Publishing House; 2021. 592 p. (In Russ.)

36. *Дар планете Земля: Особо охраняемые природные территории РС(Я)*. Якутск: Ураанхай; 2009. 406 с.

*A Gift to the Planet Earth: Specially Protected Natural Areas of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Yakutsk: Uraenhay; 2009. 406 p.

37. Narita D., Gavrilyeva T., Isaev A. Impacts and management of forest fires in the Republic of Sakha, Russia: A local perspective for a global problem. *Polar Science*; 27, March 2021; 100573. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100573>.

38. *The Far North: Plant biodiversity and Ecology of Yakutia*. Troeva E.I., Isaev A.P., Cherosov M.M., Karpov N.S. (eds.) Springer Science + Business Media B.V.; 2010. 390 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3774-9>

#### *Об авторах*

САМСОНОВА Ирина Валентиновна, доктор экономических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-9546-286X>, Scopus AuthorID: 57199501027, РИНЦ AuthorID: 220944, e-mail: IrSam@list.ru

ИСАЕВ Александр Петрович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, ResearcherID: E-9570-2016, Scopus AuthorID: 7101845572, РИНЦ AuthorID: 94855, e-mail: alex\_isaev@mail.ru

#### *About the authors*

SAMSONOVA, Irina Valentinovna, Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Chief Researcher, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9546-286X>, Scopus AuthorID: 57199501027, RISC AuthorID: 220944, e-mail: IrSam@list.ru

ISAEV, Alexandr Petrovich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Deputy Director for Research, <https://orcid.org/0000-0002-4488-0228>, ResearcherID: E-9570-2016, Scopus AuthorID: 7101845572, RISC AuthorID: 94855, e-mail: alex\_isaev@mail.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 10.06.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 17.07.2023*

*Принята к публикации / Accepted 28.07.2023*

Оригинальная статья

## Сведения по охотничьему использованию ресурсов водоплавающих птиц в Якутии

А. В. Солоха<sup>✉,1</sup>, Ю. Ю. Блохин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный университет народного хозяйства  
им. В.И. Вернадского, г. Балашиха, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральный научно-исследовательский центр развития охотничьего хозяйства,  
г. Москва, Российская Федерация

✉ [alex.solokha@gmail.com](mailto:alex.solokha@gmail.com)

### Аннотация

Научная информация по охотничьей добыче водоплавающих птиц в Якутии в значительной степени устарела. Недостаток надежных данных в условиях массовой охоты и изменившейся нормативно-правовой базы препятствует налаживанию рационального использования ресурсов водоплавающей дичи. Цель исследования состояла в получении и анализе современной информации о структуре и объемах охотничьего изъятия водоплавающих птиц в Якутии. Для количественной оценки добычи использованы материалы государственного охотхозяйственного реестра за 2017–2022 гг. Соотношение видов, или структуру охотничьей добычи, изучали по цифровым фотографиям отстрелянных птиц, собранным в сети Интернет за 2015, 2017 и 2018 гг. (около 1 тыс. снимков). Распространение и результативность традиционной весенней охоты на турпанов определяли с помощью анкетирования охотников, проведенного в 2015 г. За летне-осенний сезон в среднем добывали 18,4 тыс. гусей и 200 тыс. уток, за весенний сезон – 26,6 тыс. гусей и 160,5 тыс. уток. Среди отстрелянных водоплавающих птиц выявлено 23 вида: три вида гусей, 17 видов уток, лысуха, а также чернозобая гагара и серощекая поганка. Осенняя добыча представлена 22 видами, среди которых преобладали (в порядке убывания) гуменник, кряква, свиязь и чирок-свистунок. В весенней добыче определено 14 видов при доминировании гуменника, чирка-свистунка, шилохвости и кряквы. С учетом благополучного международного и национального статуса предложено рассмотреть возможность исключения из Красной книги РС(Я) и возобновления охотничьего использования черной кряквы, серой утки, синьги и лысухи.

**Ключевые слова:** охота, водоплавающая дичь, государственный охотхозяйственный реестр, структура добычи, Красная книга, Якутия

**Финансирование.** Исследование финансировалось в рамках государственных заданий Федерального научно-исследовательского центра развития охотничьего хозяйства Минприроды России на 2017–2019 гг.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Департаменту охотничьего хозяйства и ООПТ Минэкологии РС(Я) за содействие в проведении опроса по добыче турпанов и К.Ю. Гороховскому за участие в сборе и первичной обработке материалов. Также признательны директору Института биологических проблем криолитозоны СО РАН И.М. Охлопкову, высказавшему замечания и ценные советы в процессе подготовки рукописи.

**Для цитирования:** Солоха А.В., Блохин Ю.Ю. Сведения по охотничьему использованию ресурсов водоплавающих птиц в Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):464–476. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-464-476>

Original article

## Data on hunting use of waterfowl resources in Yakutia

A. V. Solokha<sup>✉,1</sup>, Yu. Yu. Blokhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vernadsky Russian State University of National Economy, Balashikha, Russian Federation

<sup>2</sup>Federal Scientific-Research Center of Development of Hunting Economy, Moscow, Russian Federation

✉ [alex.solokha@gmail.com](mailto:alex.solokha@gmail.com)

### Abstract

Scientific information on waterfowl harvesting in Yakutia is mostly outdated. The lack of reliable bag data prevents the establishment of sustainable use of waterfowl resources under the conditions of massive shooting and a modified

legislation base. This research aimed to collect and analyze contemporary information on the hunting take of waterfowl (Anatidae, Coot, loons, and grebes) in Yakutia. We used data from the State Hunting Registry (2017–2022) to estimate the total harvest. Species-specific shares in hunting bags were identified using digital photographs of shot birds collected from the Internet in 2015, 2017, and 2018 (around 1000 photos). The distribution and results of traditional spring hunting of scoters were studied through a survey of hunters conducted in 2015. On average, 18,400 geese and 200,000 ducks were shot during the summer-autumn season, whereas 26,600 geese and 160,500 ducks were shot during the spring season. Overall, 23 waterfowl species were identified, namely three species of geese, 17 species of ducks, Coot, Arctic Loon, and Red-necked Grebe. The autumn bag included 22 species, of which the bean goose, mallard, Eurasian wigeon, and common teal were the most abundant. Spring bags consisted of 14 species with prevailing bean geese, common teals, northern pintails, and mallards. Based on “least concern” international and national conservation status we suggest to exclude the Chinese Spot-billed Duck, Gadwall, Common Scoter and Coot from the Red Data Book of the Republic of Sakha (Yakutia) and resume their hunting use.

**Keywords:** hunting, waterfowl, State Hunting Registry, bag species composition, Red Data Book, Yakutia

**Funding.** This study was conducted within the state assignments for the Federal Scientific Research Center of Hunting Economy Development of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation from 2017 to 2019.

**Acknowledgements.** The authors thank the Hunting and Protection Areas Department of the Ministry of Environment of the Republic of Sakha (Yakutia) for assistance in conducting the survey on Scoter hunting and Kirill Gorokhovskiy for his participation in the collection and preliminary treatment of the materials. We are also grateful to Innokenty M. Okhlopkov, Director of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, who made comments and valuable advice in the process of preparing the manuscript.

**For citation:** Solokha A.V., Blokhin Yu.Yu. Data on hunting use of waterfowl resources in Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):464–476. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-464-476>

## Введение

Охота на водоплавающих птиц на территории Республики Саха (Якутия) (далее – РС(Я)) достаточно популярна и широко распространена. Так, по сведениям Минэкологии РС(Я), в последние годы выдается по 20–30 тыс. разрешений на добычу гусей и уток в весенний и осенний сезоны. Помимо спортивно-любительского направления, охота на водоплавающих птиц занимает важное место в традиционном укладе жизни коренных малочисленных народов Крайнего Севера, проживающих на территории республики [1]. Несмотря на длительный период проведения орнитологических исследований, научная информация по использованию водоплавающей дичи в Якутии содержится лишь в немногих работах прошлых десятилетий [2–9]. Эти материалы свидетельствовали о локальном снижении численности и объемов добычи водоплавающих птиц. Среди наиболее важных причин этого называли неумеренную охоту на зимовках в Китае, промысел гусей и уток на местах гнездования и линьки в Якутии в период до 1961 г. (после чего заготовки прекратили), неконтролируемую любительскую охоту, особенно в весенний период, браконьерство, хозяйственную деятельность и другие. В результате многие охотничьи виды (и подвиды) гусей и уток, обитающие на территории республики, были зане-

сены в красные книги России и Якутии. Также в разное время вводили ограничения по срокам весенней охоты, запрещали охотничье использование некоторых видов и групп (гусей, гаг) водоплавающей дичи. После прекращения массового промысла водоплавающих птиц в республике долгое время не проводился учет добычи этой пернатой дичи [6, 10–13]. В дальнейшем, с введением в действие федеральных законов «О животном мире» (1995), «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (2009), а также ряда приказов Минприроды России, оценка объемов изъятия водоплавающей дичи отнесена к полномочиям субъектов РФ в рамках ведения Государственного охотхозяйственного реестра (далее – ГОХР). Тем не менее, без научной экспертизы эта информация не всегда надежна, а доступ к ней ограничен. Так, в ежегодных Государственных докладах о состоянии и охране окружающей среды РС(Я) данные по использованию водоплавающей дичи отсутствуют.

В настоящее время режим охоты в Якутии определяется федеральными Правилами охоты (Приказ Минприроды России от 24 июля 2020 г. № 477 «Об утверждении Правил охоты»), с учетом региональных особенностей, установленных Указом Главы Республики Саха (Якутия) от

1 апреля 2021 г. № 1786 «Об определении видов разрешенной охоты и сроков осуществления охоты в охотничьих угодьях Республики Саха (Якутия)» и Указом Главы РС(Я) от 06.08.2021 № 2010 «Об установлении ограничений охоты в охотничьих угодьях Республики Саха (Якутия)».

Летне-осенний сезон начинается с третьей субботы августа и завершается с отлетом птиц. Весной охота на гусей и самцов уток (селезней) открывается дифференцированно по группам улусов (районов) на срок до 10 дней в каждом из них. Общий срок весенней охоты по всей республике – с 14 мая по 12 июня. Кроме того, охота на селезней с использованием живых подсадных (манных) уток, начиная с 2021 г., открывается на 30 дней в сроки с 21 апреля по 23 мая (в 2022 г.). Отдельно установлены дополнительные дни в конце мая–начале июня для традиционной охоты на турпанов.

Цель нашего исследования состояла в получении и анализе современной информации об охотничьем изъятии водоплавающих птиц в Якутии. Задачи включали обработку ведомственных статистических данных, определение состава добываемых птиц по фотографиям, расчет объемов добычи на видовом уровне, выявление распространения и успешности традиционной весенней охоты на турпанов, подготовку рекомендаций по возобновлению охотничьего использования отдельных видов.

### Материалы и методы исследования

Для оценки объемов добычи водоплавающих птиц использованы материалы ГОХР – единственного источника подобной статистической информации в России. Материалы ГОХР формируются уполномоченными органами регионов на основе сведений, содержащихся в разрешениях на добычу дичи, которые охотники получают до начала охоты и обязаны сдать заполненными после окончания охотничьего сезона. При этом сам процесс заполнения разрешений практически не контролируется, в связи с чем сведения о результатах охоты могут содержать неточности и ошибки как по количеству, так и по видовой принадлежности добытых птиц. Тем не менее, при условии экспертной проверки и соответствующей корректировки специалистами, эти данные могут использоваться для оценки охотничьего изъятия птиц в масштабах регионов [14–19].

Материалы ГОХР, ежегодно предоставляемые в Минприроды России до 15 сентября, формируются по итогам всего охотничьего года, который начинается 1 августа и завершается 31 июля следующего года. Сведения по пернатой дичи отражены в формах 4.3 (количество выданных и возвращенных разрешений и добытых птиц отдельных видов за осенний и весенний сезоны охоты) и 4.4 (та же информация, но для групп неопределенных видов, таких как «гуси» и «утки»).

По нашему опыту, видовые показатели в наименьшей, а групповые – в наибольшей степени соответствуют реальным объемам добычи. Поэтому мы суммировали все сведения из форм 4.3 и 4.4 по уткам и гусям (определенным до вида и неопределенным) для получения сводных показателей добычи этих групп видов по сезонам. Далее показатели добычи увеличивались на то количество дичи, которое, вероятно, было отстреляно по невозвращенным разрешениям, предварительно высчитав среднюю добычу птиц на одно разрешение.

Соотношение видов, или структуру охотничьей добычи, определяли по цифровым фотографиям в соответствии с ранее разработанной методикой [20, 21]. Фотоматериалы, найденные в соцсетях («ВКонтакте» и др.), тщательно проверяли на их соответствие территории Якутии и сезонам охоты. Всего собрано около 1 тыс. фотографий, относящихся к 2015, 2017 и 2018 годам. По снимкам, увеличенным на мониторе компьютера, устанавливали видовую принадлежность и пол, а в отдельных случаях – и возраст особей. Использовали справочники и определители птиц В.К. Рябицева [22], J.V. Mouronval [23], K. Mullarney et al. [24] и другие. Однако качество цифровых изображений, скопированных из Интернета, не всегда позволяло устанавливать пол и возраст птиц, отстрелянных осенью.

В 2015 г. организовано анкетирование охотников по весенней добыче турпанов. Сбор сведений проводили на добровольной основе аналогично работам по методике анкетирования по добыче селезней кряквы [25]. «Опросный лист охотника Республики Саха (Якутии) по добыче турпана в сезон весенней охоты 2015 года» тиражировали на местах и выдавали охотникам в бумажном виде. Заполненные листы централизованно пересылали в ФГБУ «Центрохотконтроль» (ныне Федеральный научно-исследовательский центр развития охотничьего хозяйства; далее – ФНИЦ «Охота») для анализа. В процессе обработки вычисляли показатель успешности охоты,

**Объемы добычи водоплавающих птиц в Якутии  
(по материалам ГОХР 2017–2022 гг., количество особей)**

Table 1

**Waterfowl harvest in Yakutia  
(State Hunting Registry (2017–2022); number of individuals)**

Сезоны (осень/весна) / Seasons (autumn/spring)	Гуси / Geese		Утки / Ducks		Всего / Total	
	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring	Осень / Autumn	Весна / Spring
2017/2018	13893	24400	167498	147240	181391	171640
2018/2019	13861	24071	217424	151392	231285	175463
2019/2020	105	650	7387	13033	7492	13683
2020/2021	21649	27149	183983	152544	205632	179693
2021/2022	24308	30898	231129	190882	255437	221780
В среднем / Average (без / excluding 2019/2020)	18428	26630	200009	160515	218437	187145

т. е. количество птиц, отстрелянных на одно разрешение.

Русские названия птиц соответствуют «Списку птиц Российской Федерации» [26], латинские – «Списку птиц мира» [27].

### Результаты

Скорректированная информация ГОХР по добыче уток и гусей за последние годы представлена в табл. 1. Как видно из таблицы, данные за 2019/2020 отчетный охотничий год многократно уступают показателям за другие годы. Мы связываем это с ограничениями охоты весной 2020 г. и режимом изоляции населения в период пандемии Ковид-19, что также воспрепятствовало сбору разрешений за осенний сезон 2019 г. Так как эти данные не отражают обычных для республики объемов добычи, мы исключили их из дальнейшего анализа.

Общая добыча гусей за летне-осенний период (кроме 2019 г.) колебалась от 13,9 тыс. (2017, 2018 гг.) до 24,3 тыс. (2022 г.) особей, составляя в среднем 18,4 тыс. экз. Объем добычи уток за этот же период находился в пределах от 167,5 тыс. (2017 г.) до 231,1 тыс. (2022 г.) особей, в среднем – 200 тыс. Общая добыча гусей за весенний период (кроме 2020 г.) изменялась от 24,1 тыс. (2019 г.) до 30,9 тыс. (2022 г.) особей, составляя в среднем 26,6 тыс. экз. Показатели по уткам варьировали от 147,2 тыс. (2018 г.) до 190,9 тыс. (2022 г.), в среднем – 160,5 тыс. экз.

На собранных фотографиях идентифицировано в общей сложности 454 гуся и 2826 уток

(включая неопределенных турпанов – горбоногого или обыкновенного). Среди гусей 43 экз. не было определено до вида; среди уток – 376 экз. (табл. 2).

Как видно из табл. 2, состав отстрелянной водоплавающей дичи (включая случайные виды, добытые по ошибке) насчитывал 23 вида, относившихся к группам гагар, поганок, гусей, уток и лысухе. Осенняя добыча представлена 22 видами, весенняя – 14. Также по фотографиям выявлены околотоводные птицы – серая цапля (*Ardea cinerea*; осень, 1 экз.), турухтан (*Philomachus pugnax*; весна, 1 экз.) и неопределенные кулики (весна, 8 экз.). Заметим, что отстрел куликов в весенний период запрещен.

На основе выявленной по фотографиям структуры, а также скорректированных материалов ГОХР по гусям и уткам определено среднее за сезон количество добытых птиц каждого вида (табл. 3 и 4).

При анкетировании по весенней добыче турпанов было собрано 118 анкет, из которых 113 (95,8 %) оказались пригодными для анализа. На основании этих анкет получены сведения о разрешениях и добыче из 17 районов (табл. 5).

На 131 разрешение было добыто 242 птицы, т. е. добычивость составила 1,8 птицы на одно разрешение. Средняя продолжительность охоты – 3,6 дня. Наиболее успешная охота на турпанов была в Абыйском районе, где добыто 94 птицы, а показатель результативности достигал 6,7 птицы на 1 разрешение.

Соотношение видов водоплавающих птиц в охотничьей добыче в Якутии  
(по фотоматериалам 2015, 2017 и 2018 гг.)

Species composition in waterfowl hunting bag in Yakutia  
(by photographs: 2015, 2017 and 2018)

№ п/п	Русское название / Russian name	Латинское название / Scientific name	Осень / Autumn		Весна / Spring	
			Кол-во (экз.) / Number (ind.)	Доля в добыче (%) / Share (%)	Кол-во (экз.) / Number (ind.)	Доля в добыче (%) / Share (%)
1	Чернозобая гагара	<i>Gavia arctica</i>	1	0,1		
2	Серошекая поганка	<i>Podiceps grisegena</i>	1	0,1		
3	Гуменник	<i>Anser fabalis</i>	152	9,1	127	9,7
4	Белолобый гусь	<i>Anser albifrons</i>	37	2,2	94	7,2
5	Пискулька	<i>Anser erythropus</i>	1	0,1		
	Неопределенные гуси	<i>Anser spp.</i>	17	0,0*	26	0,0*
6	Связь	<i>Mareca penelope</i>	335	19,6	95	8,4
7	Серая утка	<i>Mareca strepera</i>	3	0,2		
8	Чирок-свистунук	<i>Anas crecca</i>	260	15,2	299	26,4
9	Кряква	<i>Anas platyrhynchos</i>	350	20,5	100	8,8
10	Шилохвость	<i>Anas acuta</i>	80	4,7	104	9,2
11	Клоктун	<i>Anas formosa</i>			7	0,6
12	Чирок-трескунок	<i>Spatula querquedula</i>	67	3,9	35	3,1
13	Широконоска	<i>Spatula clypeata</i>	104	6,1	71	6,3
14	Красноголовый нырок	<i>Aythya ferina</i>	10	0,6		
15	Хохлатая чернеть	<i>Aythya fuligula</i>	160	9,3	78	6,9
16	Синьга	<i>Melanitta nigra</i>	10	0,6		
17	Горбоносый турпан	<i>Melanitta stejnegeri</i>	2	0,1	19	1,7
	Неопределенные турпаны	<i>M. stejnegeri/fusca</i>	23	1,3	65	5,7
18	Морянка	<i>Clangula hyemalis</i>	10	0,6		
19	Гоголь	<i>Bucephala clangula</i>	61	3,5	8	0,7
20	Луток	<i>Mergellus albellus</i>	3	0,2		
21	Большой крохаль	<i>Mergus merganser</i>	31	1,8	3	0,3
22	Гага-гребенушка	<i>Somateria spectabilis</i>	1	0,1	56	4,9
	Неопределенные утки	<i>Anatinae spp.</i>	103	0,0*	273	0,0*
23	Лысуха	<i>Fulica atra</i>	2	0,1		
	Всего		1824	100,0	1460	100,0

\* При расчете встречаемости видов (%) количество неопределенных гусей и уток было пропорционально распределено по идентифицированным видам гусей и уток.

\* While calculating of species shares (%) the number of unidentified geese and ducks were proportionally distributed between identified goose and duck species.

**Обсуждение**

По скорректированным материалам ГОХР, осенняя добыча водоплавающей дичи в Якутии превышала весеннюю добычу на 20–25 %. В последнее время, по сравнению с 2017/2018

и 2018/2019 годами, отмечен заметный рост добычи. Причем для гусей увеличение как осеннего, так и весеннего объемов изъятия наблюдается уже с 2020/2021 г., тогда как для уток – только в последние сезоны, т. е. осенью 2021 г.

Таблица 3

**Расчет объемов повидовой добычи гусей (среднее количество особей)  
за осенний и весенний сезоны 2017–2022 гг.**

Table 3

**Calculation of species-specific share (average number of individuals)  
in goose hunting bags for the autumn/spring seasons (2017–2022)**

№ п/п	Вид / Species	Осень / Autumn		Весна / Spring	
		Доля в добыче / Share (%)	Объем добычи / Bag	Доля в добыче / Share (%)	Объем добычи / Bag
1	Гуменник	80,0	14 742	57,5	15 303
2	Белолобый гусь	19,5	3 589	42,5	11 327
3	Пискулька	0,5	97	–	–
	Всего	100,0	18 428	100,0	26 630

Таблица 4

**Расчет объемов повидовой добычи уток (среднее количество особей)  
за осенний и весенний сезоны 2017–2022 гг.**

Table 4

**Calculation of species-specific share (average number of individuals)  
in duck hunting bags for the autumn/spring seasons (2017–2022)**

№ п/п	Вид / Species	Осень / Autumn		Весна / Spring	
		Доля в добыче / Share (%)	Объем добычи / Bag	Доля в добыче / Share (%)	Объем добычи / Bag
1	Связь	22,2	44 373	10,1	16 222
2	Серая утка	0,2	397	–	–
3	Чирок-свистунок	17,2	34 439	31,8	51 057
4	Кряква	23,2	46 360	10,6	17 076
5	Шилохвость	5,3	10 597	11,1	17 759
6	Чирок-трескунок	4,4	8 875	3,7	5 977
7	Широконоска	6,9	13 775	7,6	12 124
8	Клоктун	–	–	0,7	1 195
9	Красноголовый нырок	0,7	1 325	–	–
10	Хохлатая чернеть	10,6	21 193	8,3	13 319
11	Синьга	0,7	1 325	–	–
12	Горбоносый турпан	0,1	265	2,0	3 244
	Неопред. турпаны	1,5	3 046	6,9	11 099
13	Морянка	0,7	1 325	–	–
14	Гоголь	4,0	8 080	0,9	1 366
15	Луток	0,2	397	–	–
16	Большой крохаль	2,1	4 106	0,3	512
17	Гага-гребенушка	0,1	132	6,0	9 563
	Всего	100,0	200 009	100,0	160 515

и весной 2022 г. Это может быть связано как с улучшением отчетности, так и, в случае с весенней охотой, с расширением общих сроков

весенней охоты за счет разрешения охотиться с живой подсадной уткой на селезней в течение месяца.

Итоги анкетирования по весенней добыче турпанов в Якутии в 2015 г.

Results of questionnaire survey on the spring hunting of scoters in Yakutia (2015)

Район / District	Кол-во разрешений / Number of permits	Кол-во добытых птиц / Number of bagged birds	Успешность (птиц на 1 разрешение) / Success (birds per 1 permit)
Абыйский	14	94	6,7
Верхоянский	2	2	1,0
Горный	16	27	1,7
Жиганский	1	2	2,0
Намский	1	3	3,0
Кобяйский	7	13	1,9
Мегино-Кангаласский	6	0	0
Момский	9	5	0,6
Намский	16	19	1,2
Оймяконский	5	2	0,4
Среднеколымский	1	2	2,0
Таттинский	13	21	1,6
Томпонский	3	2	0,7
Усть-Алданский	5	10	2,0
Хангаласский	18	18	1,0
Чурапчинский	2	1	0,5
Эвено-Бытантайский	10	21	2,1
Неизвестный район	2	0	0
Всего	131	242	1,8

Наиболее важным объектом гусиной охоты в Якутии был гуменник, годовая добыча которого составляла около 30 тыс. особей, с примерно равным распределением по сезонам. Белолобый гусь уступал почти в два раза, но его весенняя добыча значительно превосходила осеннюю. В 2015–2018 гг. гуменник как вид относился к охотничьим ресурсам Якутии, однако, с 2019 г. на региональном, а с 2021 г. – на федеральном уровне один из двух подвидов, таежный гуменник (*A. f. middendorffii*), был включен в красные книги РС(Я) и России и, таким образом, выведен из охотничьего использования. Поскольку подвиды различаются между собой лишь деталями формы и окраски клюва, осуществление в сезон охоты охраны таежного и отстрела только тундрового (*A. f. serirostris*) подвида весьма затруднительно. По имеющимся фотографиям мы не смогли установить подвидовую принадлежность для большинства экземпляров, что, впрочем, можно отнести и к плохому качеству

снимков из Интернета. При этом очевидно, что стреляющие влет охотники не в состоянии различать подвиды, что ставит вопрос о целесообразности и правомерности введения этой нормы.

По совокупному отстрелу во время осеннего и весеннего сезонов ведущее место среди уток занимал чирок-свистунок (соответственно 17,2 и 31,8 %). Объем добычи этого вида оценивается в 34,4 тыс. особей осенью и 51,1 тыс. особей весной. На втором месте кряква – 23,2 % осенью и 10,6 % весной; добыча 46,4 тыс. и 17,7 тыс. особей соответственно. Третье место по встречаемости занимала свиязь – 22,2 % осенью и 10,1 % весной; добыча 44,4 тыс. и 16,2 тыс. особей соответственно. По сезонам ведущее место в осенней добыче уток занимали (в порядке убывания) кряква, свиязь и чирок-свистунок, в весенней – чирок-свистунок, шилохвость и кряква.

Из двух видов турпанов в Якутии встречается почти исключительно горбоносый турпан [28, 29]. Для удовлетворения потребностей местного на-

селения весенняя охота на турпанов разрешается не только в обычные для региона сроки, но и в дополнительные дни. В соответствии с действовавшими в 2015 г. Правилами охоты (приказ Минприроды России от 16.11.2010 г. № 512 «Об утверждении Правил охоты») охота на турпанов (горбоносого и обыкновенного) в РС(Я) открывалась на территориях Амгинского, Горного, Кобяйского, Мегино-Кангаласского, Намского, Таттинского, Усть-Алданского, Чурапчинского, Вилуйского, Хангаласского, Верхневилуйского, Томпонского, Оймяконского и Момского районов в период с 1 по 4 июня. Кроме того, охотники имели право отстреливать самцов турпанов в 10-дневный период регулярной весенней охоты на селезней, которая обычно открывалась во второй половине мая.

При анализе анкетных данных выяснилось, что в Абыйском, Момском, Эвено-Бытантайском и Верхоянском районах охота осуществлялась дольше, чем четыре отведенных для традиционной охоты дня. Эти районы, кроме Момского, не относились к территориям, где открывалась 4-дневная охота на турпанов в июне. Все это может свидетельствовать о том, что птицы (по-видимому, самцы турпана) добывались в этих районах в период более раннего 10-дневного охотничьего сезона. В то же время, в Жиганском, Намском и Среднеколымском районах разрешения брали на срок до 4 дней, что позволяет предположить охоту именно в период с 1 по 4 июня. Однако такая охота в перечисленных районах не допускалась действовавшими на тот момент Правилами охоты.

Согласно введенным с 2021 г. Правилам охоты весенняя охота на турпанов разрешена на всей территории РС(Я) в период с 29 мая по 4 июня, но не более 4 дней. За последний охотничий год 2021–2022, по данным ГОХР, выдано около 5,5 тыс. разрешений на добычу турпанов в весенний период. В условиях, когда вид (или виды) доступен для отстрела как в более ранний 10-дневный (или с подсадной уткой – в 30-дневный) период, так и в более поздний 4-дневный период, важно выяснить общий объем изъятия турпанов и понять, насколько такая практика соответствует принципам неистощительного использования. Поэтому при планировании продолжения подобного опроса в анкеты нужно включать также пункты о календарных сроках, на которые получены разрешения. Такой расширенный опрос предоставит более полную инфор-

мацию о добыче турпанов в разные сроки, что может использоваться для расчетов общей добычи в соответствии с выданными разрешениями и, при необходимости, корректировке сроков или норм добычи.

Из общего числа турпанов, найденных на фотографиях (109 экз., см. табл. 2), надежно определена лишь 21 птица: все оказались горбоносыми турпанами. Остальные 88 экз. из-за плохого качества снимков были отнесены к неопределенным турпанам. Но, по всей вероятности, это также были горбоносые турпаны, поскольку на территории республики турпанов другого вида (т. е. обыкновенного турпана) практически не отмечали, за исключением редких залетов [30–32]. По расчетным данным (см. табл. 3), в Якутии за последнее время в среднем за год добывали 17,7 тыс. особей турпанов, в том числе 3,3 тыс. осенью и 14,4 тыс. весной.

Особенностью ресурсной базы охотничьего хозяйства Якутии является большое число видов водоплавающих птиц, запрещенных к отстрелу. Так, под охраной региональной Красной книги (2-е издание, 2019 г.) находятся пiskuлька, таежный гуменник, белый гусь (*Chen hyperboreus*), тихоокеанская черная (*Branta bernicla nigricans*) и краснозобая казарки (*B. ruficollis*), черная кряква (*Anas zonorhyncha*), клоктун, касатка (*A. falcata*), серая утка, мандаринка (*Aix galericulata*), красноголовый нырок, обыкновенная (*Somateria mollissima*), очковая (*S. fischeri*) и сибирская (*Polyistica stelleri*) гаги, синьга, американская синьга (*Melanitta americana*) и лысуха. Более того, все вышеуказанные виды и подвиды гусей и казарок и четыре вида уток (клоктун, касатка, мандаринка и сибирская гага) занесены в федеральную Красную книгу [33] согласно приказу Минприроды России от 24.03.2020 № 162 «Об утверждении Перечня объектов животного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации». Таким образом, список законодательно охраняемых таксонов включает три вида и два подвида гусей и казарок, что составляет около 70 % всего разнообразия этой группы на территории республики. Среди уток под охраной 11 видов, или около 40 % разнообразия группы. Это накладывает значительные ограничения на спортивную любительскую и традиционную охоту в Якутии и объективно угрожает благополучию охотников. Действительно, исключить неумышленный отстрел «запрещенных» видов невозможно, особенно в осенний период, когда разные виды гу-

**Информация по отдельным видам водоплавающих птиц, занесенным в Красную книгу РС(Я)**

Table 6

**Data on some waterfowl species listed in the Red Data Book of the Republic of Sakha (Yakutia)**

Показатель / Parameter	Виды / Species			
	Черная кряква / Chinese Spot-billed Duck	Серая утка, в/азиатская популяция / Gadwall, E Asian population	Синьга / Common Scoter	Лысуха, в/азиатская популяция / Coot, E Asian population
Статус по Красному списку МСОП	LC (не вызывает беспокойства)	LC (не вызывает беспокойства)	LC (не вызывает беспокойства)	LC (не вызывает беспокойства)
Размер популяции (особей)	От 800 тыс. до 1 млн 600 тыс.	От 500 тыс. до 1 млн	От 687 тыс. до 815 тыс.	От 100 тыс. до 1 млн
Тренд	Стабильно	Стабильно	Увеличение	Увеличение

сей и разные виды уток очень похожи. Кроме того, возникают проблемы с контролем реально-го изъятия птиц, поскольку охотники утаивают добычу, опасаясь наказания за отстрел охраняемых объектов. Такая ситуация, сложившаяся под влиянием алармистских взглядов в вопросах сохранения биоразнообразия, препятствует налаживанию рационального использования и охраны ресурсов водоплавающей дичи и нуждается в оптимизации с учетом современной информации о статусе популяций охраняемых таксонов.

Рассмотрим четыре вида из региональной Красной книги – черную крякву, серую утку, синьгу и лысуху. Три из них (кроме черной кряквы) выявлены нами в добыче охотников. Ниже приводим характеристику состояния видов и региональных популяций (там, где они выделяются) в соответствии с Красным списком МСОП [34] и последними данными [35–37], основанными на подсчете птиц в местах зимовок (табл. 6).

Как следует из таблицы, все четыре вида характеризуются многочисленными стабильными или растущими популяциями, что определяет их благополучный международный статус. В масштабах России угрозы также не выявлены, о чем свидетельствует отсутствие в Красной книге РФ [33]. Аргументация по занесению этих видов в Красную книгу РС(Я) [38–41] не выглядит достаточно убедительной, зато указывает на слабую изученность и отсутствие современных данных. При этом серая утка и синьга уже с 1987 г., а черная кряква и лысуха – с 2003 г. находятся в «краснокнижных» списках Якутии.

В связи со всем вышеизложенным необходимо рассмотреть целесообразность дальнейшей законодательной охраны якутских популяционных группировок черной кряквы, серой утки, синьги и лысухи.

**Заключение**

С 2017 по 2022 г. среднегодовое изъятие гу-сей и уток в Якутии составляло 405,6 тыс. особей. Наблюдаемый в последние два-три года рост общей добычи водоплавающих птиц может быть связан как с улучшением ситуации по возврату охотниками заполненных разрешений, так и с расширением срока весенней охоты на территории республики. Среди отстрелянных птиц преобладали гуменник, чирок-свистун, свиязь и кряква. Комбинирование данных о структуре добычи и скорректированных сведений ГОХР позволило рассчитать среднегодовое изъятие водоплавающих птиц на видовом уровне. В дальнейшем, при участии других регионов, станет возможным оценивать охотничий пресс на отдельные виды и популяции на известных пролетных путях по ранее разработанной на примере Срединного региона схеме [29].

Для повышения достоверности сведений о добыче водоплавающей дичи необходимо улучшать отчетность со стороны охотников. Также следует совершенствовать систему сбора фотоматериалов с отстрелянными птицами. В этой работе ожидается более активное участие государственных инспекторов и специалистов охотничьего хозяй-

ства с тем, чтобы обеспечить хорошее качество снимков для последующего определения видов птиц и их половых и возрастных характеристик. Фоторегистрация охотничьей добычи может стать в Якутии одним из компонентов программы комплексного мониторинга ресурсов водоплавающей дичи, разработанной ФНИЦ «Охота» [42].

Перечень запрещенных для охоты водоплавающих птиц Якутии, вероятно, нуждается в сокращении. Рекомендуем рассмотреть возможность выведения из Красной книги РС(Я) четырех видов – черной кряквы, серой утки, синьги и лысухи.

### Список литературы / References

1. Сыроечковский Е.Е., Клоков К.Б. Использование метода анкетирования для изучения влияния охоты на водоплавающих птиц в Российской Арктике. *Казарка*. 2010;13:76–103.

Syroechkovski E.E., Klokov K.B. The use of a questionnaire to investigate waterfowl hunting in the Russian Arctic. *Casarca*. 2010;13:76–103. (In Russ.)

2. Воробьев К.А. О современном состоянии запасов промысловых водоплавающих птиц в тундре северо-восточной Якутии. *География ресурсов водоплавающих птиц в СССР, состояние запасов, пути их воспроизводства и правильного использования: Тезисы докладов совещания, 7–9 апреля 1965. Ч. 2. М.*; 1965:111–113.

Vorobyev K.A. On the current status of waterfowl resources in northeast Yakutia tundra. *Geography of waterfowl resources in the USSR, the state of stocks, ways of their reproduction and proper use: Proceedings of the Meeting, April 7–9, 1965. Part 2. Moscow*; 1965:111–113. (In Russ.)

3. Перфильев В.И. Сокращение численности водоплавающих птиц в Якутии. *Ресурсы водоплавающих птиц СССР, их воспроизводство и использование: Третье всесоюзное совещание 16–18 марта 1972 г. Ч.2. М.*: Изд-во МГУ; 1972:56–59.

Perfil'ev V.I. Reduction of waterfowl numbers in Yakutia. *Resources of waterfowl in the USSR, their reproduction and use: The 3rd All-Union Meeting, Moscow, March 16–18, 1972. Part 2. Moscow: Moscow State University Publishing House*; 1972, pp. 56–59. (In Russ.)

4. Дегтярев А.Г. О влиянии пресса весенней охоты на водоплавающих птиц Центральной Якутии. *Тезисы докладов VII Всесоюзной орнитологической конференции, г. Черкассы, 27–30 сентября 1977 г. Ч. 1. Киев: Наукова думка*; 1977:52–54.

Degtyarev A.G. About impact of spring hunting on waterfowl in Central Yakutia. *Proceedings of the 7th All-Union Ornithological Conference, Cherkasy, September 27–30, 1977. Part 1. Kiev*; 1977:52–54. (In Russ.)

5. Блохин Ю.Ю. Охота на водоплавающих птиц в тундрах Западной Якутии. *Изучение птиц СССР, их охрана и рациональное использование: Тезисы докладов IX Всесоюзной орнитологической конференции, Ленинград, 16–20 декабря 1986 г. Ч. 1. Л.*: Зоологический институт АН СССР; 1986:81.

Blokhin Yu.Yu. Waterfowl hunting in the tundra of Western Yakutia. *Study of birds in the USSR, their protection and rational use: Proceedings of the 9th All-Union Ornithological Conference, Leningrad, December 16–20, 1986. Part 1. Leningrad*; 1986:81. (In Russ.)

6. Блохин Ю.Ю. О состоянии охоты на гусей в дельте Лены. *Охрана угодий и использование охотничьих птиц: Сборник научных трудов ЦНИЛ Главохоты РСФСР. М.* 1988:51–60.

Blokhin Yu.Yu. On the state of goose hunting in the Lena Delta. *Protection of land and use of hunting birds: Collection of scientific papers of Central Scientific Research Institute of the Central Department of the Hunt Management of the RSFSR. Moscow*; 1988:51–60. (In Russ.)

7. Блохин Ю. На Лене. *Охота и охотничье хозяйство*. 1995;(9):4–5.

Blokhin Yu. On the Lena River. *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo*. 1995;(9):4–5. (In Russ.)

8. Лабутин Ю.В., Гермогенов Н.И., Поздняков В.И. Птицы околородных ландшафтов долины нижней Лены. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение; 1988. 193 с.

Labutin Yu.V., Germogenov N.I., Pozdnyakov V.I. *Birds of wetlands of the Lower Lena valley*. Novosibirsk: Nauka; 1988.193 p. (In Russ.)

9. Дегтярев А.Г. *Охотничье-промысловые птицы Республики Саха (Якутия)*. Якутск: Изд-во СО РАН; 2004. 109 с.

Degtyarev A.G. *Game birds of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Yakutsk: Publishing House SB RAS; 2004. 109 p. (In Russ.)

10. Нагрецкий Л.Н. Водоплавающие низовьев Лены. *Охота и охотничье хозяйство*. 1971;(8):6.

Nagretskiy L.N. Waterfowl of the Lower Lena River. *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo*. 1971;(8):6. (In Russ.)

11. Нагрецкий Л.Н. Охота на водоплавающих птиц в дельте Лены. *Ресурсы водоплавающих птиц СССР, их воспроизводство и использование: Тезисы докладов Третьего всесоюзного совещания, г. Москва, 16–18 марта 1972 г. Ч. 2. М.*: Изд-во МГУ; 1972:59–62.

Nagretskiy L.N. Waterfowl hunting in the Lena River Delta. *Resources of waterfowl in the USSR, their reproduction and use: Proceedings of the 3rd All-Union Meeting, Moscow, March 16–18, 1972 Part 2. Moscow: Moscow State University Publishing House*; 1972:59–62. (In Russ.)

12. Блохин Ю.Ю. *Орнитофауна дельты реки Лены, ее использование и охрана: Дис. ... канд. биол. наук. М.*; 1990. 252 с.

Blokhin Yu.Yu. *Ornithofauna of the Lena River Delta, its usage and protection*. Doct. ... Sci., Moscow; 1990. 252 p. (In Russ.)

13. Состояние ресурсов охотничьих животных в Российской Федерации в 2008–2010 гг. Информационно-аналитические материалы. *Охотничьи животные России = Hunting animals of Russia: Биология. Охрана. Ресурсоведение. Рациональное использование*. Вып. 2. М.: ЦНИЛ; 2000. 131 с.

The status of hunting animals resources in the Russian Federation. Information and analytical materials. *Hunting animals of Russia: Biology. Conservation. Study of resources. Rational use. Issue 2*. Moscow: Central Scientific Research Institute, 2000. 131 p. (In Russ.)

14. Гусаков Е.С., Блохин Ю.Ю., Руденко Ф.А. Охота на водоплавающих птиц в РСФСР и за рубежом. *Вопросы охотничьей орнитологии. Сборник научных трудов*. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР; 1986:6–22.

Gusakov E.S., Blokhin Yu. Yu., Rudenko F.A. Waterfowl hunting in the Russian Federation and abroad. *Issues of hunting ornithology. Collection of scientific papers*. Moscow: Central Scientific Research Institute of the Central Department of the Hunt Management of the RSFSR; 1986:6–22. (In Russ.)

15. Гусаков Е.С., Блохин Ю.Ю., Руденко Ф.А. О состоянии контроля за использованием ресурсов пернатой дичи. *Научная конференция «Научно-технический прогресс – в практику перестройки охотничьего хозяйства»*. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР; 1988:73–76.

Gusakov E.S., Blokhin Yu. Yu., Rudenko F.A. On the state of control over the use of game bird resources. *Scientific and technological progress for the practice of restructuring the hunting economy: Proceedings of the Conference*. Moscow: Central Scientific Research Institute of the Central Department of the Hunt Management of the RSFSR. 1988:73–76. (In Russ.)

16. Блохин Ю.Ю., Руденко Ф.А., Гусаков Е.С. Проблема организации учета добычи пернатой дичи в РСФСР. *Дичь, охрана окружающей среды, охрана редких видов животных: Сборник докладов Международного семинара, г. Москва, 27–29 июня 1989г.* М.; 1989:88–93.

Blokhin Yu. Yu., Rudenko F.A., Gusakov E.S. The assessment problem of hunting bag of birds in the RSFSR. In: *Fowl, Environment Conservation, Protection of Rare Species of Animals: Proceedings of the International Workshop, Moscow, June 27–29, 1989*. Moscow; 1989, pp. 88–93. (In Russ.)

17. Блохин Ю.Ю. Охотничья добыча уток и гусей по данным лицензий в Ямало-Ненецком автономном округе. *Казарка: бюллетень Рабочей группы по гусеобразным Северной Евразии*. 2004;(10):119–141.

Blokhin Yu.Yu. Hunting bags of ducks and geese according to information from licenses in Yamalo-Nenetsky Autonomus Region. *Casarca: Bulletin of the goose*

*and swan study group of Eastern Europe and North Asia*. 2004;(10):119–141. (In Russ.)

18. Солоха А.В. К оценке ресурсов и охотничьего использования водоплавающей дичи в России. *Вестник Российского государственного аграрного заочного университета*. 2016;20(25):57–64.

Solokha A.V. To the evaluation of population and hunting use of waterfowl in Russia. *Herald of Russian state agrarian correspondence university*. 2016;20(25):57–64. (In Russ.)

19. Солоха А.В., Гороховский К.Ю. Объем и структура добычи водоплавающей дичи в европейской части России. *Вестник охотоведения*. 2018;15(4):316–320.

Solokha A.V., Gorokhovskiy K.Yu. Waterfowl hunting bag in European Russia. *The Herald of Game Management*. 2018;15(4):316–320. (In Russ.)

20. Солоха А.В., Гороховский К.Ю. Оценка добычи водоплавающей и болотно-луговой дичи. *Охота и охотничье хозяйство*. 2015;(1):9–12.

Solokha A.V., Gorokhovskiy K.Yu. Evaluation of waterfowl hunting bag. *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo*. 2015;(1):9–12. (In Russ.)

21. Солоха А.В., Коптилов А.И., Гороховский К.Ю. К совершенствованию мониторинга водоплавающей дичи в Курганской области. *Материалы II международной, VII Всероссийской научно-практической конференции «Состояние среды обитания и фауны охотничьих животных России и сопредельных территорий», г. Балашиха, 10–11 марта, 2016 г.* Балашиха: Российский государственный аграрный заочный университет; 2016:479–483.

Solokha A.V., Kopotilov A.I., Gorokhovskiy K.Yu. Towards improving of waterfowl monitoring in Kurgan Region. *The state of the habitat and fauna of hunting animals in Russia and adjacent territories: Proceedings of the 2nd International, 7th All-Russian scientific and practical conference, Balashikha, March 10–11, 2016*. Balashikha; 2016:479–483. (In Russ.)

22. Рябицев В.К. *Птицы Урала, Приуралья и Западной Сибири: Справочник-определитель*. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та; 2001. 608 с.

Ryabitsev V.K. *Birds of Urals, Cis-Urals and Western Siberia: Field Guide*. Ekaterinburg: Ural University Publishing House; 2001. 608 p. (In Russ.)

23. Mouronval J.B. *Guide de détermination de l'âge et du sexe des canards*. Paris: Office national de la chasse et de la faune sauvage; 2014. 124 p.

24. Mullarney K., Svensson L., Zetterstrom D., Grant P. *Birds of Europe*. Princeton: Princeton University Press; 1999. 400 p.

25. Solokha A., Gorokhovskiy K. Vesilintujen metsästysaalis Venäjällä (Summary: Estimating waterbird harvest in Russia). *Suomen Riista*. 2017;(63):43–52. (Fin).

26. Коблик Е.А., Редькин Я.А., Архипов В.Ю. *Список птиц Российской Федерации = Checklist of the birds of Russian Federation*. Москва: КМК; 2006. 256 с.

- Koblik E.A., Red'kin Ya.A., Arkhipov V.Yu. *Checklist of the Birds of the Russian Federation*. Moscow: КМК; 2006. 256 p. (In Russ.)
27. *Handbook of the Birds of the World and Bird Life International digital checklist of the birds of the world. Version 3*. 2018. [https://datazone.birdlife.org/userfiles/file/Species/Taxonomy/HBW-BirdLife\\_Checklist\\_v3\\_Nov18.zip](https://datazone.birdlife.org/userfiles/file/Species/Taxonomy/HBW-BirdLife_Checklist_v3_Nov18.zip).
28. Воробьев К.А. *Птицы Якутии*. М.: Изд-во АН СССР; 1963. 336 с.
- Vorob'ev K.A. *Birds of Yakutia*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR Publishing House; 1963. 336 p. (In Russ.)
29. Кривенко В.Г., Виноградов В.Г. *Птицы водной среды и ритмы климата Северной Евразии = Birds of the water environment and rhythms of climate of the Northern Eurasia*. М.: Наука; 2008. 587 с.
- Krivenko V.G., Vinogradov V.G. *Birds of the water environment and rhythms of climate of the Northern Eurasia*. Moscow: Nauka; 2008. 587 p. (In Russ.)
30. Гладков Н.А., Залетаев В.С. Наблюдения над птицами Анабарских тундр (заполярная Якутия, северо-запад). *Исследования по фауне Советского Союза: птицы*. М.: Изд-во МГУ; 1965:38–62.
- Gladkov N.A., Zaletaev V.S. Observations on birds of the Anabar tundra (Arctic Yakutia, north-west). *Studies on the fauna of the Soviet Union (birds)*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1965:38–62. (In Russ.)
31. Андреев Б.Н. *Птицы Вилюйского бассейна*. Якутск: Книжное изд-во; 1987. 192 с.
- Andreev B.N. *Birds of the Vilyui River basin*. Yakutsk: Publishing house; 1987. 192 p. (In Russ.)
32. Томкович П.С. Птицы южного побережья губы Буор-Хая (Северная Якутия). *Птицы осваиваемых территорий (Исследования по фауне Советского Союза)*. М.: Изд-во МГУ; 1988:3–38.
- Tomkovich P.S. The birds of the southern coast of the Buor-Khaya Bay (Northern Yakutia). *Birds of the developed territories (Studies on the fauna of the Soviet Union)*. Moscow: Moscow State University Publishing House; 1988:3–38. (In Russ.)
33. *Красная книга Российской Федерации, том «Животные»*. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология»; 2021. 1128 с.
- Red Data Book of the Russian Federation, volume "Animals"*. Moscow: Ekologiya; 2021. 1128 p.
34. *Birdlife International IUCN Red List for birds*. 2023. <https://datazone.birdlife.org> on 23/06/2023.
35. Nagy S., Langendoen T. *Flyway trend analyses based on data from the African-Eurasian Waterbird Census from the period of 1967-2018*. Online publication. Wetlands International, Wageningen, The Netherlands; 2020. <https://iwc.wetlands.org/static/files/IWC-trend-analysis-report-2020.pdf>
36. Langendoen T., Mundkur T., Nagy S. *Flyway trend analyses based on data from the Asian Waterbird Census from the period of 1987-2020*. Online publication. Wetlands International, Wageningen, The Netherlands; 2021. [https://iwc.wetlands.org/static/files/EAAFP\\_IWC\\_trends.pdf](https://iwc.wetlands.org/static/files/EAAFP_IWC_trends.pdf)
37. Mundkur T., Langendoen T. *Report on the Conservation Status of Migratory Waterbirds of the East Asian – Australasian Flyway*. First Edition. Report to the East Asian – Australasian Flyway Partnership. Wetlands International, Ede, The Netherlands; 2022. <https://www.wetlands.org/eaaf-conservation-status-review1/>
38. Борисов З.З. Серая утка. *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных*. М.: Наука; 2019:107–108.
- Borisov Z.Z. Gadwall. Vinokurov N.N. (ed.) *Red Data Book of Republic of Sakha (Yakutia). Vol. 2. Rare and Endangered Animal Species*. Moscow: Nauka; 2019:107–108. (In Russ.)
39. Гермогенов Н.И. Лысуха. *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных*. М.: Наука; 2019:149.
- Germogenov N.I. Coot. *Red Data Book of Republic of Sakha (Yakutia). Vol. 2. Rare and Endangered Animal Species*. Moscow: Nauka; 2019:149. (In Russ.)
40. Дегтярев А.Г. Черная кряква. *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных*. М.: Наука; 2019а:102.
- Degtyarev A.G. Chinese Spot-billed Duck. *Red Data Book of Republic of Sakha (Yakutia). Vol. 2. Rare and Endangered Animal Species*. Moscow: Nauka; 2019а:102. (In Russ.)
41. Дегтярев А.Г. Синьга. *Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных*. М.: Наука; 2019в:119.
- Degtyarev A.G. Common Scoter. *Red Data Book of Republic of Sakha (Yakutia). Vol. 2. Rare and Endangered Animal Species*. Moscow: Nauka; 2019с:119. (In Russ.)
42. Солоха А.В. Перспективы мониторинга водоплавающей дичи в Тюменской области. *Вестник охотоведения*. 2022;19(3):156–162.
- Solokha A.V. The prospects of waterfowl monitoring in Tyumen Region. *The Herald of Game Management*. 2022;19(3):156–162. (In Russ.)

#### Об авторах

СОЛОХА Александр Владимирович, кандидат биологических наук, <https://orcid.org/0009-0005-5510-6077>, e-mail: alex.solokha@gmail.com

БЛОХИН Юрий Юрьевич, кандидат биологических наук, <https://orcid.org/0000-0001-8402-6520>, РИНЦ AuthorID: 275780, e-mail: yuri-blokhin@ya.ru

*About the authors*

SOLOKHA, Alexander Vladimirovich, Cand. Sci. (Biol.), <https://orcid.org/0009-0005-5510-6077>, e-mail: alex.solokha@gmail.com

BLOKHIN, Yury Yurievich, Cand. Sci. (Biol.), <https://orcid.org/0000-0001-8402-6520>, RISC AuthorID: 275780, e-mail: yuri-blokhin@ya.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 09.03.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 28.07.2023*

*Принята к публикации / Accepted 04.08.2023*

УДК 631.962:630\*43:630\*23:631.445.57(571.56)  
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-477-486>

Оригинальная статья

## Послепожарное лесовозобновление сосняков, прилегающих к тукуланам Лено-Вилуйского междуречья

Л. П. Габышева✉

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация  
✉ [llp77@yandex.ru](mailto:llp77@yandex.ru)

### Аннотация

Приведены результаты исследований пирогенных сообществ сосновых лесов, прилегающих к тукуланам Лено-Вилуйского междуречья. На территории Вилуйского района Республики Саха (Якутия) широко распространены обширные песчаные пустыни – тукуланы, древние и современные эоловые ландшафты. Посреди песков и вокруг тукуланов широко распространены сосновые леса, которые в последнее время сильно подвержены лесным пожарам, как и вся территория Лено-Вилуйского междуречья. Исследования проведены в 2019 г. в послепожарных сообществах – на разновозрастных гарях, находящихся на Лено-Вилуйском междуречье. Результаты исследований дополняют немногочисленные сведения о послепожарном лесовозобновлении прилегающих к тукуланам сосновых лесов. В ходе исследования выявлено, что обширные площади изученного региона заняты пирогенными сообществами. При этом естественное возобновление сосны обыкновенной в окрестностях тукуланов происходит неудовлетворительно (насчитывается 0,3–0,95 тыс. шт. подростов сосны/га), что зависит от неоптимальных условий для возобновления леса. Многочисленные послепожарные сообщества в данном регионе могут стать исходной точкой развития современных эоловых процессов или могут расширить площади уже имеющихся песчаных наносов.

**Ключевые слова:** Лено-Вилуйское междуречье, сосновые леса, послепожарное лесовосстановление, тукуланы  
**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (FWRS-2021-0023, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190038-0) и проекту «Причинно-следственные основы динамики почвенного покрова и наземных экосистем криолитозоны на территории распространения легких пород в Центральной Якутии для разработки фундаментальных основ охраны квазиравновесных криоксерогенных территорий» (№ 0297-2021-0026; ЕГИСУ НИОКТР АААА-А21-121012190036-6) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН» (грант №13.ЦКП.21.0016).

**Для цитирования:** Габышева Л. П. Послепожарное лесовозобновление сосняков, прилегающих к тукуланам Лено-Вилуйского междуречья. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):477–486. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-477-486>

Original article

## Post-fire reforestation of pine forests adjacent to the tukulans of the Lena-Vilyui interfluve

L. P. Gabysheva✉

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Yakutsk, Russian Federation  
✉ [llp77@yandex.ru](mailto:llp77@yandex.ru)

### Abstract

This article presents the results of forestry and geobotanical studies of post-fire communities in pine forests adjacent to large sandy deserts, tukulans, in the Lena-Vilyui interfluve. Pine forests, which are widespread in the middle and around the tukulans, have recently become highly susceptible to fires, as the entire territory of the Lena-Vilyui interfluve. In 2019, we collected materials on post-fire communities in multi-age burned areas, which supplement a few

pieces of information regarding post-fire reforestation. We found that the vast areas of the studied region were occupied by pyrogenic communities. We assumed that the natural regeneration of Scotch pine in the vicinity of tukulans was unsatisfactory, with 0.3–0.95 thousand pieces of pine undergrowth/ha. Post-fire communities can become launching pads for the development of modern aeolian processes or can expand the area of existing tukulans.

**Keywords:** the Lena-Vilyui interfluve, pine forest, post-fire regeneration, tukulan

**Funding.** This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the projects: “Vegetation of the permafrost zone of the taiga Yakutia: biodiversity, environment-forming functions, protection and rational use” (theme number FWRS-2021-0023, reg. number AAAA-A21-121012190038-0) and “Causal foundations of the dynamics of soil cover and terrestrial ecosystems in the permafrost zone in the territory of distribution of sandy soils in Central Yakutia” (theme number 0297-2021-0026; reg. number AAAA-A21-121012190036-6). This study was conducted using equipment of the Core Shared Research Facilities (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant number SFC 13.CSRF.21.0016).

**For citation:** Gabysheva L.P. Post-fire reforestation of pine forests adjacent to the tukulans of the Lena-Vilyui interfluve. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):477–486. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-477-486>

## Введение

Сосновые леса в Якутии занимают не более 10 тыс. га (6,5 % покрытой лесом площади территории Якутии) [1]. Они выполняют средозащитные, ландшафтоформирующие, рекреационные и другие функции и имеют большое значение в деревообрабатывающей промышленности республики. Массивы сосновых лесов Лено-Вилуйского междуречья являются одними из крупных в Якутии и сосредоточены в основном в среднем и нижнем течении р. Вилуй (Вилуйский и Кобяйский улусы). Известно, что посреди сосновой тайги Вилуйского бассейна широко развиты пустыни – так называемые тукуланы – развееваемые песчаные дюны, внешне напоминающие барханы. Такие эоловые ландшафты имеют разные размеры: от небольших – от нескольких сот и до обширных – нескольких тысяч гектаров [2, 3]. Выявлено, что возраст сосновых лесов, растущих на наиболее известном Кысыл-Сырском тукулане, находящемся недалеко от г. Вилуйск, составляет около 6–7 тысяч лет [4, 5]. Сосновые леса существуют по настоящее время, и с каждым годом их площади сокращаются из-за интенсивного освоения и уничтожения массивов лесными пожарами [6].

Многочисленными исследованиями доказано пирогенное происхождение сосны, что является биологическим свойством вида, выработанным в ходе эволюции, и является одним из механизмов снижения эффекта влияния пожаров на природные экосистемы [7–11 и др.]. В лесах Якутии пирогенный фактор – один из главных, определяющих состояние и ход формирования, особенно в лесах Центральной Якутии. Этому способствуют как природно-климатические условия территории, так и антропогенные факторы. Лесные

пожары являются одним из важнейших эколого-эволюционных факторов, оказывающих определяющее влияние на леса [11–13 и др.].

Устойчивость и динамика послепожарной растительности сосновых лесов Центральной Якутии, в частности Лено-Вилуйского междуречья, к настоящему времени остаются практически не изученными [14–17]. Проведенные в 60–70-х годах и конце XX в. исследования по изучению процесса восстановления лесной растительности на горях преимущественно проводились в лесопромышленных районах – на юго-западе и юго-востоке Якутии [18–21 и др.]. Есть отрывочные сведения в монографии «Леса среднетаежной подзоны Якутии» [12]. По Центральной и Западной Якутии материалы по лесовосстановлению в сосновых лесах практически отсутствуют.

В связи с проблемами лесных пожаров и отсутствием данных по лесовосстановлению в Вилуйском регионе тема настоящей работы наиболее актуальна.

Цель статьи – раскрыть особенности лесовозобновления в сосновых лесах Вилуйского района, в частности в сосняках, прилегающих к тукуланам.

## Методы и материалы исследования

Послепожарные сообщества изучены маршрутным методом в 2019 г. на территории Вилуйского района Республики Саха (Якутия) в окрестностях двух крупных песчаных тукуланов. Первый тукулан расположен на правом берегу р. Вилуй, между селами Тымпы и Хампа Вилуйского улуса, в 30 км к востоку от с. Кысыл Сыр. Второй расположен на правом берегу р. Вилуй, в 400 км к северо-западу от Якутска, в 100 км к югу от первого тукулана. Полевые исследования прово-

дильсь апробированными методами с использованием методики В.Н. Сукачева, С.В. Зонна [22] с закладкой пробных площадей. Типы лесов приведены по А.П. Исаеву [11]. Лесовозобновление изучено по методике А.В. Побединского [23].

Многолетние статистические данные о числе и площади лесных пожаров предоставлены Департаментом лесного хозяйства Министерства экологии, природопользования лесного хозяйства Республики Саха (Якутия).

### Результаты и обсуждение

Территория Вилуйского района относится к Вилуйскому лесничеству. Общая площадь лесничества составляет 5114166 га. Лесной фонд представлен единым лесным массивом, разрезанным акваторией р. Вилуей. Лесные земли составляют 4704605 га, или 92 % от общей площади лесничества. Из них покрытые лесом земли составляют 3119982 га, или 61 % от общей площади лесничества. Из земель, не покрытых лесной растительностью, наибольший удельный вес имеют гари – 17,2 %, редины – 13,6, вырубки – 0,2, прогалины – менее 0,1 %. Большая часть нелесных земель представлена болотами – 6,6 %. Основными лесобразующими породами являются лиственница (80,0 %), сосна (5,7 %). Значительные площади заросли кустарниками, в основном ерником (13,8 %). На долю остальных пород приходится около 0,5% покрытой лесом площади. Сосновые леса занимают повышенные участки надпойменных террас, сухие вершины и склоны преимущественно южной экспозиции увалов и

коренных берегов рек с боровыми песчаными и супесчаными слабоподзоленными и оподзоленными почвами. Лиственничники брусничные приурочены к довольно богатым среднеувлажненным мерзлотным таежным слабоподзоленным и к палевым слабоосолоделым суглинистым и супесчаным почвам. Багульниково-моховые лиственничные леса встречаются на пологих склонах северных экспозиций, предводораздельных понижениях в верховьях рек, в слабо врезанных заболоченных долинах небольших таежных речек, на надпойменных террасах у подножия коренных берегов рек Вилуей и Тюнга с таежными палевыми поверхностно заболоченными, таежными оподзоленными глееватыми супесчаными и суглинистыми почвами и торфяно-перегнойными болотными почвами [24].

Леса Вилуйского района отличаются наибольшей горимостью среди лесов Якутии. По данным Департамента по лесным отношениям Республики Саха (Якутия), леса региона относятся к V классу пожарной опасности. Так, за период с 2007 по 2021 г. на территории Вилуйского лесничества отмечен 231 лесной пожар, сгорело 1611697 га лесов (рис. 1). В среднем ежегодно регистрировалось 15 пожаров, среднегодовое количество сгоревших площадей 107446,4 га.

Изменения горимости лесов отражены на диаграммах. За период с 2007 по 2021 г. (15 лет) на данной территории было зафиксировано четыре пика горимости – в 2013, 2017, 2018, 2021 гг. Наибольшие площади лесных пожаров зафиксированы в 2014, 2018, 2021 гг. В 2007, 2008 и

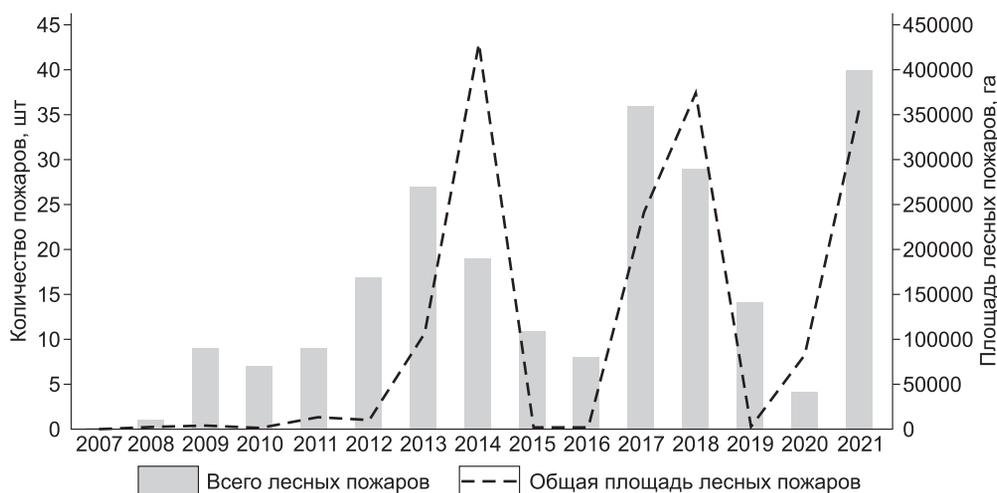


Рис. 1. Количество и площадь лесных пожаров в 2007–2021 гг. в Вилуйском районе

Fig. 1. The number and area of forest fires from 2007 to 2021 in the Vilyuy district

2020 гг. было зафиксировано наименьшее количество возгораний. При этом наиболее распространены лесные пожары от «сухих гроз» в июле–августе и деятельности человека в частности от сельскохозяйственных палов. Лесные пожары в абсолютном большинстве весной – низовые беглые, летом – низовые устойчивые.

Сосняки часто подвергаются лесным пожарам, особенно сильное антропогенное воздействие на леса оказывается в последние годы. Характерным типом леса после пожаров является мертвопокровный сосняк, который широко распространен вокруг тукуланов. Такой тип сосняков в большей части с полностью выгоревшим подростом и лишенный растительного покрова становится «стартовой» площадкой для развития современных эоловых процессов или расширения площади древнего тукулана, в особенности на территории Вилюйского района [25].

Процесс послепожарного лесовозобновления в сосняках носит сложный, часто прерывистый характер, который зависит от мозаичности лесорастительных условий, площади гари, погодных и микроклиматических условий, свойств самой древесной породы – сосны обыкновенной [8]. В условиях замедленного процесса разложения в Центральной Якутии пожар является единственным фактором «обновления» лесной экосистемы, он инициирует интенсивный лесовозобновительный процесс, и эволюционно сосна и лист-

венница являются породами, приспособленными к обороту огня и послепожарным условиям [8].

Далее приводим характеристику послепожарного лесовозобновления в лесах Вилюйского лесничества. В табл. 1 представлено распределение подроста сосны обыкновенной в послепожарных сообществах в 2019 г. по группам высот, в табл. 2 – по группам жизненного состояния.

**Пробная площадь № 1.** Гарь сосновая на месте сосняка толокнянково-лишайникового, находится на злаковой стадии восстановления. На представленной пробной площади прошел низовой пожар сильной интенсивности. Древостой практически полностью сгорел, вывал древостоя 95 %. Живые семенные деревья на гари практически отсутствуют. Возобновление слабое. Большая часть подроста относится к средним возрастным группам (0,51–1 м). Количество крупного подроста недостаточно. Подрост, по большей части, здоровый (табл. 2, рис. 2). Отсутствие большого числа всходов и подрост мелкой высотной группы сигнализирует о том, что данная пробная площадь имеет неоптимальные условия для возобновления леса, причинами которого являются отсутствие семенных деревьев и сильная интенсивность пройденного пожара, который полностью уничтожил подстилку и почвенный запас семян сосны. Известно, что сильные лесные пожары уничтожают весь почвенный запас семян [26 и др.]. После средних по

Таблица 1

Количество подроста сосны по группам высот (по А.В Побединскому [23]), шт./га

Table 1

Number of pine undergrowth by height groups (according to A.V. Pobedinsky [23]), pcs./ha

Пробная площадь	Возраст гари, лет	Исходный тип леса	Количество, шт./га				
			Всходы до 0,1 м	Мелкие	Средние	Крупные	Итого
1	9	Сосняк толокнянково-лишайниковый	0	0	600	4	604
99	8	Сосняк лишайниковый	0	300	330	320	950
115	3 (беглый низовой средней интенсивности)	Сосняк бруснично-багульниково-лишайниковый	300	0	0	200 погibli	300
2	3 (беглый низовой средней интенсивности), Сосняк мертвопокровный	Сосняк бруснично-багульниковый	0	0	0	300 погibli	0
12	50, Сосняк мертвопокровный	Сосняк толокнянково-лишайниковый	400	4700	500	0	5600

Примечание. Группы высот: мелкие – 0,1–0,5 м, средние – 0,51–1,0 м, крупные – 1,01 м и более.

Note. Height groups: small – 0,1–0,5 m, middle – 0,51–1,0 m, large – 1,01 m and more.

силе пожаров в сосновом насаждении до половины семян сохраняет жизнеспособность. Слабый пожар в наименьшей степени повреждает семена, и в случае хорошего урожая в предшествующий период почвенный запас семян позволяет реализовать лесовозобновительный потенциал сосны.

Травяно-кустарничковый покров развит слабо, проективное покрытие 20–30 %, видовой состав бедный. Сформирован типичным лесным видом исходного типа леса толокнянкой *Arctostaphylos uva-ursi* (sp.). *Carex vanheurckii* образует кочки (cop2), также встречается *Poa stepposa* (sol), единично отмечены *Saxifraga bronchialis*, *Chamaenerion angustifolium*.

Мохово-лишайниковый покров не сформирован, изредка встречаются лишайники *Peltigera malacea* (Ach.) Funck, *Cladonia amaurocraea* (Flörke) Schaer., мох *Polytrichum strictum* (+).

**Пробная площадь № 9.** Гарь с 8-летней давностью пожара на месте сосняка лишайникового, лес выгорел полностью устойчивым низовым пожаром сильной интенсивности, отпад 95–100 % (рис. 3). Из всех изученных площадок на данном участке зафиксировано наибольшее количество всходов, но возобновление остается недостаточно успешным. Малая густота подроста компенсируется его здоровым жизненным состоянием, что говорит о более благоприятном условии местопроизрастания.

Кустарниковый покров не сформирован, единично встречен *Salix bebbiana*. Травяно-кустар-



Рис. 2. Молодая сосновая гарь

Fig. 2. Young burnt out pine forest

ничковый ярус слабо развит, проективное покрытие 20–30 %, малое видовое богатство. В покрове доминирует *Carex vanheurckii* (sp-cop1), *Calamagrostis langsdorffii* (sp.), встречаются куртины *Arctostaphylos uva-ursi* (sp.), единичны *Lychnis sibirica*, *Lycopodioides sibirica*.

Мохово-лишайниковый покров не развит. Единично встречаются *Polytrichum strictum*, *Cladonia stellaris*, *C. amaurocraea*.

**Пробная площадь № 15.** Сосновая гарь с 3-летней давностью пожара на месте сосняка бруснично-багульниково-лишайникового, где был отмечен низовой пожар средней степени интенсивности (рис. 4). Древорост чистый сосновый

Таблица 2

Количество подроста сосны по жизненному состоянию (по А.В Побединскому [23]), шт./га

Table 2

The number of pine undergrowth by vital condition (according to A.V. Pobedinsky [23]), pcs./ha

Пробная площадь	Возраст гарь, лет	Исходный тип леса	Количество, шт./га				
			Здоровые	Ослабленные	Усыхающие	Сухие	Итого
1	9	Сосняк толокнянково-лишайниковый	604	0	0	0	604
9	8	Сосняк лишайниковый	950	0	0	0	950
115	3 (беглый низовой средней интенсивности)	Сосняк бруснично-багульниково-лишайниковый	300	0	0	200	500
12	3 (беглый низовой средней интенсивности), Сосняк мертвопокровный	Сосняк бруснично-багульниковый	0	0	0	300	300
12	50 Сосняк мертвопокровный	Сосняк толокнянково-лишайниковый	5400	200		0	5600



Рис. 3. Гарь 8-летней давности пожара

Fig. 3. Burnt forest area after the fire 8 years ago



Рис. 4. Сосновая гарь мертвопокровная

Fig. 4. Burnt out pine forest and dead soil cover

(10С) сохранен, крупные деревья живые, отпада нет. Территория этой пробной площади отличается очень малым количеством всходов, распределенных редко и единично. Число всходов сосны составляет 300 шт./га. Данный участок леса имеет неблагоприятные условия для произрастания подроста, возможно, это связано с несемными годами для сосны в течение 3 лет, а также сильной интенсивностью пройденного пожара, которая полностью уничтожила подстилку и почвенный запас семян сосны. Подрост высотой 3–4 м и меньше в результате пожара погиб, отпада нет. Качество всходов здоровое.

Покров практически мертвопокровный, единично встречаются куртины *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Limnas stelleri*, в менее сторевших участках остались кустарнички *Ledum palustre*.

**Пробная площадь № 2.** Сосняк мертвопокровный – это послепожарный великовозрастный вариант сосняка лишайникового (рис. 5). На данной пробной площади имеются следы недавнего (не более 10 лет) беглого низового пожара средней интенсивности, крупные деревья пожаром не тронуты. Имеются пожарные подсушины на высоте 2,3–2,8 м, на данном участке леса происходило минимум три лесных пожара (на дереве с максимальным диаметром 32 см насчитывается три пожарные подсушины). Древостой чистый сосновый (10С), среднесомкнутый (0,5), припевающий (максимальный возраст 100–120 лет), невысокий (средняя высота 12 м, диаметр 18 см, максимальная высота 15 м, диаметр 32 см), кроны сосны раскидистые. Густота

0,6 тыс. экз./га. Возобновление под пологом леса хорошее (см. табл. 1), с равномерным распространением по экотопу. Подрост распределен равномерно, жизненное состояние здоровое, средняя высота 45 см. Подавляющее большинство подроста относится по высоте к группе мелкого (10–50 см), по возрасту – к группе от 5 до 7 лет (7–8 лет), крупный подрост и подрост возрастом более 16 лет и высотой более 100 см на территории пробной площади практически отсутствует. Достаточно большое количество подроста указывает на относительно благоприятные условия для этого этапа возобновления леса, такие как: достаточная освещенность для появления всходов, достаточное количество влаги и тепла, отсутствие конкуренции и присутствие семенных деревьев. Доминирующее положение качественного здорового подроста повышает вероятность формирования в будущем устойчивого и ценного соснового насаждения при условии отсутствия пожаров сильной интенсивности.

Травяно-кустарничковый покров не сформирован, изредка в виде куртин размером 1,5×2 м растут *Arctostaphylos uva-ursi*, *Carex vanheurckii*, *Poa stepposa*.

**Пробная площадь № 12.** Сосняк мертвопокровный образован после беглого низового пожара средней интенсивности (рис. 6). Нагар на деревьях достигает 2 м. Огнем полностью уничтожены подстилка, живой напочвенный покров. Исходный тип леса – сосняк бруснично-багульниковый. Древостой живой, среднепроизводительный, состав 10С. Сомкнутость 0,6. Стволы прямые. Средняя высота 12 м, средний диаметр

20,5 см, возраст 97 лет. Максимальная высота 12 м, диаметр 31 см, возраст 188 лет. Густота 0,9 тыс. экз./ га. Подрост сосны великовозрастной, всходов и мелкого подроста нет. Подрост высотой 3 м практически полностью погиб в результате пожара, подрост выше 7 м и диаметром 12 см остался жив.

В живом напочвенном покрове остались (покрытие 10 %) куртинки кустарничков, рассеянно произрастают *Ledum palustre (sol-sp)*, *Vaccinium vitis-idaea (sol-sp)*.

Естественное возобновление сосны обыкновенной в Вилуйском районе происходит неудовлетворительно. Все ярусы растительности сосняков в разной степени имеют следы пожарного воздействия. Наименьшее нарушение сосна получает после беглого низового пожара, взрослые деревья более устойчивы к воздействию огня и остаются живыми. Живой напочвенный покров в большинстве случаев страдает, и, как правило, после прохождения беглого низового пожара и устойчивого низового пожара слабой интенсивности образуются сосняки мертвопокровные, которые очень часто встречаются в лесах Вилуйского междуречья. Так, во встреченных нами 3-летних гаях и в сосняках мертвопокровных после беглого низового пожара полностью погибает великовозрастный подрост, который и так был не густой (200–300 шт./га), а новые всходы только начинают прорастать в количестве до 300 шт./га (см. табл. 1).

В случае полной гибели древостоя восстановление идет примерно по схеме восстановления растительности после пожаров, предложенной для лиственничников среднетаежной подзоны Якутии [12], которая включает несколько стадий лесовосстановления. По нашим наблюдениям, после устойчивых низовых пожаров сильной интенсивности в сосняках Вилуйского междуречья образуются гаяи, которые отличаются особо крупными размерами и высоко залегающей песчаной почвой. На таких гаях практически отсутствуют семенные деревья и лесовосстановление идет слабо. Нередко при неудовлетворительном лесовосстановлении такие гаяи становятся стартовой площадкой образования песчаных наносов. В целом, исследованные гаяи Вилуйского междуречья после устойчивых низовых пожаров сильной интенсивности можно охарактеризовать следующим образом: древостой практически пол-



Рис. 5. Сосняк мертвопокровный. Пробная площадка № 2  
Fig. 5. Dead soil cover in the pine forest. Trial site no. 2



Рис. 6. Сосняк мертвопокровный. Пробная площадка № 12  
Fig. 6. Dead soil cover in the pine forest. Trial site no. 12

ностью уничтожен, семенные деревья встречаются редко; подрост сосны здоровый, но редкий, густота стояния от 0,6 до 0,95 экз./га; подлесок не выражен, изредка встречается *Salix bebbiana*. Травяно-кустарничковый покров развит слабо, проективное покрытие до 20–30 %, видовой со-

став бедный. Сформирован типичным лесным видом исходного типа леса толокнянкой *Arctostaphylos uva-ursi* (sp.). Участвуют злаки и разнотравье *Carex vanheurckii*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Poa stepposa*, единично отмечены *Saxifraga bronchialis*, *Chamaenerion angustifolium*, *Lychnis sibirica*, *Lycopodioides sibirica*. Мохово-лишайниковый покров не выражен. Изредка встречаются *Polytrichum strictum*, *Cladonia stellaris*, *C. amaurocraea*.

### Выводы

1. Естественное возобновление сосны обыкновенной в окрестностях тукуланов Вилуйского района происходит неудовлетворительно. Общее количество подроста сосны насчитывается в пределах 0,3–0,95 тыс. шт./га.

2. Качественная структура возобновления практически здоровая, только на старовозрастных гарях наблюдается наличие ослабленного подроста средней возрастной группы. На пробных площадках 12 и 15 на молодой 3-летней гари встречались сухие великовозрастные подросты от исходного типа леса.

3. Отсутствие большого числа всходов и небольшого количества подроста мелкой высотной группы говорит о том, что изученные послепожарные пробные площади в окрестностях тукуланов Лено-Вилуйского междуречья имеют неблагоприятные условия для восстановления лесной растительности, причиной которых являются отсутствие семенных деревьев и сильная интенсивность пройденного пожара, полностью уничтожившего подстилку и почвенный запас семян сосны.

4. Многочисленные послепожарные сообщества в данном регионе могут стать исходной точкой развития современных эоловых процессов – в одном случае, или могут расширить площади уже имеющихся песчаных наносов – во втором. В дальнейшем этому процессу может способствовать большое количество гарей с обширными площадями, а также малая обеспеченность этих площадей семенными деревьями и недостаточно успешное лесовозобновление.

### Список литературы / References

1. Тимофеев П.А. *Деревья и кустарники Якутии*. Якутск: Бичик; 2003. 65 с.  
Timofeev P.A. *Trees and shrubs of Yakutia*. Yakutsk: Bichik; 2003. 65 p. (In Russ.)

2. Караваев М.Н., Скрябин С.З. *Растительный мир Якутии*. Якутск: Якуткнигоиздат; 1971. 128 с.

Karavaev M.N., Scriabin S.Z. *The flora of Yakutia*. Yakutsk: Yakutknigoizdat; 1971. 128 p. (In Russ.)

3. Работнов Т.А. Ландшафты песчаных образований в низовьях р. Вилуя. *Землеведение*. 1935;37(4): 321–338.

Rabotnov T.A. Landscapes of sand formations in the lower reaches of the Vilyuy River. *Zemlevedeniye*. 1935; 37(4):321–338. (In Russ.)

4. Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии. *Природа*. 2016;11(1215):44–55.

Galanin A.A., Pavlova M.R., Shaposhnikov G.I., Lytkin V.M. Tukulans: sandy deserts of Yakutia. *Priroda*. 2016;11(1215):44–55. (In Russ.)

5. Лукин В.В. *Тукуланы – типичные ландшафты Центральной Якутии*: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск; 2008. 28 с.

Lukin V.V. *Tukulans are typical landscapes of Central Yakutia*: Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Irkutsk; 2008. 28 p. (In Russ.)

6. Габышева Л.П. Характеристика сосновых лесов тукуланов Лено-Вилуйского междуречья. *Успехи современного естествознания*. 2020;(10):7–13. <https://doi.org/10.17513/use.37483>

Gabysheva L.P. Characteristics of pine forests of tukulans of the Lena-Vilyui interfluvium. *Advances in current natural sciences*. 2020;(10):7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37483>

7. Санников С.Н. *Экология естественного возобновления сосны под пологом леса*. М.: Наука; 1985. 149 с.

Sannikov S.N. *Ecology of natural renewal of pine under the canopy of the forest*. Moscow: Nauka; 1985. 149 p. (In Russ.)

8. Санников С.Н. *Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной*. М.: Наука; 1992. 264 с.

Sannikov S.N. *Ecology and geography of the natural renewal of scots pine*. Moscow: Nauka; 1992. 264 p. (In Russ.)

9. Санников С.Н., Санникова Н.С. Эволюционные аспекты пирозологии светлохвойных видов. *Лесоведение*. 2009;(3):3–10.

Sannikov S.N., Sannikova N.S. Evolutionary aspects of pyroecology of light coniferous species. *Russian journal of forest science = Lesovedenie*. 2009;(3):3–10. (In Russ.)

10. Фуряев В.В. *Роль пожаров в процессе лесообразования*. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма; 1996. 251 с.

Furyaev V.V. *The role of fires in the process of forest formation*. Novosibirsk: Nauka. Siberian Publishing Firm. 1996. 251 p. (In Russ.)

11. Исаев А.П. *Естественная и антропогенная динамика лиственных лесов криолитозоны (на примере Якутии)*: Дис. ... докт. биол. наук. Якутск; 2011. 420 с.

- Isaev A.P. *Natural and anthropogenic dynamics of larch forests in the permafrost zone (on the example of Yakutia)*: Diss. ... Doct. Sci. Yakutsk; 2011. 420 p. (In Russ.)
12. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. *Леса среднетаежной подзоны Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1994. 139 с.
- Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P. et al. *Forests of the Middle Taiga subzone of Yakutia*. Yakutsk: FRC YaSC SB RAS; 1994. 139 p. (In Russ.)
13. Лыткина Л.П. *Лесовосстановление на гарях Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)*. Новосибирск: Наука; 2010. 117 с.
- Lytkina L.P. *Reforestation on the fires of the Leno-Amginsky interfluvium (Central Yakutia)*. Novosibirsk: Nauka; 2010. 117 p. (In Russ.)
14. Уткин А.И. Леса и лесные ресурсы бассейна р. Марха. *Развитие производительных сил Западной Якутии в связи с созданием алмазодобывающей промышленности*. Т. 2. Рожков И.С. (ред.). Якутск; 1958: 255–262.
- Utkin A.I. Forests and forest resources of the Markha River basin. *Development of the productive forces of Yakutia in connection with the creation of the diamond mining industry*. V. 2. Rozhkov I.S. (ed.). Yakutsk; 1958:255–262. (In Russ.)
15. Черемхин С.С. Леса верхнего течения р. Вилюй. *Материалы о лесах Якутии: Труды Института биологии Академии наук СССР. Якутский филиал Сибирского отделения*. 1961;(7):243–259.
- Cheremkhin S.S. Forests of the upper reaches of the Vilyu River. *Materials about the forests of Yakutia: Proceedings of the Institute of Biology. Academy of Sciences USSR. Yakut Subsidiary of Siberian Branch*. 1961; (7):243–259. (In Russ.)
16. Габышева Л.П. Состояние лесной растительности на участке перехода магистрального газопровода через р. Вилюй. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2015;(3):69–76.
- Gabysheva L.P. Forest vegetation at the gas pipeline crossing the Vilyu River (Central Yakutia). *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2015;(3):69–76.
17. Галактионова Т.Ф., Добрецова Л.А., Пермьякова А.А. и др. *Растительность бассейна реки Вилюя*. М.; Л.: Наука; 1962. 136 с.
- Galaktionova T.F., Dobretsova L.A., Permyakova A.A. et al. *Vegetation of the Vilyuya River basin*. Moscow; Leningrad: Nauka; 1962. 136 p. (In Russ.)
18. Щербаков И.П. *Лесной покров Северо-Востока СССР*. Новосибирск: Наука; 1975. 344 с.
- Shcherbakov I.P. *Forest cover of the North-East of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1975. 344 p. (In Russ.)
19. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. и др. *Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса*. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1979. 224 с.
- Shcherbakov I.P., Zabelin O.F., Karpel B.A. et al. *Forest fires in Yakutia and their impact on the nature of the forest*. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch; 1979. 224 p. (In Russ.)
20. Щербаков И.П., Чугунова Р.В. Леса юго-западных приленских районов Якутии и меры содействия лесовозобновлению на лесосеках и гарях. *Материалы о лесах Якутии. Труды Института биологии Якутского филиала Сибирского отделения Академии наук СССР*. 1961;(7):5–161.
- Shcherbakov I.P., Chugunova R.V. Forests of the southwestern prilensky regions of Yakutia and measures to promote reforestation in cutting areas and burnt areas. *Proceedings of the Institute of Biology. Academy of Sciences USSR. Yakut Subsidiary of Siberian Branch*. 1961; (7):5–161. (In Russ.)
21. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. *Основные особенности растительного покрова Якутской АССР*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1987. 154 с.
- Andreev V.N., Galaktionova T.F., Perfil'eva V.I., Shcherbakov I.P. *The main features of the vegetation cover of the Yakut ASSR*. Yakutsk: Yakut Subsidiary of Siberian Branch, Academy of Sciences USSR; 1987. 154 p. (In Russ.)
22. Сукачев В.Н., Зонн С.В. *Методические указания к изучению типов леса*. М.: Изд-во АН СССР; 1961. 144 с.
- Sukachev V.N., Zonn S.V. *Guidelines for the study of forest types*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1961. 144 p. (In Russ.)
23. Побединский А.В. *Изучение лесовосстановительных процессов*. М.: Наука; 1966. 64 с.
- Pobedinsky A.V. *Study of reforestation processes*. Moscow: Nauka; 1966. 64 p. (In Russ.)
24. *Лесохозяйственный регламент ГУ «Вилюйское лесничество» Департамента по лесным отношениям Республики Саха (Якутия)*. Якутск: Федеральное государственное унитарное предприятие «Рослесинфорг»; 2018. 79 с. <https://hcvf.ru/en/node/28>
- Forestry Regulations of the State Institution "Vilyui Forestry" of the Department for Forest Relations of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Yakutsk: Federal State Unitary Enterprise «Roslesinform»; 2018. 79 p. (In Russ.). URL: <https://hcvf.ru/en/node/28>
25. Габышева Л.П. Характеристика сосновых лесов тукуланов Лено-Вилюйского междуречья. *Успехи современного естествознания*. 2020;(10): 7–13. <https://doi.org/10.17513/use.37483>
- Gabysheva L.P. Characteristics of pine forests of tukulans of the Lena-Vilyui interfluvium. *Advances in current natural sciences*, 2020;(10):7–13. <https://doi.org/10.17513/use.37483>
26. Матвеева Т.А. Влияние огня на сохранность почвенного запаса семян сосны и лиственницы. *Хвойные бореальной зоны*. 2020;XXXVIII(3-4):102–106.
- Matveeva T.A. Influence of fire on the safety of soil reserves of pine and larch seeds. *Conifers of the boreal area*. 2020; XXXVIII(3-4):102–106.

*Л. П. Габьшева ♦ Послепожарное лесовозобновление сосняков, прилегающих к тукуланам...*

*Об авторе*

ГАБЫШЕВА Людмила Петровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,  
<https://orcid.org/0000-0002-0537-2466>, РИНЦ AuthorID: 178378, e-mail: llp77@yandex.ru

*About the author*

GABYSHEVA, Lyudmila Petrovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, RISC AuthorID: 178378,  
<https://orcid.org/0000-0002-0537-2466>, e-mail: llp77@yandex.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 20.12.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 06.06.2023*

*Принята к публикации / Accepted 25.07.2023*

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.911

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

Оригинальная статья

### Наноструктурированные углеродные пленки, полученные методом осаждения в плазме $\text{CH}_4$ с последующей термообработкой: структурные особенности, их влияние на электрические и оптоэлектронные свойства

А. Р. Прокопьев<sup>✉</sup>, Е. П. Неустроев

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,  
г. Якутск, Российская Федерация  
<sup>✉</sup>[aisenprokopiev@mail.ru](mailto:aisenprokopiev@mail.ru)

#### Аннотация

В работе представлены результаты исследования структуры, электрических и оптоэлектронных свойств наноструктурированных углеродных пленок, полученных методом осаждения в плазме метана с последующей термообработкой. Показано, что условия получения пленок влияют на конечные физико-химические параметры. Изучение морфологии пленок проведено методами атомно-силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, рамановской и рентгеновской энергодисперсионной спектроскопии, анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ). Толщины пленок составляют от 20 до 150 нм с отношением содержания атомов углерода к атомам кислорода (C/O) 4:1. Исследования структуры показали, что полученные пленки состоят из нанографитовых чешуек, латеральные размеры которых лежат в диапазоне от 5 до 12 нм с различным соотношением  $sp^3/sp^2$  кристаллических фаз углерода. Установлено, что с увеличением температуры постплазменной термообработки от 650 до 800 °С повышается дефектность структуры углеродных пленок. В то же время растет степень графитизации, на что указывают данные рамановской спектроскопии и значения слоевых сопротивлений, определенные из ВАХ. Из температурных зависимостей ВАХ были вычислены значения фототоков, показавшие, что образцы проявляют фоточувствительность в диапазоне температур от комнатной температуры до  $-173$  °С. Данные результаты могут быть полезны при создании сенсоров дневного и ночного освещения, а также датчиков температуры, пригодных для использования в широком интервале температур.

**Ключевые слова:** наноструктурированная углеродная пленка, осаждение углерода в плазме, термообработка,  $sp^2$ -нанокристаллиты графита, температурная зависимость ВАХ, фототок, низкие температуры

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ FSRG-2022-0011) и гранта Главы РС(Я) для молодых ученых, специалистов и студентов «Получение углеродсодержащих пленочных покрытий, осажденных на различные поверхности в плазме метана».

**Для цитирования:** Прокопьев А.Р., Неустроев Е.П. Наноструктурированные углеродные пленки, полученные методом осаждения в плазме  $\text{CH}_4$  с последующей термообработкой: структурные особенности, их влияние на электрические и оптоэлектронные свойства. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):487–494. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

## **Nanostructured carbon films obtained by CH<sub>4</sub> plasma deposition and annealing at high temperature: structural features and their effects on electrical and optoelectronic properties**

**A. R. Prokopyev<sup>✉</sup>, E. P. Neustroev**

*Amnosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation*  
<sup>✉</sup>*aisenprokopyev@mail.ru*

### **Abstract**

This article is dedicated to the study of the structural, electrical, and optoelectronic properties of nanostructured carbon films obtained by methane plasma deposition, followed by annealing at high temperatures (650–800 °C). The conditions for obtaining the films affected the final physicochemical parameters. We studied the film morphology using atomic force microscopy, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy, X-ray energy-dispersive analysis, and analysis of the current voltage (C-V) characteristics. The film thickness ranged from 20 to 150 nm, with a C/O ratio of 4:1. Structural studies have shown that the resulting nanostructured carbon films consist mainly of nanographite flakes, the lateral dimensions of which lie in the lateral size (La) range of 5 to 12 nm, and contain different fractional concentrations of sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup> crystalline phases of carbon. We have established that with an increase in the annealing temperature, the defectiveness of the carbon film structure increases; however, at the same time, the degree of graphitization increases, as indicated by the Raman spectroscopy data and the calculated values of layer resistances from the C-V characteristics. The values of photocurrents were calculated, from which it was found that the samples exhibited photosensitivity in the temperature range of room temperature to –173 °C, based on the temperature dependences of the C-V. The obtained results can be useful in creating day and night light sensors as well as temperature sensors suitable for use at low temperatures.

**Keywords:** nanostructured carbon films, carbon deposition in plasma, annealing, sp<sup>2</sup>-nanocrystalline graphite, temperature dependencies of C-V, photocurrent, low temperatures

**Funding.** This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education (number FSRG-2022-001) and a grant from the Head of the Republic of Sakha (Yakutia) for young scientists, specialists and students “Production of carbon-containing film coatings deposited on various surfaces in methane plasma”.

**For citation:** Prokopyev A.R., Neustroev E.P. Nanostructured carbon films obtained by CH<sub>4</sub> plasma deposition and annealing at high temperature: structural features and their effects on electrical and optoelectronic properties. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):487–494. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-487-494>

### **Введение**

В связи с интенсивным промышленным и технологическим освоением территорий Крайнего Севера все острее ощущается потребность в пригодных для эксплуатации в условиях низких температур электронных сенсоров, в том числе датчиков освещения и температуры [1]. Основой для создания таких приборов могут быть различные конфигурации углерода, такие как графен, нанотрубки, аморфный углерод и др. К примеру, графен обладает уникальными оптическими характеристиками и имеет высокую подвижность носителей заряда [2]. Не решенные до настоящего времени технологические проблемы применения графена и углеродных нанотрубок (УНТ) в масштабируемом производстве электронных приборов ограничивают их использование [2, 3]. Успешную конкуренцию этим материалам при создании температурных и оптических

сенсоров могут составить наноструктурированные углеродные пленки (нсУП) с различным соотношением алмазных и графитовых (sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup>) фаз углерода, благодаря технологичности производства [4–6]. Углеродные фазы, находящиеся в состоянии различной степени sp<sup>n</sup>-гибридизации, определяют конечные физические и химические свойства материала [7]. Так, например, графитоподобная (GLC) фаза отличается более упорядоченной структурой и высокими показателями электропроводности [8, 9]. Напротив, алмазоподобная (DLC) фаза характеризуется высокой оптической прозрачностью и устойчивостью к механическим воздействиям [10–12]. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили чувствительность к температуре наноуглеродных покрытий, полученных методом плазменного осаждения в паровой фазе (PECVD) на поверхности твердотельных подложек [13–18].

В работе [19] авторы исследовали углеродные пленки с содержанием нанографеновых чешуек, которые показали высокую чувствительность к фототоку на освещение (0,35 А/Вт).

В настоящей работе исследуются оптические и электрические свойства нанографитовых чешуек, полученных с применением стандартных технологических процессов, включающих плазменное осаждение и термообработку.

### Экспериментальная часть

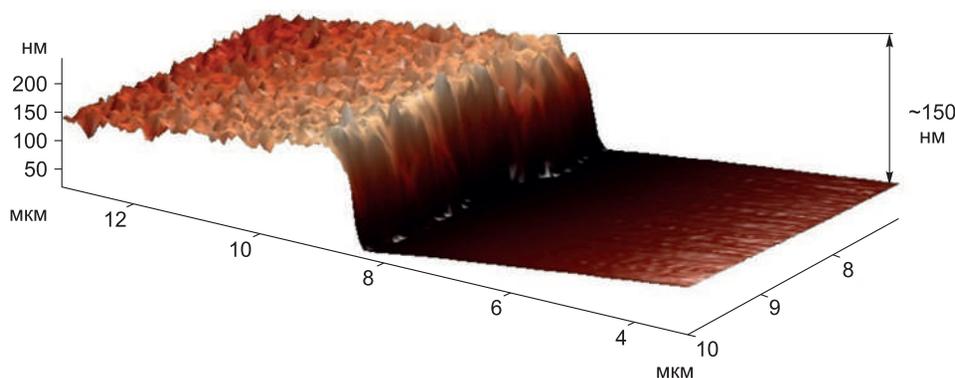
Наноструктурированные углеродные пленки были сформированы осаждением в плазме метана (CH<sub>4</sub>) с последующей термообработкой, подробно описанной авторами в работе [20]: мощность высокочастотного (13,56 МГц) индуктивного источника плазмы (ЭТНА-100-ПТ, Зеленоград, Россия) – 200 Вт, время осаждения атомов углерода на поверхности подложек кремния – до 9 мин. Нагрев образцов внутри реакционной камеры не превышал 50 °С. Камера предварительно откачивается до давлений, близких к 10<sup>-4</sup> мбар. Скорость потока CH<sub>4</sub> составляет 30 см<sup>3</sup>/мин. Рабочее давление в камере после запуска газа составляло около 0,0045 мбар. На втором этапе синтеза образцы были подвергнуты термообработке в атмосфере аргона (Ar) при следующих условиях: температура отжига (T<sub>отж</sub>) – от 650 до 800 °С, длительность – от 15 до 45 мин.

Для исследования структуры полученных пленок были использованы методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) (NTegra Spectra, Зеленоград, Россия) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Oxford Instruments, Великобритания), спектроскопия комбинационного рас-

сеяния света (КРС) (Ntegra Spectra, Зеленоград, Россия). Для возбуждения спектров КРС использовалось лазерное излучение с диаметром пучка 1 мкм и длиной волны 532 нм. Для определения элементного состава использована рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (РЭДС) (JEOL-7800F, Япония). Измерения температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) были проведены на установке АSEC-03 (Зеленоград, Россия). Для создания электрических контактов использовалась серебряная паста. Контакты были нанесены на поверхности сформированных пленок и высушены при температуре 120 °С в течение 20 мин. Для исследований фоточувствительности была использована галогеновая лампа мощностью 35 Вт с общим световым потоком 490 Лм.

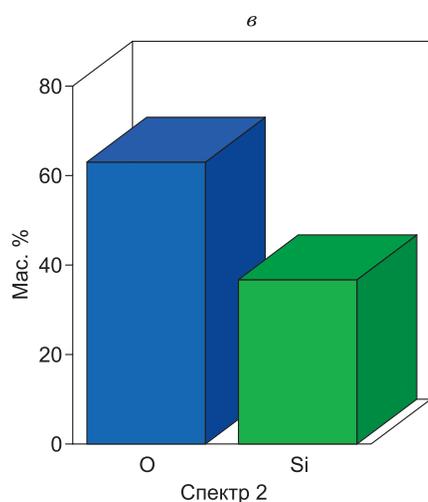
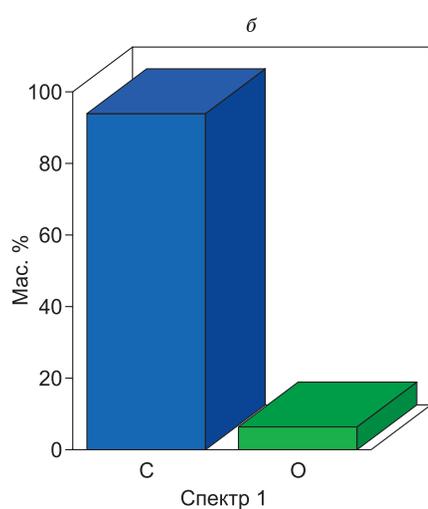
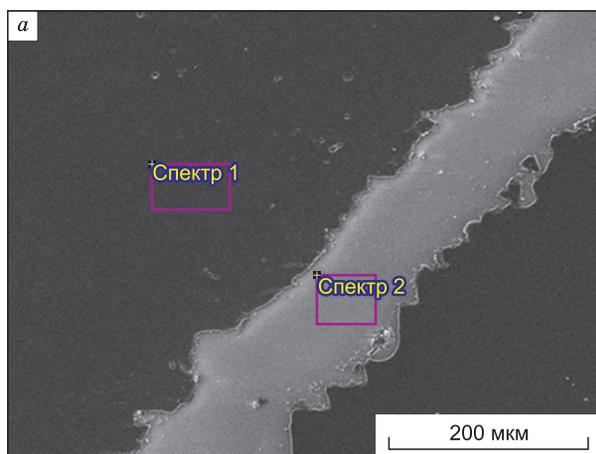
### Результаты

Для определения толщины синтезированных образцов были проделаны сколы шириной до нескольких десятков микрометров алмазным резцом, в результате с поверхности подложки были удалены полосы углеродной пленки. На границе между пленкой и подложкой методом АСМ были измерены высоты сформированных ступенек, соответствующие толщине сформированной углеродной пленки. Из полученных результатов следует, что пленки имеют толщину от 20 до 150 нм. Толщина пленок зависит как от условий плазменного осаждения (мощности плазмы и времени обработки), так и от параметров последующей термообработки (температуры и длительности). На рис. 1 приведено изображение 3D-профиля поверхности пленки (P = 200 Вт,



**Рис. 1.** АСМ-изображение границы раздела углеродная пленка/SiO<sub>2</sub>-подложка, сформированной плазменным осаждением в метане и последующей термообработкой при T = 650 °С, длительность 15 мин.

**Fig. 1.** AFM image of the interface carbon film/SiO<sub>2</sub>-substrate formed by plasma deposition in CH<sub>4</sub> and subsequent heat treatment at T = 650 °С for 15 min.



**Рис. 2.** СЭМ-изображение образца на  $\text{SiO}_2$ -подложке, сформированного при  $P=200$  Вт, 9 мин,  $650^\circ\text{C}$ , 30 мин. (а) и содержание химических элементов на пленке (б) и подложке (в), полученных методом РЭДС

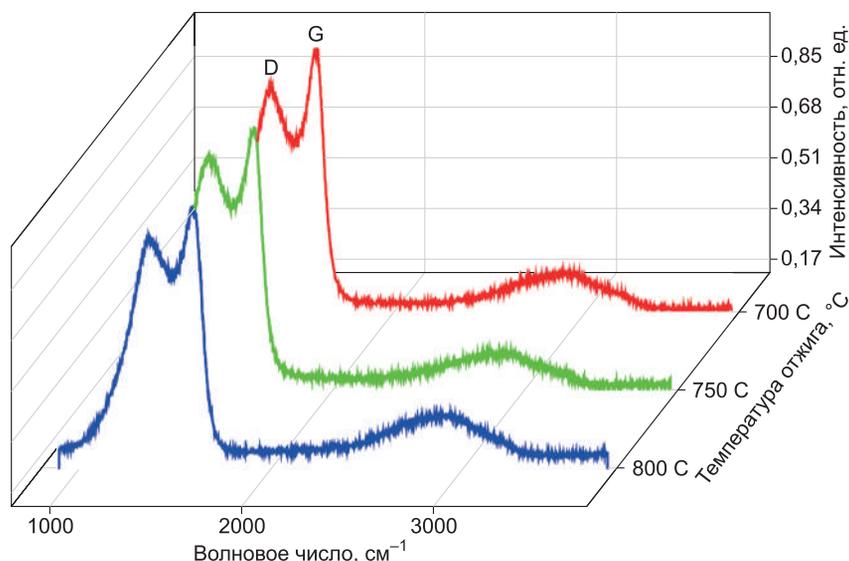
**Fig. 2.** a) SEM image of a sample on a  $\text{SiO}_2$  substrate formed at  $P = 200$  W, 9 min,  $650^\circ\text{C}$ , 30 min. Content of chemical elements on: б) film; в) substrate obtained by the EDS method

9 мин), сформированной при отжиге  $650^\circ\text{C}$ , 15 мин. Увеличение температуры и времени термообработки приводит к уменьшению толщины пленки, вплоть до полного удаления.

На рис. 2, а приведено изображение царапины на поверхности углеродной пленки, полученное методом СЭМ. Область, обозначенная на рисунке как «Спектр 1», соответствует углеродной пленке, «Спектр 2» – подложке. С помощью установленного на СЭМ JEOL-7800F анализатора РЭДС было обнаружено, что пленки в основном содержат атомы углерода и незначительное количество кислорода (O) (рис. 2, б). На месте царапины, как и ожидалось, состав соответствует подложке  $\text{SiO}_2$ .

В предыдущей нашей работе [21] было показано, что после проведения первого этапа синтеза (осаждения углерода в плазме метана) образуется пленка, соответствующая аморфной гидрогенизированной пленке углерода (a:C-H) с широкой полосой фотолуминесценции в диапазоне от  $1000\text{ см}^{-1}$  до  $3300\text{ см}^{-1}$ . После проведения второго этапа синтеза (термообработки) в спектрах КРС начинают отчетливо проявляться D- ( $\sim 1355\text{ см}^{-1}$ ) и G- ( $\sim 1590\text{ см}^{-1}$ ) пики, характерные для графит-содержащих структур [22–24]. Интенсивность D-пика зависит от дефектности структуры и интенсивности колебаний  $\text{sp}^3$ -гибридизированного углерода, в то время как интенсивность G-пика связана с «дыхательными» колебаниями  $\text{sp}^2$ -гибридизированного углерода в шестиугольных ячейках графена [22]. Следует отметить, что спектры КРС изменяются в зависимости от условий проведения термообработок. На рис. 3 представлены спектры КРС для образцов, термообработанных при температурах  $700$ ,  $750^\circ\text{C}$  с одинаковой длительностью 30 мин и  $800^\circ\text{C}$  длительностью 15 мин. Обнаружено, что увеличение температуры обработки приводит к росту отношения интегральной интенсивности D-пика к G-пику ( $I_D/I_G$ ) от 1,7 до 3,5 (см. таблицу). Природа данного эффекта может быть обусловлена ростом дефектности графеновых ячеек и/или изменением отношения  $\text{sp}^3/\text{sp}^2$  кристаллических фаз углерода в структуре пленки [22, 25]. В пользу последнего говорит факт смещения максимума G-пика от  $1590$  до  $1582\text{ см}^{-1}$  при увеличении температуры обработки, что связано с ростом доли  $\text{sp}^3$ -фазы в углеродной пленке [22–24].

Из найденных отношений интегральных интенсивностей пиков D и G можно оценить лате-



**Рис. 3.** КРС-спектры углеродных пленок, осажденных ( $P = 200$  Вт, 6 мин) на SiO<sub>2</sub>-подложки и термообработанных при 700, 750 °С длительностью 30 мин и 800 °С длительностью 15 мин.

**Fig. 3.** Raman spectra of carbon films deposited ( $P = 200$  W, 6 min) on SiO<sub>2</sub> substrates and post-annealed at 700 °C, 750 °C for 30 min and 800 °C for 15 min.

ральные размеры  $sp^2$ -нанокристаллитов графита [22–24] по формуле, предложенной в [24]:

$$L_a(\text{нм}) = (2,4 \cdot 10^{-10})\lambda^4 \left( \frac{I_D}{I_G} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения источника. Оценки показали, что латеральные размеры  $L_a$  нанографитовых доменов уменьшаются от 12 нм ( $T = 650$  °С) до 5 нм ( $T = 800$  °С) (см. таблицу). Такое уменьшение  $L_a$  также может быть причиной изменения соотношения кристаллических фаз в состояниях  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизаций в формируемых углеродных пленках [23, 24].

Из температурных зависимостей ВАХ, которые имели линейный вид (рис. 4, а), были опре-

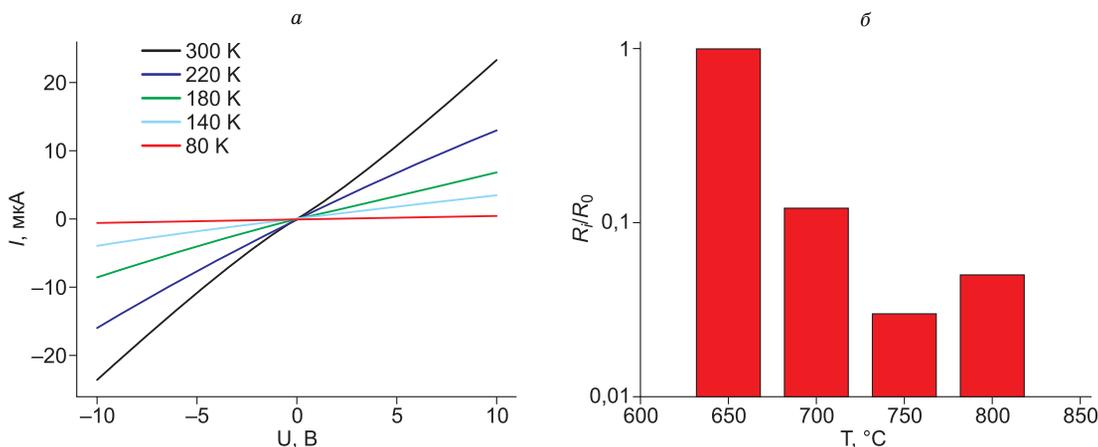
делены значения слоевых сопротивлений углеродных пленок в диапазоне температур от 80 до 300 К. Как показано на рис. 4, б, увеличение температуры термообработки от 650 до 750 °С на втором этапе синтеза пленок приводит к уменьшению относительного сопротивления  $R_i/R_0$ , где  $R_0$  – сопротивление пленки после термообработки при  $T = 650$  °С,  $R_i$  – сопротивление после обработки при различных температурах. При использовании 800-градусной обработки наблюдается незначительный рост сопротивления.

Из полученных результатов следует, что повышение электропроводности (до  $T = 750$  °С) сопровождается уменьшением размеров нанографитовых чешуек. Увеличение электропровод-

**Значения  $I_D/I_G$  образцов и вычисленных размеров нанографитовых доменов  $L_a$  в зависимости от условий формирования углеродных пленок**

**Values of  $I_D/I_G$  of samples and calculated sizes nanographite domains ( $L_a$ ) depending on the conditions of formation of carbon films**

Мощность и длительность осаждения	Температура, время отжига	$I_D/I_G$	$L_a$
P = 200 Вт, t = 9 мин	650 °С, 30 мин	1,7	12 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	700 °С, 30 мин	2,2	8 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	750 °С, 30 мин	2,5	7 нм
P = 200 Вт, t = 9 мин	800 °С, 15 мин	3,5	5 нм



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики исследованной пленки, сформированной при  $P = 200$  Вт, 6 мин,  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30 мин. (а), и график зависимости относительных сопротивлений углеродных пленок, сформированных при различных условиях отжига (б)

**Fig. 4.** a) C-V characteristics of the carbon films formed at  $P = 200$  W, 6 min,  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30 min; б) plot of relative resistances of carbon films formed under different annealing conditions

ности в этом случае может быть вызвано более эффективным формированием нанокристаллического углерода, как указано в работе Феррари и др. [22]. Можно предположить, что сформированные таким образом пленки, состоящие преимущественно из нанографитовых и графеновых чешуек, будут иметь более однородную структуру с относительно высокой электропроводностью. В то же время, увеличение сопротивления при температуре  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  может быть связано с уменьшением толщины формируемых пленок, сопровождаемым повышением дефектности. Следует отметить, что при увеличении времени обработки до 30 мин ( $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) исходные аморфные

углеродные пленки полностью удаляются с поверхности подложки.

Для исследования фоточувствительности исследуемых пленок на контакты измерительного зонда подавалось напряжение смещения 8 В. Путем включения и выключения источника света фиксировались изменения тока. Время реакции углеродной пленки на изменение освещения составляло  $\sim 0,1$  с. Фототоки ( $I_{\phi}$ ) были вычислены в соответствии с формулой

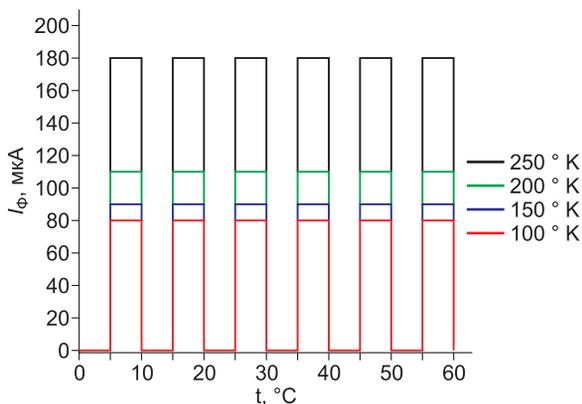
$$I_{\phi} = I_C - I_T,$$

где  $I_C$  – сила тока при освещении,  $I_T$  – сила тока при отсутствии освещения. На рис. 5 показаны изменения  $I_{\phi}$  при различных температурах.  $I_{\phi}$  возрастает от  $\sim 80$  мкА при температуре измерения 100 К до  $\sim 180$  мкА при 250 К. Наибольшие фототоки наблюдались после обработки при  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  на втором этапе синтеза.

Для оценки фоточувствительности и квантового выхода фотоэффекта был взят интегральный поток света (490 лм) галогеновой лампы с максимумом при  $\sim 550$  нм. Расчеты в первом приближении дают величины для фоточувствительности  $\sim 0,3$  мкА/Вт и квантового выхода  $\sim 10^{-3}$ . Наблюдаемую фоточувствительность сформированных углеродных пленок можно объяснить поглощением света в нанокристаллах графита и графена, формируемых в процессе термообработки.

### Заключение

Были исследованы наноструктурированные углеродные пленки, полученные осаждением в



**Рис. 5.** Графики зависимостей  $I_{\phi}$  углеродной пленки ( $P = 200$  Вт, 6 мин,  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30 мин) от температуры

**Fig. 5.** Dependences of the  $I_{ph}$  of a carbon film ( $P = 200$  W, 6 min,  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 30 min) on measurement temperature

плазме метана и последующей термообработкой в диапазоне от 650 до 800 °С. Из результатов АСМ измерений было обнаружено, что толщина сформированных пленок составила от 20 до 150 нм. Из измерений спектров КРС установлено, что углеродные пленки имеют основные типовые пики, относящиеся к графитсодержащим структурам. Из положения, а также из интегральных интенсивностей основных пиков D и G были оценены латеральные размеры sp<sup>2</sup>-нанокристаллитов графита, которые составили, в зависимости от условий получения, от 5 до 12 нм. Кроме того, установлено, что с ростом температуры отжига исходных а:С-Н пленок возрастает доля sp<sup>3</sup>/sp<sup>2</sup>-гибридизированного углерода в получаемых структурах. Также исследованы температурные зависимости фототоков, из которых было обнаружено, что фотоотклик полученных углеродных пленок сохраняется в диапазоне от комнатной температуры до –173 °С. Таким образом, из полученных результатов исследования следует, что представленные в работе наноструктурированные углеродные пленки могут применяться в качестве сенсоров температуры, а также фотодатчиков дневного и ночного освещения в условиях Арктики и Крайнего Севера.

### Список литературы / References

- Zeng Y. et al. Thermally conductive reduced graphene oxide thin films for extreme temperature sensors. *Advanced Functional Materials*. 2019;29(27):1901388. <https://doi.org/10.1002/adfm.201901388>.
- Neumaier D. et al. Integrating graphene into semiconductor fabrication lines. *Nature materials*. 2019;18(6):525–529. <https://doi.org/10.1038/s41563-019-0359-7>.
- Wang Z. et al. Recent advances in 3D graphene architectures and their composites for energy storage applications. *Small*. 2019;15(3):1803858. <https://doi.org/10.1002/sml.201803858>.
- Aslan N. Structural, photovoltaic and optoelectronic properties of graphene–amorphous carbon nanocomposite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021;32(12):16927–16936. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06254-1>.
- Yu D. et al. Scalable synthesis of hierarchically structured carbon nanotube–graphene fibers for capacitive energy storage. *Nature nanotechnology*. 2014;9(7):555–562. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0718-1>.
- Bezzon V.D.N. et al. Carbon nanostructure-based sensors: a brief review on recent advances. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019;2019:1–21. <https://doi.org/10.1155/2019/4293073>.
- Дроздов М.Н. и др. Анализ углеродсодержащих материалов методом вторично-ионной масс-спектрометрии: содержание атомов углерода в sp<sup>2</sup>-и sp<sup>3</sup>-гибридных состояниях. *Письма в Журнал технической физики*. 2020;46(6):38–42. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.06.49164.18151>.
- Drozdov M.N. i dr. SIMS Analysis of carbon-containing materials: content of carbon atoms in sp<sup>2</sup> and sp<sup>3</sup> hybridization states. *Technical Physics Letters*. 2020;46(6):38–42. (In Russ). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.06.49164.18151>.
- Христолюбова В.И. Особенности экспериментальных исследований модификации материалов ВЧ-плазмой пониженного давления. *Вестник Казанского технологического университета*. 2015;18(12):114–117.
- Hristolyubova V. I. Peculiarities of experimental studies of the modification of materials by low-pressure RF plasma. *Vestnik of Kazan Technology University*. 2015;18(12):114–117. (In Russ.)
- Li X. et al. Suppressing corrosion of aluminum foils via highly conductive graphene-like carbon coating in high-performance lithium-based batteries. *ACS applied materials & interfaces*. 2019;11(36):32826–32832. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06442>.
- Saleem M. et al. Humidity sensing properties of CNT–OD–VETP nanocomposite films. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2010;43(1):28–32. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2010.06.011>.
- Rajak D.K. et al. Diamond-like carbon (DLC) coatings: Classification, properties, and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(10):4445. <https://doi.org/10.3390/app11104445>.
- Kasiorowski T. et al. Microstructural and tribological characterization of DLC coatings deposited by plasma enhanced techniques on steel substrates. *Surface and Coatings Technology*. 2020;389:125615. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125615>.
- Kumar V. et al. Formation of carbon nanofilms on diamond for all-carbon based temperature and chemical sensor application. *Carbon*. 2011;49(4):1385–1394. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.12.004>.
- Muthuraja A. et al. Experimental investigation on chromium-diamond like carbon (Cr-DLC) coating through plasma enhanced chemical vapour deposition (PECVD) on the nozzle needle surface. *Diamond and Related Materials*. 2019;100:107588. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107588>.
- Chunjaemsri T. et al. Influence of RF power and CH<sub>4</sub> flow rate on properties of diamond-like carbon films deposited by PECVD technique. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020;176:109073. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109073>.
- Huang B. et al. Effect of deposition temperature on the microstructure and tribological properties of Si-DLC coatings prepared by PECVD. *Diamond and Related Materials*. 2022;129:109345. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109345>.
- Paramanik B., Das D. Synthesis of nanocrystalline diamond embedded diamond-like carbon films on

untreated glass substrates at low temperature using (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>+ H<sub>2</sub>) gas composition in microwave plasma CVD. *Applied Surface Science*. 2022;579:152132. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.152132>.

18. Jatti V.S. et al. Particle Deposition of Diamond-Like-Carbon on Silicon Wafers using Inductively Coupled PECVD. *Int. J. Thin Film. Sci. Tec.* 2022;11(2):233–238. <https://doi.org/10.18576/ijtfst/110211>.

19. Zhang X. et al. Bias-modulated high photoelectric response of graphene-nanocrystallite embedded carbon film coated on n-silicon. *Nanomaterials*. 2019;9(3):327. <https://doi.org/10.3390/nano9030327>.

20. Neustroev E.P. et al. Research of Properties of a Carbon Film Formed in Methane Plasma and the Following Annealing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1079(4):042086. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/4/042086>.

21. Неустроев Е.П., Прокопьев А.Р. Свойства нанографита, образованного плазменным осаждением и последующей термообработкой. *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019;11:629–635. <https://doi.org/10.26456/pcasenn/2019.11.629>.

Neustroev E.P., Prokopen A.R. Properties of Nanographite Formed by Plasma Deposition and Subsequent Heat Treatment. *Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2019;11:629-635. (In Russ.). <https://doi.org/10.26456/pcasenn/2019.11.629>.

22. Ferrari A.C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2004;362(1824):2477–2512. <https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>.

23. Sheka E.F., Golubev Y.A., Popova N.A. Graphene domain signature of Raman spectra of sp<sup>2</sup> amorphous carbons. *Nanomaterials*. 2020;10(10):2021. <https://doi.org/10.3390/nano10102021>.

24. Cançado L.G. et al. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied physics letters*. 2006; 88(16). <https://doi.org/10.1063/1.2196057>.

25. Yang W.J. et al. Structural characteristics of diamond-like nanocomposite films grown by PECVD. *Materials Letters*. 2003;57(21):3305–3310. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00053-3).

#### Об авторах

ПРОКОПЬЕВ Айсен Русланович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, Scopus AuthorID: 1127739, ResearcherID: GPP-2928-2022, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

НЕУСТРОЕВ Ефим Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, Scopus AuthorID: 32482, ResearcherID: A-3860-2014, e-mail: neustr@mail.ru

#### About the authors

PROKOPEV, Aisen Ruslanovich, Researcher, Scopus AuthorID: 1127739, ResearcherID: GPP-2928-2022, <https://orcid.org/0000-0002-2212-2485>, e-mail: aisenprokopiev@mail.ru

NEUSTROEV, Efim Petrovich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8163-2012>, Scopus AuthorID: 32482, ResearcherID: A-3860-2014, e-mail: neustr@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.07.2023

Принята к публикации / Accepted 27.07.2023

Оригинальная статья

## Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов

Т. М. Соловьев<sup>✉</sup>, Т. А. Исакова, В. В. Павлова, Г. В. Ботвин, А. А. Чириков,  
В. В. Петров, Е. С. Петухова

*Лаборатория технологий и переработки сырья мамонтовой фауны  
Якутского научного центра СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация  
<sup>✉</sup>tuskulsolovev@yandex.ru*

### Аннотация

В настоящее время, согласно существующей нормативной документации, определение сорта бивней мамонта (БМ) производится на основании их внешнего вида (целостность и геометрические параметры) без учета таких характеристик сырья, как особенности минерализации, механические свойства, влажность и пр. Однако, как показывает практика, данные характеристики БМ определяют подходы к хранению и косторезной обработке изучаемого сырья. Поэтому цель данной работы состояла в изучении особенностей минерализации и выявлении зависимостей между физико-механическими свойствами БМ и их сортом. В работе использованы образцы БМ I–IV сортов. Минеральный состав изучали методом рентгенофазового анализа. Определен показатель максимального влагонасыщения и исследована динамика изменения массы после просушивания в зависимости от сорта БМ, а также установлена зависимость физико-механических свойств различных сортов БМ от их влажности. Рентгенофазовый анализ показал, что БМ III и IV сортов отличаются от БМ I и II сортов наличием примесей фосфатных минералов. Установлено, что на показатель максимального водонасыщения и на характер потери влаги значительное влияние оказывает наличие трещин и пор в исследуемых образцах. Результаты исследования физико-механических свойств образцов БМ показали, что с увеличением содержания влаги прочность при сжатии снижается. Физико-механические свойства БМ практически не зависят от их сортности.

**Ключевые слова:** бивень мамонта, сортность бивня мамонта, рентгенофазовый анализ, минеральные примеси, максимальное водонасыщение, динамика потери влаги, прочность при сжатии

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (НИОКТР № 122042000008-5). Физико-механические испытания были проведены на базе ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН к.г.-м.н., с.н.с. Заякиной Н.В., к.б.н. вед. инж. Васильевой Т.И. за помощь в исследовании минерального состава БМ.

**Для цитирования:** Соловьев Т.М., Исакова Т.А., Павлова В.В., Ботвин Г.В., Чириков А.А., Петров В.В., Петухова Е.С. Минеральный состав и физико-механические свойства бивней мамонта различных сортов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(3):495–506. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506>

Original article

## Mineral composition, physical and mechanical properties of mammoth tusks of different grades

T. M. Solovev<sup>✉</sup>, T. A. Isakova, V. V. Pavlova, G. V. Botvin, A. A. Chirikov,  
V. V. Petrov, E. S. Petukhova

*Laboratory for Technologies and Processing of Raw Materials of Mammoth Fauna,  
Yakut Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation  
<sup>✉</sup>tuskulsolovev@yandex.ru*

### Abstract

According to current regulations, mammoth tusk (MT) grades are identified based on their appearance (integrity and geometric parameters), without considering their mineralization features, mechanical properties, and humidity. How-

ever, these characteristics specify approaches for the storage and bone cutting processing of raw materials. This study aimed to investigate the features of mineralization and the relationships between the physical and mechanical properties of MT and their grades. We studied MT samples from Grades I to IV. Their mineral compositions were determined using X-ray phase analysis. The indicators of maximum moisture saturation and dynamics of the change in mass after drying were identified according to the MT grade. The dependence of the physical and mechanical properties of various grades of MT on their moisture content was established. X-ray phase analysis revealed that MT Grades III and IV differed from Grades I and II in the presence of phosphate mineral impurities. We found that the presence of cracks and pores in the studied samples significantly affected the index of maximum water saturation and nature of moisture loss. The study of the physical and mechanical properties of the MT samples showed that with an increase in moisture content, the compressive strength decreased. We also proved that the physical and mechanical properties of MT did not depend on their grades.

**Keywords:** mammoth tusk, grade of mammoth tusk, X-ray phase analysis, mineral impurities, indicator of maximum water saturation, moisture loss dynamics, compressive strength

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (number 122042000008-5). Physical and mechanical tests were carried out at the Core Shared Research Facilities (CSRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (grant number 13.CSRF.21.0016).

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the employees of the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences: N.V. Zayakina, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, and T.I. Vasilyeva, Cand. Sci. (Biol.), Senior Engineer, for their help in studying the mineral composition of the mammoth tusks.

**For citation:** Solovov T.M., Isakova T.A., Pavlova V.V., Botvin G.V., Chirikov A.A., Petrov V.V., Petukhova E.S. Mineral composition, physical and mechanical properties of mammoth tusks of different grades. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(3):495–506. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-3-495-506>

## Введение

Бивень мамонта (БМ) (ископаемая мамонтовая кость (ИМК)) – сырье биогенного происхождения, в течение десятков тысяч лет захороняемое в толщах мерзлотных отложений, характеризуется чрезвычайно высокой чувствительностью к воздействию различных факторов окружающей среды [1–4]. В результате термоабразии берегов морей, рек и крупных тундровых озер с высокими ярами происходит разрушение реликтов позднелепистоценовой лессово-ледовой формации, в частности, едомного комплекса, с выпадением бивней и других костных остатков животных мамонтовой фауны из вмещающих пород во внешнюю среду, включая водные объекты [5]. Перепады температур, воздействие солнечного излучения, ветров, а также микробиологическое заражение приводят к достаточно быстрой деградации костного сырья, снижая его сортность вплоть до состояния, непригодного для обработки [6–11]. Следует отметить, что главным фактором, приводящим к растрескиванию тела БМ, является резкое снижение влажности материала, в особенности БМ, которые были добыты со дна водоемов и были изначально перенасыщены влагой [12].

В настоящее время определение сортности БМ проводится на основе разработанного Национальным мамонтовым фондом Республики Саха (Яку-

тия) и Всемирным музеем мамонта (г. Якутск) документа «Технические условия на ископаемый бивень и его обломки, добываемые на территории Республики Саха (Якутия) ТУ 421-001-92», а также с учетом более раннего документа «Кость мамонтовая в сырье, ТУ 41-07-006-81», использовавшегося СПО «Северкварцсамоцветы» в 1982–1984 гг. [13]

Согласно существующей нормативной документации [13], к I сорту относят БМ без повреждений, приведших к утратам (кроме прижизненных); вещество бивней сухое, без трещин, минимальный диаметр при выходе из альвеолы – 10 см; фрагменты без трещин, диаметр минимальный – 10 см, длина минимальная – 30 см (рис. 1).

Ко II сорту относят бивни целые или поврежденные с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с отдельными (не более трех) продольными трещинами глубиной до 30 % диаметра; диаметр минимальный – 7,5 см; фрагменты с трещинами (не более трех), диаметр минимальный – 7,5 см, длина минимальная – 20 см (рис. 2).

Бивни III сорта представляют собой бивни целые или поврежденные с утратами в альвеолярной и/или в свободной части; вещество бивней влажное или сухое, с несколькими продольными трещинами глубиной до 50 % диаметра и/или с концентрическими трещинами в краевой

зоне; диаметр минимальный – 5 см; длина минимальная – 10 см (рис. 3).

БМ IV сорта (синонимы: «несортовой материал», щепя) – это фрагменты бивней в виде обломков или щепы (редко – сильно разрушенные бивни) с многочисленными продольными и кольцевыми трещинами и расслоениями; гидроксипатит (костная ткань) и/или коллаген частично дегидратированы (обезвожены); параметры – без ограничений (рис. 4).

Таким образом, согласно имеющейся нормативной документации, отнесение БМ и их фрагментов к тому или иному сорту производится только на основании внешних признаков. Такой подход не учитывает особенности минерализации сырья, степень его влагонасыщения, а также механические характеристики материала. Ранее проведенные работы показали [1], что физико-механические свойства образцов БМ имеют обратную пропорциональную зависимость от влажности, причем наименее увлажненные образцы имеют



**Рис. 1.** Бивень мамонта I сорта

**Fig. 1.** Mammoth tusk: Grade I



**Рис. 2.** Бивень мамонта II сорта

**Fig. 2.** Mammoth tusk: Grade II



**Рис. 3.** Бивень мамонта III сорта

**Fig. 3.** Mammoth tusk: Grade III



**Рис. 4.** Бивень мамонта IV сорта

**Fig. 4.** Mammoth tusk: Grade IV

хрупкий характер разрушения при сжатии. Переработка такого сырья в изделия может привести к откалыванию фрагментов формируемого изделия либо к хрупкому разрушению при интенсивном механическом воздействии обрабатывающими

инструментами. Переувлажненный материал, в свою очередь, имеет склонность к растрескиванию при потере влаги, что может привести к быстрому разрушению сырья и изделий из него при высыхании. Влажность сырья определяется сре-

дой, из которой оно было извлечено. Длительное воздействие влаги (при залегании на дне водоемов) либо солнечного излучения в сочетании с воздушными потоками может оказать существенное влияние на механические и технологические свойства БМ, не оказывая влияние на их внешний вид. Исходя из вышесказанного, исследование зависимостей состава и физико-механических свойств БМ в зависимости от их сортности будет способствовать разработке интегрированного подхода к классификации данного вида сырья, учитывающего не только внешний вид фрагментов, но и среду, из которой сырье было извлечено, включая особенности минерализации и степень увлажненности. Следует отметить, что результаты подобных исследований в научной литературе практически не отражены.

### **Материалы и методы исследований**

Для исследования были приобретены образцы БМ различного сортов. Их внешний вид представлен на рисунках 1–4. Все исследуемые БМ после приобретения были обернуты в пищевую пленку и хранились в одинаковых условиях в морозильной камере при температуре  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Минеральный состав образцов БМ определяли методом рентгенофазового анализа (РФА). Исследование проводили на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия) при следующих условиях:  $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучение – 30 кВ, 10 мА; интервал  $4,5\text{--}65^{\circ}$  ( $2\theta$ ). Для идентификации минералов использована база данных PDF-2/Release 2011 RDB.

Как уже отмечалось, влажность материала БМ существенно влияет на его физико-механические свойства. Для выявления зависимости между влажностью, сортностью и физико-механическими свойствами были проведены исследования просушенных и переувлажненных (влагонасыщенных) образцов из БМ.

Для данных испытаний были подготовлены образцы кубической формы ( $1\times 1\times 1$  см). Образцы выпиливались из срединной части БМ (дентина) с использованием ленточной пилы.

Просушивание образцов осуществляли в сушильном шкафу при температуре  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до постоянной массы. Для контроля динамики потери массы при просушивании взвешивание осуществлялось после 1, 3, 6, 9 и 24 ч выдержки в сушильном шкафу. Для максимального влагонасыщения образцы БМ были помещены в водную среду на 6 недель. Взвешивание осуществлялось еже-

недельно. Перед взвешиванием образцы кондиционировали в течение 30 мин для удаления поверхностной влаги.

Трещинообразование оценивалось на основании изучения снимков, полученных с использованием цифрового микроскопа «ККМОООН G1200» (КНР) при увеличении в 28 раз.

Определение прочности при сжатии осуществляли на универсальной испытательной машине Z600 (Zwick/Roell, Германия) при следующих условиях: предварительная нагрузка – 40 Н; скорость приложения предварительной нагрузки – 10 мм/мин; скорость испытания – 1 мм/мин. При проведении испытаний учитывалась анизотропия исследуемого материала. Для этого часть образцов во время сжатия располагали так, чтобы нагрузка была направлена вдоль тела бивня, а часть образцов – поперек тела бивня. Для каждой серии испытаний количество образцов составляло не менее 5.

### **Результаты и обсуждение**

*Исследование состава минеральной части БМ.* Результаты исследования образцов из БМ различных сортов методом РФА представлены на рис. 5.

Установлено, что минеральный состав БМ практически не зависит от их сорта – основным компонентом, как было отмечено ранее [14], является магний замещенный гидроксиапатит (ГАП)  $(\text{Ca}_{10-x}\text{Mg}_x(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2)$ . Однако, в образцах БМ III и IV сортов кроме гидроксиапатита были обнаружены следы минерала ньюбериит  $(\text{Mg}(\text{PO}_3\text{OH})\cdot 3\text{H}_2\text{O})$ . Находки данного минерала в БМ в научной литературе известны. Было высказано предположение, что данный минерал может образовываться в бивне в условиях кислой среды ( $\text{pH} < 6,2$ ) и при высокой влажности в результате диссоциации ионов гидрофосфата и магния [15, 16].

Содержание другого минерала в виде примеси было выявлено в БМ, найденном в рамках экспедиционных работ на территории Нижнеколымского района (лицензионный участок Якутского научного центра СО РАН) в 2021 г. Обнаруженный образец представлял собой фрагмент БМ ориентировочно III сорта. Его внешняя часть имела синеватый оттенок. РФА порошка, полученного из внешнего минерализованного слоя, помимо основного компонента (гидроксиапатита), позволил по характерным пикам в области 11, 13, 28, 30 градусов  $2\theta$  установить наличие в виде примеси минерала вивианит  $(\text{Fe}^{2+}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O})$

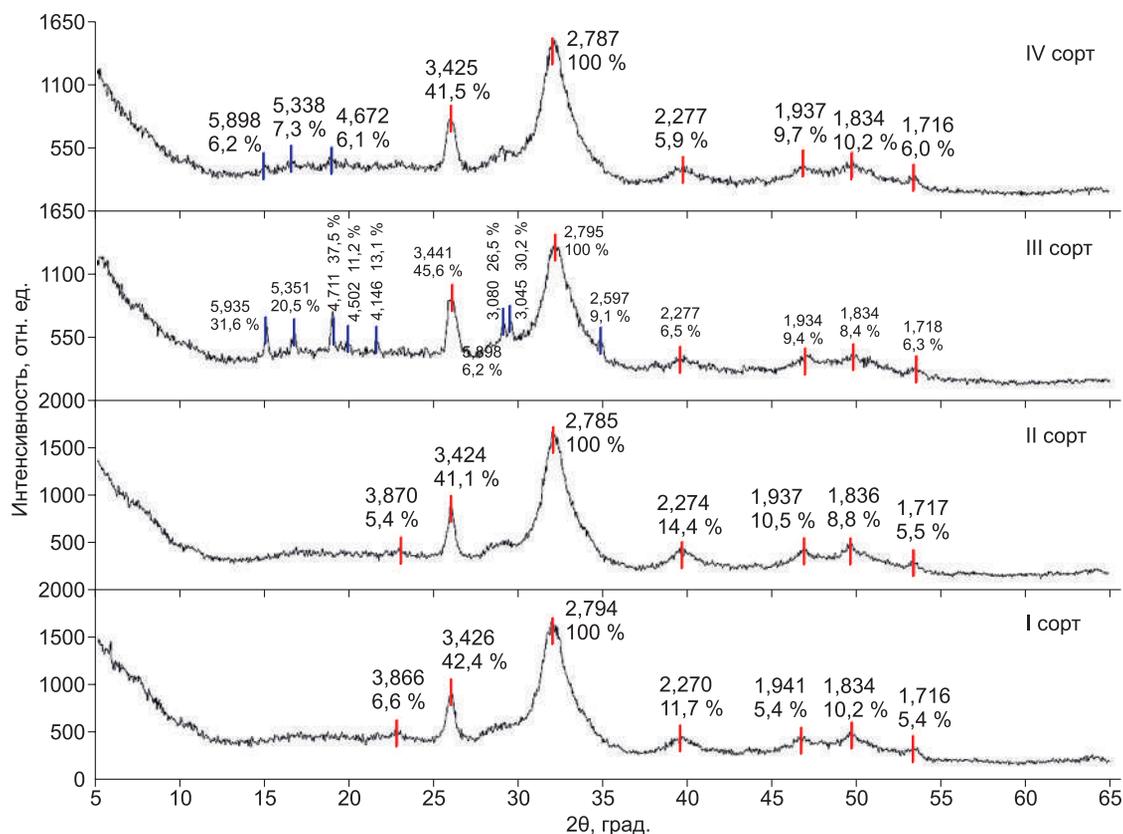


Рис. 5. Дифрактограммы образцов бивня мамонта разных сортов. Пики гидроксиапатита (красные полосы), ньубериита (синие)

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of mammoth tusk samples of different grades. Peaks of hydroxyapatite (red stripes), newburyite (blue)

(рис. 6). Вивианит – это бесцветный прозрачный минерал и известен тем, что при окислении окрашивается в темно-синий или сине-зеленый цвет. Чаще всего встречается как продукт выветривания на гидротермальных и пегматитовых месторождениях, в значительных количествах образуется в восстановительных условиях лимонитовой зоны осадочных сидеритовых месторождений железа и в низинных торфяных болотах. Однако его часто находят нарастающим на органические остатки или в составе окаменелостей – окаменелых костей и зубов животных [17].

Помимо ньубериита и вивианита, в литературе существуют сведения об обнаружении таких минералов, как метавивианит ( $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), сантабарбарайт ( $\text{Fe}^{3+}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), струвит ( $(\text{NH}_4)\text{Mg}(\text{PO}_4) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и бобьерит ( $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) [15, 16]. Причиной образования метавивианита и сантабарбарайта является окисление вивианита, т. е. по их содержанию можно также косвенно оценить степень

выветривания и окисления палеонтологического объекта [18]. В свою очередь, струвит и бобьерит склонны образовываться в условиях высокой влажности при наличии ионов аммония. В качестве источника ионов аммония может выступать, к примеру, органическая часть БМ – коллаген.

Таким образом, в зависимости от среды и условий залегания БМ степень его минерализации и состав минеральной составляющей могут существенно различаться. Систематическое изучение минерального состава БМ, учитывающее условия его залегания (вида грунта, свойства водной среды, pH среды и пр.), может способствовать развитию представлений об особенностях минерализации палеонтологических остатков, позволит оценивать особенности их залегания, определяющие подходы к их последующему сохранению и обработке.

Физико-механические испытания БМ. На рис. 7 представлены результаты исследования измене-

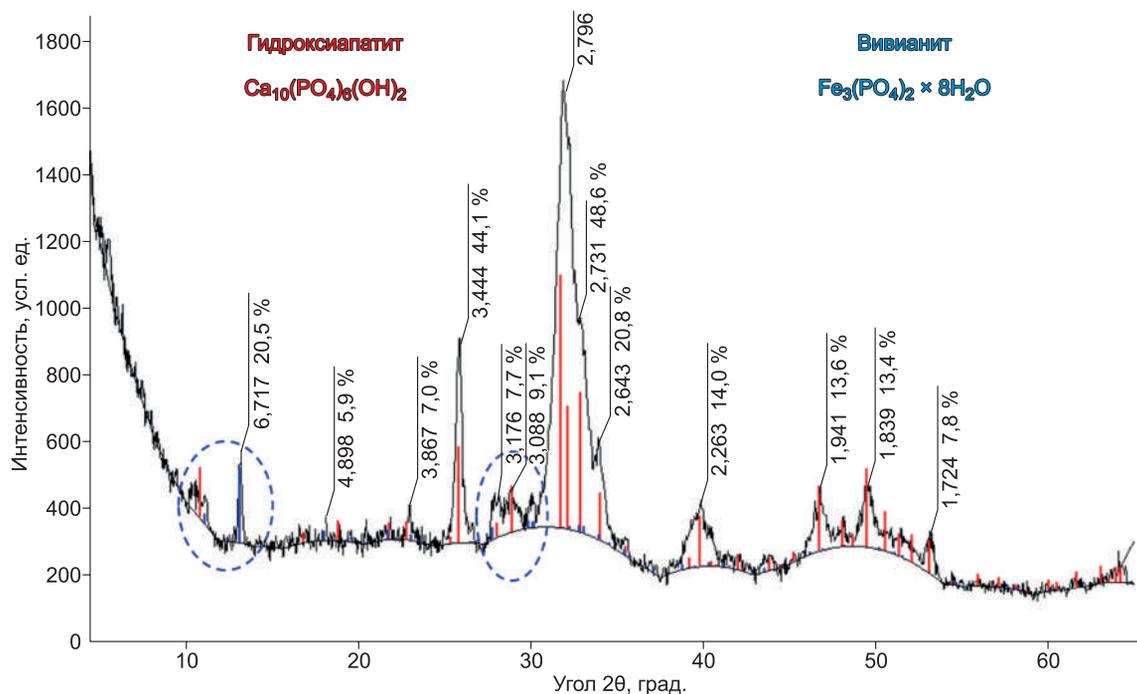


Рис. 6. Дифрактограмма коркового слоя найденного бивня мамонта

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the cortical layer of the found mammoth tusk

ния массы образцов БМ различного сорта после их просушивания при 60 °С. Отчетливой зависимости между сортностью БМ и особенностями влагопотери при просушивании не выявлено – наибольшая потеря массы зафиксирована у образцов II сорта (–8,2 %), наименьшая у образцов III сорта (–4,3 %). Полученный результат может быть обусловлен как условиями их залегания в природной среде, так и условиями их хранения у поставщика. В зависимости от условий залегания и последующего хранения, влага, адсорбированная на поверхности, в капиллярах и на других дефектных областях образцов, находилась в равновесном состоянии с окружающей средой.

Видно (см. рис. 7), что зависимость потери массы от продолжительности высушивания для образцов БМ III и IV сортов до 9 ч имеет линейный, а для БМ I и II сортов – нелинейный характер. Полученный результат обусловлен тем, что БМ III и IV сортов характеризуются наличием большого количества дефектов (см. рис. 3, 4), увеличивающих общую открытую поверхность, с которой может свободно испаряться влага при просушивании. БМ I и II сортов характеризуются более монолитной плотной структурой, и удаление влаги протекает через немногочисленные естественные микропоры.

Изучение трещинообразования после просушивания подтверждает полученный результат. После просушивания образцы БМ III и IV расщепались (рис. 8), что вызвано наличием изначальных дефектов в их структуре. Причем трещины выявлены уже после 1 ч выдержки в сушильном шкафу, с ростом продолжительности просушивания размер и количество трещин уве-

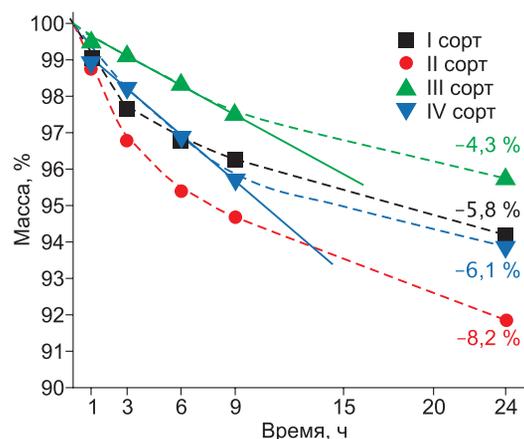


Рис. 7. Динамика изменения массы образцов БМ различного сорта при их просушивании при 60 °С

Fig. 7. Dynamics of the mass changing of MT samples of different grades during their drying at 60 °C

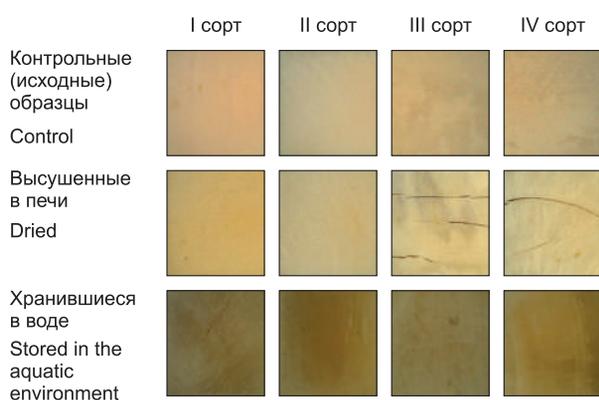


Рис. 8. Внешний вид

Fig. 8. Appearance of the samples

личиваются. БМ I и II сортов сохраняют свою целостность. Устойчивость данных образцов к термообработке обусловлена хорошо сохранившейся нативной структурой коллагена, выполняющего в костном материале роль связующего [19], в то время как коллаген в БМ III и IV сортов находится в более окисленном состоянии, что приводит к преждевременному разрушению образцов при нагревании [20, 21]. Именно поэтому при подготовке к косторезной обработке сушку БМ более высоких сортов рекомендуется проводить в мягких условиях в несколько этапов, обеспечивающих низкую скорость влагопотери для сохранения свойств коллагена [22, 23].

На рис. 9 представлены результаты исследования влагонасыщения образцов БМ различных сортов после выдержки в водной среде. Видно, что уже после 2 недель выдержки в водной среде образцы достигают максимального влагонасыщения. Установлено, что величина влагонасыщения напрямую зависит от сорта БМ – чем ниже сорт, тем больше влаги он может впитать. Так, наибольшим приростом массы характеризуются образцы III и IV сортов (+20,7 и +22,7%), а наименьшим – образцы I и II сортов (+11,3 и +12,9%). Полученный результат, возможно, обусловлен тем, что бивни III и IV сорта, как было отмечено ранее, из-за частичного разложения коллагена под воздействием агрессивных факторов окружающей среды, в том числе за счет действия микроорганизмов, имеют пористую дефектную микроструктуру, что, соответственно, обуславливает их способность поглотить наибольшее количество влаги. Трещин на поверх-

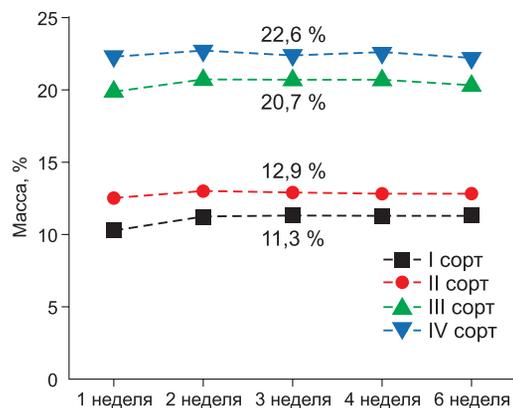


Рис. 9. Динамика изменения массы образцов БМ различного сорта при хранении их в водной среде

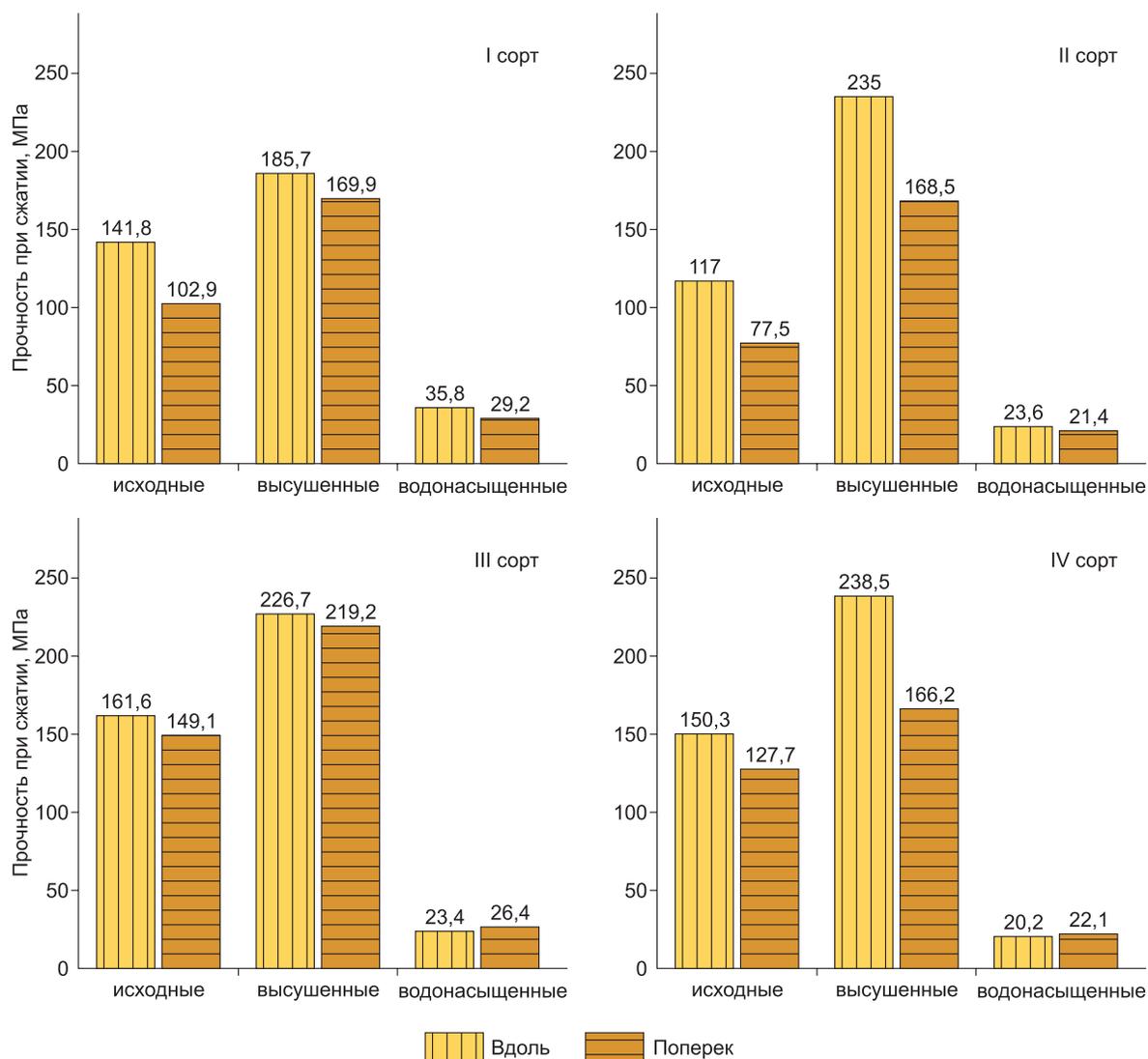
Fig. 9. Mass changing dynamics of MT samples of different grades during their storage in the aquatic environment

ности влагонасыщенных образцов (см. рис. 8) не выявлено, образцы приобрели темно-желтый оттенок. При визуальной оценке сортности влагонасыщенных образцов (извлеченных при добыче из водной среды) их внешний вид будет отвечать требованиям к сырью I и II сорта, однако, при хранении такие материалы быстро потеряют влагу и скрытые за счет влагонасыщения дефекты проявятся в виде интенсивного трещинообразования. Именно поэтому существующая визуальная методика классифицирования БМ неэффективна для сырья, извлеченного из водной среды.

На рис. 10 представлены результаты исследования прочности при сжатии контрольных, просушенных и влагонасыщенных образцов БМ. Поскольку БМ является анизотропным материалом, определения прочности осуществляли как в продольном, так и в поперечном телу бивня направлениях [24, 25].

Отчетливой зависимости между сортом БМ и его физико-механическими свойствами не выявлено (см. рис. 10). Прочность контрольных образцов колеблется в диапазоне 77–161 МПа, прочность просушенных образцов в 1,5–2 раза выше прочности контрольных образцов. Прочность в поперечном направлении в общем случае ниже определенной в продольном направлении. Прочность влагонасыщенных образцов в 4–7 раз ниже, по сравнению с контрольными образцами, анизотропия свойств практически не проявляется.

Сопоставление данных о влагопотере (см. рис. 7) с результатами определения прочности при сжатии контрольных образцов выявило следующую закономерность: образцы БМ II сор-



**Рис. 10.** Прочность при сжатии исходных, высушенных и водонасыщенных образцов БМ различной сортности  
**Fig. 10.** Compressive strength of the original, dried and water-saturated MT samples of different grades

та, характеризующиеся наибольшей влажностью (8,2 %), имеют самую низкую прочность (вдоль – 117, поперек – 77,5 МПа), а образцы БМ III сорта, характеризующиеся наименьшей влажностью (4,3 %), показали самое высокое значение прочности при сжатии (вдоль – 161,6, поперек – 149,1 МПа). Образцы БМ I и IV сортов, имеющие близкие показатели влажности (5,8 и 6,1 % соответственно), обладают также близкими значениями прочности при сжатии (вдоль – 141,8 и 150,3, поперек – 102,9 и 127,7 МПа соответственно).

Таким образом, показано: прочность БМ существенно зависит от их влажности. Полученный результат возможно использовать для опре-

деления среды, из которой был извлечен БМ. Низкий показатель прочности при сжатии будет свидетельствовать о том, что бивень был извлечен из водной среды, а высокий показатель – сырье залегало в слабовлажной или сухой среде (на открытом воздухе, в замороженных грунтах и пр.). Однако, как показывает практика, если материал бивня после извлечения из водной среды до исследования длительное время хранился в складских помещениях и успел просохнуть, его прочность вновь возрастет.

### Закключение

Таким образом, исследование состава и физико-механических свойств БМ в зависимости

от содержания влаги и сортности позволило сделать следующие основные выводы:

– исследование минерального состава БМ III–IV сортов показало, что, кроме ГАП, в составе внешней оболочки сырья присутствуют другие фосфатные минералы, состав которых зависит от свойств среды, в которой залегал бивень; в зависимости от состояния сырья минерализация может также подвергаться денитин бивня;

– зависимость скорости потери влаги БМ различных сортов при просушивании имеет различный характер: для БМ III–IV сортов характерна линейная зависимость, для БМ I–II сортов – нелинейная. Различный характер полученных зависимостей определяется микро- и макроструктурными характеристиками образцов – высокодефектное сырье имеет большую поверхность, способствующую быстрому испарению влаги; испарение влаги при просушивании высокосортных образцов происходит через естественные микрокапилляры и интенсифицируется с увеличением продолжительности теплового воздействия;

– исследование особенностей влагонасыщения показало, что объем воды, который может впитать образец, напрямую зависит от сорта БМ: чем ниже сорт БМ, тем больший прирост массы наблюдается при выдержке в водной среде; полученный результат также обусловлен дефектностью структуры исследуемого образца;

– показатель прочности при сжатии БМ существенно зависит от их влажности. Образцы, насыщенные водой, имеют в 4–7 раз более низкую прочность, а высушенные – в 1,5–2,5 раза более высокую прочность по сравнению с контрольными образцами.

### Список литературы / References

1. Соловьев Т.М., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Колесова Е.С., Петров В.В. Влияние условий хранения на физические свойства бивней мамонтов. *Все материалы. Энциклопедический словарь*. 2021;(11):14–19. <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2021-0-11-14-19>

Solovyev T.M., Petukhova E.S., Botvin G.V., Kolesova E.S., Petrov V.V. Influence of storage conditions on physical properties of mammoth ivories. *All materials. Encyclopaedic reference manual*. 2021;(11):14–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2021-0-11-14-19>.

2. Смирнов А.Н. Ископаемая мамонтовая кость: проблемы и перспективы изучения и освоения ресурсного потенциала в Российской Арктике. *Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена*. 2005;5(13):255–257.

Smirnov A.N. Fossil ivory: problems and perspectives of the studies and development of the resource po-

tential in the Russian Arctic. *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Sciences*. 2005;5(13):255–257. (In Russ.)

3. Смирнов А.Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в российской Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007;(4):21–29.

Smirnov A.N. The fossil ivory resource potential in the Russian Arctic. *Mineral resources of Russia. Economics and management*. 2007;(4):21–29. (In Russ.)

4. Кириллин Н.Д., Ноговицын Р.Р. Ископаемая мамонтовая кость – особый природный ресурс. *Наука и техника в Якутии*. 2018;1(18):19–23.

Kirillin N.D., Nogovitsin R.R. Fossil ivory is a special natural resource. *Nauka i tekhnika v Yakutii*. 2018;1(18):19–23. (In Russ.)

5. Керемясов Н.В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова: Серия Науки о Земле*. 2018;(2):5–18.

Keremyasov N.V. Methods and technologies of fossil mammoth bone search. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth sciences*. 2018;(2):5–18. (In Russ.)

6. Kendall C., Eriksen A.M., Kontopoulos I., Collins M.J., Turner-Walker G. Diagenesis of archaeological bone and tooth. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2018;491:21–37. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.11.041>

7. Fernandez-Jalvo Y., Sanchez-Chillon B., Andrews P., Fernandez-Lopez S., Alcalá Martínez L. Morphological taphonomic transformations of fossil bones in continental environments, and repercussions on their chemical composition. *Archaeometry*. 2002;44(3):353–361.

8. Hedges R.E.M. Bone diagenesis: an overview of processes. *Archaeometry*. 2002;44(3):319–328.

9. Matthiesen H., Eriksen A.M., Hollesen J., Collins M. Bone degradation at five Arctic archaeological sites: Quantifying the importance of burial environment and bone characteristics. *Journal of Archaeological Science*. 2021;125:105296. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2020.105296>

10. Guareschi E.E., Nicholls Ph.K., Evans N.Y., Barham M.B. et al. Bone diagenesis in the marine environment-I: Characterization and distribution of trace elements in terrestrial mammalian bones recovered from historic shipwrecks. *International Journal of Osteoarchaeology*. 2022;32(2):509–523. <https://doi.org/10.1002/oa.3072>

11. Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А. Особенности биоизражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):75–85. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75-85>

Isakova T.A., Petukhova E.S., Pavlova, V.V., Erofeevskaya L.A. Features of biological contamination of mammoth tusks during long-term storage in various con-

ditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021; 26(3):75–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75-85>

12. Guareschi E.E., Magni P.A., Berry H.G.G. Potential Issues in the Conservation of Bone and Teeth in Maritime Archaeology. *Heritage*. 2023;6(2):779–788. <https://doi.org/10.3390/heritage6020042>

13. *Об утверждении Концепции развития сбора, изучения, использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны на территории Республики Саха (Якутия)*. Распоряжение Главы РС(Я) №649-РГ от 13.08.2018.

*On approval of the Concept for the development of the collection, study, use, processing and sale of paleontological materials of the mammoth fauna in the Republic of Sakha (Yakutia)*. Order of the Head of the Republic of Sakha (Yakutia). №649-RG dt. 13.08.2018. (In Russ.)

14. Соловьев Т.М., Петухова Е.С., Ботвин Г.В., Исакова Т.А., Павлова В.В. Анализ состава и структуры бивня мамонта *Mammuthus primigenius* методами термогравиметрического и рентгенофазового анализа. *Материаловедение*. 2021;(2):9–12. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-2-9-12>

Solovlev T.M., Petukhova E.S., Botvin G.V., Isakova T.A., Pavlova V.V. Analysis of composition and structure of *Mammuthus primigenius* mammoth tusk by thermogrammetric and x-ray spectroscopy methods. *Materialovedenie*. 2021;(2):9–12 (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-2-9-12>

15. Freund A., Eggert G., Kutzke H., Barbier B. On the Occurrence of Magnesium Phosphates on Ivory. *Studies in Conservation*. 2002;(47):155–160.

16. Shen M., Lu Z., Xu Y., He X. Vivianite and its oxidation products in mammoth ivory and their implications to the burial process. *ACS Omega*. 2021;6(34):22284–22291. <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.1c02964>

17. *Вивианит*. [catalogmineralov.ru](http://catalogmineralov.ru); 2007. URL: <https://catalogmineralov.ru/mineral/vivianite.html> (дата обращения: 16.03.2023)

*Blue iron earth*; 2007. [catalogmineralov.ru](http://catalogmineralov.ru); URL: <https://catalogmineralov.ru/mineral/vivianite.html> (accessed: 16.03.2023)

18. Scott D. A., Eggert G. The vicissitudes of vivianite as pigment and corrosion product. *Stud. Conserv.* 2013;52:3–13.

19. Albéric M., Gourrier A., Wagermaier W., Fratzl P., Reiche I. The three-dimensional arrangement of the mineralized collagen fibers in elephant ivory and its relation to mechanical and optical properties. *Acta Biomaterialia*. 2018;72:342–351. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.02.016>

20. Дроздова Н.А., Насонова В.В. Влияние различных пищевых добавок и ингредиентов на технологические характеристики животных белков. *Теория и практика переработки мяса*. 2016;1(3):48–56.

Drozdova N.A., Nasonova V.V. Influence of different food additives and ingredients on the technological characteristics of animal proteins. *Theory and practice of meat processing*. 2016;1(3):48–56. (In Russ.)

21. Фадеев А.С., Ямпольская Г.П., Левачев С.М., Зайцев С.Ю. Денатурация монослоев коллагена на границе раздела вода–воздух: моделирование процесса. *Биологические мембраны*. 2008;25(2):142–154.

Fadeev A.S., Yampolskaya G.P., Levachev S.M., Zaytsev S.Yu. Denaturation of collagen monolayers at the water-air interface: process modeling. *Biologiceskie membrany*. 2008;25(2):142–154. (In Russ.)

22. Плотников В.В., Протопопов А.В., Петрова Т.Ф. Естественные методы консервации бивней мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799). *Северные архивы и экспедиции*. 2020;4(3):131–141. <https://doi.org/10.31806/2542-1158-2020-4-3-131-140>

Plotnikov V.V., Protopopov A.V., Petrova T.F. Natural methods for preserving mammoth tusks (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799). *Northern archives and expeditions*. 2020;4(3):131–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.31806/2542-1158-2020-4-3-131-140>

23. *Сушка бивня*. [rezbaderevo.ru](http://rezbaderevo.ru); 2020. URL: <https://rezbaderevo.ru/sushka-bivnya> (дата обращения: 16.03.2023)

*Drying tusk*; 2020. [rezbaderevo.ru](http://rezbaderevo.ru); URL: <https://rezbaderevo.ru/sushka-bivnya> (accessed: 16.03.2023)

24. Pfeifer S.J., Hartrampf W.L., Kahlke R.-D., Muller F.A. Mammoth ivory was the most suitable osseous raw material for the production of Late Pleistocene big game projectile points. *Scientific Reports*. 2019;9(1):1–10. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38779-1>

25. Vollrath F. Ivory as an Important Model Bio-composite. *Curator: The Museum Journal*. 2018;61(1):95–110. <http://dx.doi.org/10.1111/cura.12236>

#### Об авторах

СОЛОВЬЕВ Тускул Михайлович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7824-7623>, ResearcherID: A-8985-2019, Scopus AuthorID: 56766061100, РИНЦ AuthorID: 959304, e-mail: [tuskulsolovlev@yandex.ru](mailto:tuskulsolovlev@yandex.ru)

ИСАКОВА Татьяна Александровна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus AuthorID: 56233152900; РИНЦ AuthorID: 997578, e-mail: [tatyana\\_issakova@mail.ru](mailto:tatyana_issakova@mail.ru)

ПАВЛОВА Валерия Валериевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5390-5186>, ResearcherID: G-1242-2017, Scopus AuthorID: 57207732763, РИНЦ AuthorID: 922259, e-mail: [pavvaleriya-55@mail.ru](mailto:pavvaleriya-55@mail.ru)

БОТВИН Глеб Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7834-8144>, ResearcherID: A-8984-2019, Scopus AuthorID: 57193342926, РИНЦ AuthorID: 1050374, e-mail: [gleb-0379@mail.ru](mailto:gleb-0379@mail.ru)

ЧИРИКОВ Александр Александрович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1448-1891>, ResearcherID: AAZ-8527-2020, Scopus AuthorID: 57226573537, РИНЦ AuthorID: 1080866, e-mail: [4irikof@mail.ru](mailto:4irikof@mail.ru)

ПЕТРОВ Вячеслав Васильевич, технолог 2 категории, <https://orcid.org/0000-0002-6340-4120>, ResearcherID: AAO-6767-2021, РИНЦ AuthorID: 1086389, e-mail: [petrovkuraev@yandex.ru](mailto:petrovkuraev@yandex.ru)

ПЕТУХОВА Евгения Спартаковна, кандидат технических наук, и.о. зав. лаб, <https://orcid.org/0000-0002-2091-725X>, ResearcherID: A-5453-2014, Scopus AuthorID: 57189756749, РИНЦ AuthorID: 177616, e-mail: [evgspar@rambler.ru](mailto:evgspar@rambler.ru)

*About the authors*

SOLOVEV, Tuskul Michailovich, Cand. Sci. (Eng.), Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7824-7623>, ResearcherID: A-8985-2019, RISC AuthorID: 959304, e-mail: [tuskulsolovev@yandex.ru](mailto:tuskulsolovev@yandex.ru)

ISAKOVA, Tatyana Aleksandrovna, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3961-087X>, ResearcherID: A-9005-2019, Scopus AuthorID: 56233152900; RISC AuthorID: 997578, e-mail: [tatyana\\_issakova@mail.ru](mailto:tatyana_issakova@mail.ru)

PAVLOVA, Valeriya Valerievna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5390-5186>, ResearcherID: G-1242-2017, Scopus AuthorID: 57207732763, RISC AuthorID: 922259, e-mail: [pavvaleriya-55@mail.ru](mailto:pavvaleriya-55@mail.ru)

BOTVIN, Gleb Vladimirovich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7834-8144>, ResearcherID: A-8984-2019, Scopus AuthorID: 57193342926, RISC AuthorID: 1050374, e-mail: [gleb-0379@mail.ru](mailto:gleb-0379@mail.ru)

CHIRIKOV, Aleksandr Aleksandrovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1448-1891>, ResearcherID: AAZ-8527-2020, Scopus AuthorID: 57226573537, RISC AuthorID: 1080866, e-mail: [4irikof@mail.ru](mailto:4irikof@mail.ru)

PETROV, Vyacheslav Vasilevich, Technologist, <https://orcid.org/0000-0002-6340-4120>, ResearcherID: AAO-6767-2021, RISC AuthorID: 1086389, e-mail: [petrovkuraev@yandex.ru](mailto:petrovkuraev@yandex.ru)

PETUKHOVA, Evgeniia Spartakovna, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-2091-725X>, ResearcherID: A-5453-2014, Scopus AuthorID: 57189756749, RISC AuthorID: 177616, e-mail: [evgspar@rambler.ru](mailto:evgspar@rambler.ru)

*Поступила в редакцию / Submitted 21.03.2023*

*Поступила после рецензирования / Revised 25.08.2023*

*Принята к публикации / Accepted 02.09.2023*

---

## ПАМЯТЬ

---

### *Чугунов Афанасий Васильевич* (26.01.1938–23.06.2023)



23 июня 2023 г. скончался известный ученый в области разведения и селекции скота, породообразования и охраны генофонда местных пород животных на Крайнем Севере России, доктор сельскохозяйственных наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации и Республики Саха (Якутия), академик Академии наук РС(Я) Афанасий Васильевич Чугунов.

А.В. Чугунов родился 26 января 1938 г. в Мельжехсинском наслеге Мегино-Кангаласского района Якутской АССР. В 1961 г. в числе первых выпускников сельскохозяйственного факультета Якутского госуниверситета получил диплом зоотехника. В 1968 г. на ученом совете Вологодского молочного института Афанасий Васильевич защитил кандидатскую диссертацию. В 1983 г. успешно защитил докторскую диссертацию по теме «Хозяйственно-полезные признаки симментализированного скота Якутии, пути их повышения».

А.В. Чугунов обосновал новое направление – «экологизацию» региональной зоотехники, со-

провождающуюся изучением эколого-физиологического статуса (обмен веществ, терморегуляция, резистентность и этология) скота в экстремальных хозяйственных условиях Якутии. Им разработаны пути повышения продуктивности местной породы скота и охраны ее генофонда. Теоретические положения его работ легли в основу составления систем ведения животноводства в Якутии и программ селекционно-племенной работы по созданию зонального типа скота. А.В. Чугунов — автор более 200 научных трудов, в том числе шести монографий и пяти учебных пособий.

А.В. Чугунов был членом комиссии по присуждению Государственной премии в области науки и техники при Президенте РС(Я), председателем докторского совета при Якутской государственной сельскохозяйственной академии по специальности «частная зоотехния, технология производства продуктов животноводства», председателем ОУС по сельскохозяйственным наукам Академии наук РС(Я). Под его руководством подготовлено пять кандидатов и один доктор наук.

Профессор А.В. Чугунов, член Международной Академии аграрного образования, за более чем 60-летний срок работы в системе высшего аграрного образования республики подготовил тысячи специалистов сельского хозяйства. Он был инициатором организации и бессменным научным консультантом агрошкол республики.

А.В. Чугунов – лауреат Государственной премии РС(Я) в области науки и техники, награжден орденом Дружбы, Золотой медалью Академии наук РС(Я).

А.В. Чугунов – поэт, публицист, член Союза писателей РФ, Союза журналистов РФ с 1994 г. Его художественное творчество – поэтические сборники, проза заслужило признание читателей.

Память о замечательной личности, патриоте родной республики, Почетном гражданине Республики Саха (Якутия) и Мегино-Кангаласского улуса РС(Я) Афанасии Васильевиче Чугунове, внесшем большой вклад в развитие аграрной науки, подготовку высококвалифицированных кадров, социально-экономическое развитие Республики Саха (Якутия), навсегда останется в наших сердцах.

*Президент АН РС(Я)  
член-корреспондент РАН Л.Н. Владимиров*

**Григорьев Юрий Михайлович**  
**(18.07.1959–22.09.2023)**



22 августа 2023 г. на 65-м году жизни скончался известный ученый в области механики, математического моделирования природных и техногенных процессов, действительный член Академии наук РС(Я), д-р физ.-мат. наук Юрий Михайлович Григорьев.

Ю.М. Григорьев родился 18 июля 1959 г. в с. Антоновка Ленинского р-на Якутской АССР. После окончания в 1981 г. физического факультета Якутского госуниверситета он проходил стажировку и обучение в аспирантуре механико-математического факультета Новосибирского госуниверситета, которые завершились защитой кандидатской диссертации в 1985 г. в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. В 2000 г. он защитил докторскую диссертацию в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН на тему «Методы решения задач моделирования деформаций тел и электромагнитной совместимости».

Ю.М. Григорьевым разработана теория кватернионных функций как новый математический аппарат моделирования трехмерных задач математической физики, показана эффективность метода кватернионных функций при решении ряда задач в теории упругости.

Трудно переоценить вклад Ю.М. Григорьева в развитие науки и укрепление высшей школы в Республике Саха (Якутия). Он автор около 300 научных работ. Под его руководством выполнены ряд федеральных и международных грантов и проектов, защищены кандидатские диссертации. Юрий Михайлович уделял большое внимание проведению и организации олимпиад школьников и вовлечению их в научные исследования в республике.

О научном авторитете Ю.М. Григорьева свидетельствует его членство в ряде российских и международных научных советов, комитетов, диссертационных советов. Большая работа проведена Ю.М. Григорьевым в должности заместителя ректора по международной научно-технической деятельности СВФУ. Как член Академии наук РС(Я) он выполнял обязанности главного ученого секретаря, председателя ОУС по физико-техническим наукам, члена редколлегии ряда научных журналов. Как заместитель главного редактора внес много усилий в повышение статуса журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики».

Научные достижения Ю.М. Григорьева отмечены высокими званиями и наградами: «Заслуженный деятель науки РС(Я)», «Отличник образования РС(Я)», «Почетный работник высшего профессионального образования РФ» и др.

К глубокому сожалению, тяжелая болезнь унесла из наших рядов энергичного, полного новых планов и задумок, сильного, незаурядного человека, ученого, организатора науки и высшей школы. Светлая память о Юрии Михайловиче Григорьеве сохранится в сердцах его коллег и учеников.

*Президиум АН РС(Я)*  
*Редколлегия журнала*  
*«Природные ресурсы*  
*Арктики и Субарктики»*

Редактор *Н.А. Лившиц*  
Корректурa *З.А. Корнилова*  
Компьютерная верстка *З.И. Евсеев*  
Обложка *Б.В. Яковлев*

---

Дата выхода в свет 28.09.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая  
Усл. п.л. 17,4. Тираж 100 экз. Заказ № 365. Цена свободная.

---

**Адрес редакции:**

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, <https://nras.asrsya.ru>

**Адрес издателя:**

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,  
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: [anrsya@mail.ru](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)

