

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2023, Том 28, № 2

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

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

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

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

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

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

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

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2023, Vol. 28, No. 2

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

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)
Subscription Index in the Russian Post Catalogue – ПР046
Enlisted in the Catalogue of Leading Scientific Journals
of the Higher Attestation Commission, RF (22.12.2020)
Included in the Russian Science Citation Index database (RSCI)

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

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Науки о Земле

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

Биологические науки

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

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

Biological Sciences

George Archibald – Dr., International Crane Foundation, Baraboo, USA
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. Okhlopova – Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia
M.H. Salakhov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

<i>Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М.</i> Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбон-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопроявления скандия.....	187
<i>Акулов Н.И., Гладков А.С., Громова И.А.</i> Алмазоносность нижнекаменноугольных отложений западной части Сибирской платформы.....	202
<i>Шахурдина Н.К., Тарских О.В., Колесник А.Ю.</i> Методика среднемасштабного минералогического районирования при поисковых работах на алмазы (на примере Ыгыаттинской площади) (Западная Якутия).....	223

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Павлова Н.А., Шепелев В.В., Данзанова М.В., Иванова Л.Д., Ефремова В.А.</i> Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования	236
<i>Петров М.И., Федоров А.Н.</i> Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии	248
<i>Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н.</i> Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабен (Южная Якутия).....	261

Биологические науки

Экология

<i>Данилова Н.С., Борисова С.З., Егорова Н.Н., Андросова Д.Н., Андреева С.Н.</i> Фенологический отклик некоторых видов рода <i>Allium</i> на изменения климата в Центральной Якутии.....	275
<i>Шашурин М.М., Журавская А.Н.</i> Выживаемость и прооксидантно-антиоксидантная система проростков семян растений Якутии, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции	283
<i>Чудновская Г.В., Чернакова О.В.</i> Флуктуирующая асимметрия листа <i>Acer negundo</i> L. как индикатор состояния организма и качества городской среды	293

Биологические ресурсы

<i>Мамаев Н.В.</i> Индивидуальный участок обитания и суточные перемещения самца бурого медведя (<i>Ursus arctos</i>) в условиях средней тайги Якутии по результатам применения спутниковых GPS-ошейников.....	303
<i>Сленцов Ю.А.</i> Распространение и численность полевого (<i>Passer montanus</i>) и домового (<i>Passer domesticus</i>) воробьев в Магаданской области	312
<i>Мочалова О.А., Андриянова Е.А., Хорева М.Г.</i> Водная флора высокогорных озер юго-восточной части хребта Черского в пределах бассейна верхнего течения р. Колыма	323

Материаловедение и химические технологии

- Григорьев Ю.М., Яковлев А.М.* Об одном специальном случае трансверсально-изотропного упругого материала, примененного для многолетнемерзлых пород 337
- Мухин В.В., Петрова Н.Н., Лазарева Н.Н., Данилова С.Н., Шадрин Н.В.* Влияние состава и технологии изготовления композиций на структуру и свойства морозостойких резин на основе смесей полярных и неполярных каучуков..... 346

Конференции

- Обсуждение проблем изменения климата и таяния вечной мерзлоты 358

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

- Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M.* Formation and formation-fracture oxidation in Carbon-Permian sediments and ancient weathering crust of Western Yakutia and related scandium ore occurrences 187
- Akulov N.I., Gladkov A.S., Gromova I.A.* Diamond potential of the lower carboniferous deposits on the western part of the Siberian Platform 202
- Shakhurdina N.K., Tarskikh O.V., Kolesnik A.Yu.* The method of medium-scale mineralogical mapping during diamond searching: a case study in the Ygyatta Region (Western Yakutia)..... 223

Engineering geology, permafrost and soil science

- Pavlova N.A., Shepelev V.V., Danzanova M.V., Ivanova L.D., Efremova V.A.* Mineral medicinal groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use..... 236
- Petrov M.I., Fedorov A.N.* Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia..... 248
- Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N.* Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia)..... 261

Biological sciences

Ecology

- Danilova N.S., Borisova S.Z., Egorova N.N., Androsova D.N., Andreeva S.N.* Phenological response of some species of the genus *Allium* to climate change in Central Yakutia..... 275
- Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N.* Survival rates and pro-oxidant-antioxidant systems of germinated Yakutian plant seeds pretreated with super-weak constant magnetic fields of different flux densities..... 283
- Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V.* Fluctuating asymmetry of the *Acer negundo* L. leaf : an indicator of its state and the quality of the urban environment..... 293

Biological resources

- Mamaev N.V.* Individual home range and daily movements of the male brown bear (*Ursus arctos*) in the middle taiga of Yakutia based on the results of GPS satellite collars..... 303
- Sleptsov Yu.A.* Number and distribution of tree (*Passer montanus*) and house (*Passer domesticus*) sparrows in the Magadan Region..... 312
- Mochalova O.A., Andrianova E.A., Khoreva M.G.* Aquatic flora of the high-mountain lakes in the southeastern part of the Chersky Ridge within the basin of the upper Kolyma River..... 323

Materials science and chemical technologies

- Grigor'ev Yu.M., Yakovlev A.M.* Transversally isotropic elastic material applicable for permafrost rocks: a case study..... 337

<i>Mukhin V.V., Petrova N.N., Lazareva N.N., Danilova S.N., Shadrinov N.V.</i> Composition and technology effect on the structure and properties of frost-resistant elastomeric materials based on blends of polar and nonpolar rubbers	346
---	-----

Conferences

Discussion of climate change and permafrost thawing.....	358
--	-----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 553.493.67: 553.81(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

Оригинальная статья

Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбон-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопроявления скандия

П. А. Игнатов[✉], Р. У. Еременко¹, А. В. Толстов², И. М. Овчинников³

¹*Российский государственный геологоразведочный университет
им. Серго Орджоникидзе, г. Москва, Российская Федерация*

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

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

[✉]petrignatov@gmail.com

Аннотация

В пределах поисковых на алмазы площадей Улахан-Курунг-Юрях и Бестях Мало-Ботуобинского района и в Сюльдюкарском кимберлитовом поле Ыгыаттинского района выявлены признаки древнего пластового окисления в сероцветных и угленосных терригенных карбон-пермских отложениях и трещинно-пластового окисления на породах подстилающей каменноугольной коры выветривания, распространенной на карбонатно-терригенных отложениях верхнего кембрия. Процессы формирования зон пластового окисления подтверждены данными по распределению и корреляции U и Th, Sc и V. Предположение о рудоформирующем значении древних инфильтрационных гипергенных процессов подтверждено установленными по данным рентгенофлуоресцентных анализов концентрациями Sc в каменноугольных и триас-юрских корях выветривания и отложениях позднего палеозоя на площади Улахан-Курунг-Юрях, в Сюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях. В последних выделены перспективные рудопроявления Sc в древних корях выветривания, развитых по кимберлитам и среднепалеозойским базитам. Особый интерес представляет серия рудопроявлений Sc в районе деятельности алмазодобывающего Нюрбинского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО).

Ключевые слова: древний гипергенез, зоны пластового и грунтового окисления, коры выветривания, скандий, кимберлиты, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках исследований МГРИ по гранту Российского научного фонда (№ 23-27-00280 от 13.01.23).

Для цитирования: Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Пластовое и пластово-трещинное окисление в карбон-пермских отложениях и древней коре выветривания Западной Якутии и связанные с ним рудопроявления скандия. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):187–201. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

Formation and formation-fracture oxidation in Carbon-Permian sediments and ancient weathering crust of Western Yakutia and related scandium ore occurrences

P. A. Ignatov[✉], R. U. Eremenko¹, A. V. Tolstov², I. M. Ovchinnikov³

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation,

²Diamond and Precious Metal Geology Institute,

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

³AK "ALROSA" (PAO), Mirny, Russian Federation

[✉]petrignatov@gmail.com

Abstract

Within the areas of Ulakhan-Kurung-Yuryakh and Bestyakh of the Malo-Botuobinsky district, and in the Syuldyukar kimberlite field of the Ygyattinsky district, the carbonate-terrigenous deposits of the Upper Cambrian period revealed signs of ancient formation-oxidation in the gray-colored and coal-bearing, terrigenous carbon-Permian deposits, and fractured formation-oxidation commonly found on rocks of the underlying carboniferous weather crust. The data on the distribution and correlation of U and Th, Sc, and V confirmed the formation of the oxidation zone. The ore-forming significance of ancient infiltration hypergenic processes was confirmed by X-ray fluorescence analysis of Sc concentration in the Carboniferous and Triassic-Jurassic weathering crusts, and the Late Paleozoic sediments, in the Ulakhan-Kurung-Jurassic area, the Syuldyukar and Nakyn diamond-bearing fields. In the latter, we identified promising Sc ore occurrences in the ancient weathering crusts developed by kimberlites and Middle Paleozoic basites. The series of Sc ore occurrences are of particular interest in the diamond mining area of Nyurbinsky GOK AK ALROSA (PAO).

Keywords: ancient hypergenesis, zones of formation and soil oxidation, weathering crusts, scandium, kimberlites, Yakutia

Funding. This study was carried out within the research project of the Russian State University for Geological Prospecting and supported by the Russian Science Foundation (grant number 23-27-00280, dated 13.01.23).

For citation: Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Formation and formation-fracture oxidation in Carbon-Permian sediments and ancient weathering crust of Western Yakutia and related scandium ore occurrences. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):187–201. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-187-201>

Введение

В Мало-Ботуобинском и Ыгыаттинском алмазоносных районах Якутии, как и во всей западной Якутии, широко распространены горизонтально залегающие терригенные угленосные отложения карбона–перми. Они с несогласием перекрывают терригенно-карбонатные морские отложения раннего палеозоя, включающие силлы и дайки среднепалеозойских траппов, тела кимберлитов эруптивных брекчий базитов и коры выветривания каменноугольного возраста. На многих площадях они перекрыты туфами и силлами триасовых траппов и юрскими тонкообломочными морскими отложениями. Авторами подробно изучены разрезы нижнего и верхнего палеозоя на северо-западе и севере Мало-Ботуобинского района в пределах площадей Улахан-Курунг-Юрях и Бестях, в Сюльдюкарском поле Ыгыаттинского

и в Накынском поле Средне-Мархинского районов. В угленосных отложениях перми и подстилающих корях выветривания установлены признаки древнего пластового и пластово-трещинного окисления, с которым связаны высокие концентрации скандия и других ценных металлов. Это открывает перспективы обнаружения месторождений высоколиквидных полезных ископаемых в алмазоносных районах Якутии: редких земель, кобальта, никеля и скандия, потребление и рынок которого, предположительно, будут расти ежегодно по 7,6 %, согласно отчету IMARC Group [1].

Методы и материалы

Признаки пластового окисления в угленосных отложениях перми выявлены на площадях Мало-Ботуобинского и Ыгыаттинского алмазоносных районов Якутии, отстоящих на сотни километров (рис. 1), что указывает на масштабное про-

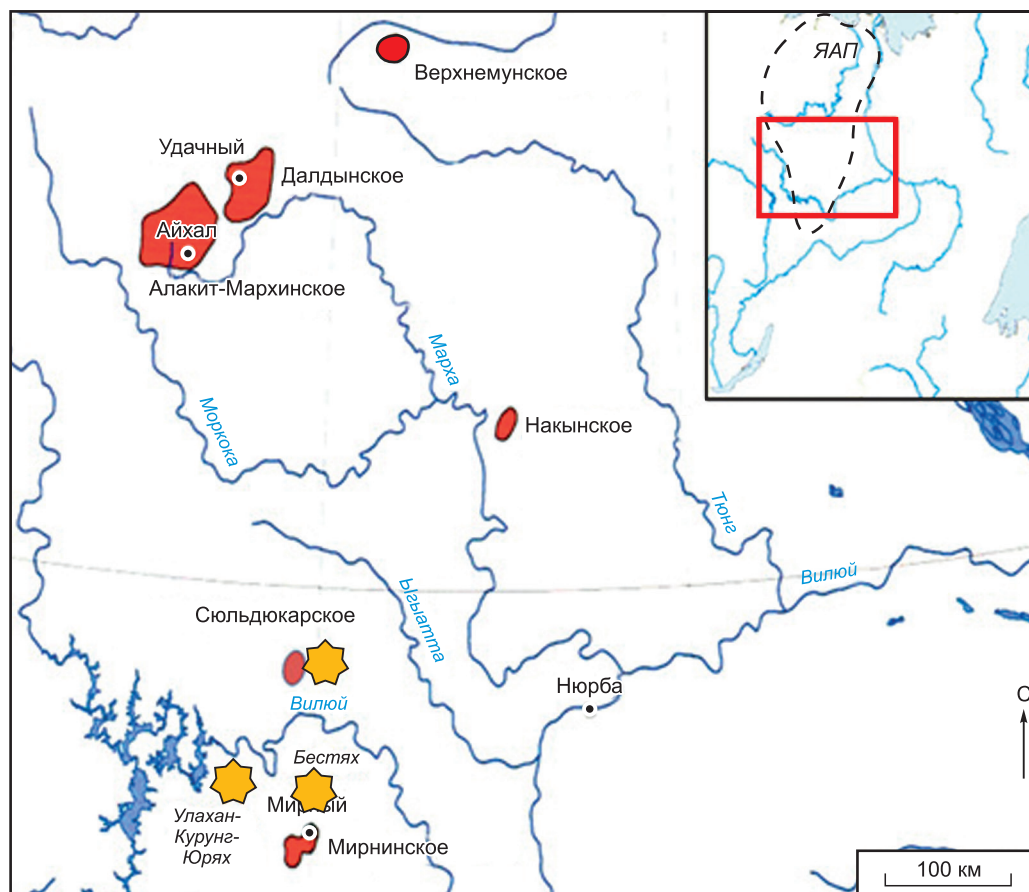


Рис. 1. Положение площадей, в которых детально изучены разрезы палеозоя на схеме кимберлитовых полей юга Якутской провинции (по [2]). Оранжевой звездочкой отмечено проявление зон пластового окисления пород карбона–перми и триас-юрской коры выветривания (Накынское поле)

Fig. 1. The position of the areas in which Paleozoic sections have been studied in detail on the scheme of kimberlite fields in the south of the Yakut province (according to [2]). An orange asterisk marks the manifestation of zones of formation oxidation of carboniferous Permian and Triassic-Jurassic weathering crust rocks (Nakyn field)

явление древних гипергенных процессов. Признаки пластово-трещинного окисления в корях выветривания каменноугольного возраста отмечены в указанных районах, а в корях выветривания поздне триас–раннеюрского возраста – в Накынском алмазоносном поле Средне-Мархинского района. Таким образом, проявления древних эпигенетических процессов широко проявлены в Западной Якутии.

Площадь Улахан-Курунг-Юрях занимает 8,2 км². Здесь задокументировано 244 разреза по керну достаточно плотной сети поискового бурения (от 200×200 до 100×100 м). В ее пределах во многих разрезах карбонатно-тонкообломочные морские отложения верхнекембрийской холомо-лохской свиты покрыты образованиями древней коры выветривания, перекрытыми сероцветными песчаными каменноугольными отложениями ботуобинской свиты, пермскими угленосными

отложениями боруллойской свиты и сероцветными песчаными отложениями юры (рис. 2).

Рассматриваемая площадь является частью крупного неоген-четвертичного поднятия Маревое, которое унаследовано с позднего палеозоя, поскольку здесь резко сокращены до первых десятков метров разрезы карбона–перми и юры [3]. Севернее Маревского поднятия известна похожая Нижне-Ботуобинская положительная морфоструктура. В пределах этих структур широко распространены коры выветривания каменноугольного возраста, которые развиты как по осадочным породам кембрия и ордовика, так и по прорывающим их телам среднепалеозойских траппов [4].

Минеральный состав, литолого-фациальные характеристики и палеогеографические условия накопления карбон-пермских отложений Западной Якутии хорошо изучены и опублико-

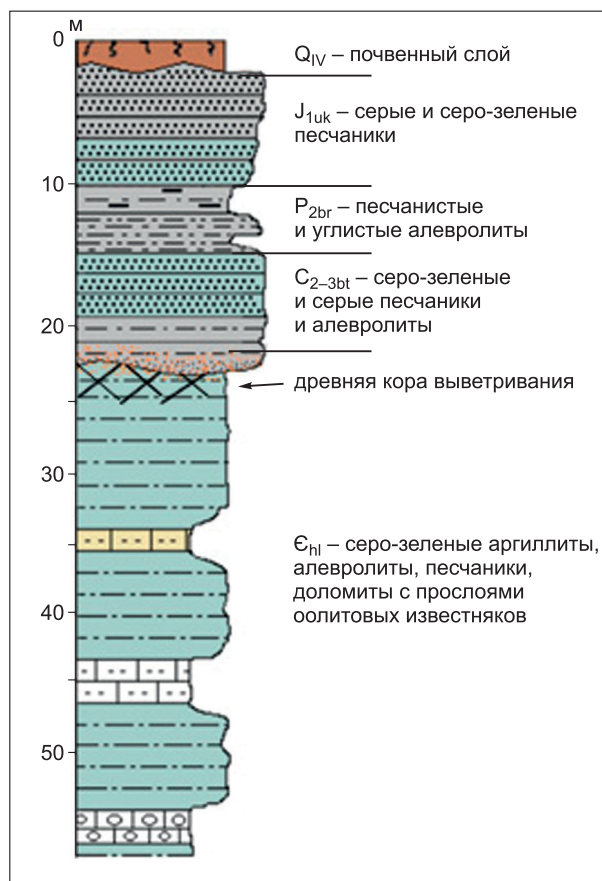


Рис. 2. Разрез по скважине 74,925–224,5 на площади Улахан-Курунг-Юрях

Fig. 2. Well section 74,925–224,5 in the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area

ваны в работах В.П. Афанасьева, И.И. Антипина, Е.Н. Белова, Н.Н. Зинчука, И.Е. Калмыкова, Б.А. Коробкова, М.В. Куликова, С.Ф. Павлова, В.Г. Подвысоцкого, О.Г. Салтыкова, В.Н. Устинова, Ю.М. Эринчека и др. Однако, до сих пор для этих толщ не были отмечены признаки эпигенетического окисления. Такие признаки авторы обнаружили в рассматриваемых первично сероцветных породах верхнего палеозоя и в захороненной коре выветривания каменноугольного возраста. Подобные образования выявлены и в разрезах поисковой площади Бестях. С этими образованиями связаны концентрации скандия и сопутствующих металлов, чему и посвящена предлагаемая статья.

Результаты и обсуждение

Признаки зон внутрипластового окисления (ЗПО) в разрезах ботубинской и боруллойской свит выражены лимонитизацией и осветлением



Рис. 3. Контакт неоокисленных серых алевролитов (слева внизу) и лимонитизированных песчаников ботубинской свиты. Скважина 75,125–215,5, интервал 17–21 м

Fig. 3. Contact of non-oxidized gray siltstones (bottom left) and limonitized sandstones of the Botuobin formation. Well 75,125–215,5, interval 17–21 m

первично сероцветных пород. Подобные изменения характерны и полно описаны для месторождений урана песчаникового типа в работах Г.В. Грушевого, А.К. Лисицына, М.Ф. Максимовой, Г.А. Машковцева, А.И. Перельмана, И.Г. Печенкина, С.Д. Расуловой, В.Н. Щеточкина, Е.М. Шмариовича, Д. Блайла, В. Финча, Г. Шоу и др. Они успешно используются в практике поисково-оценочных и разведочных работ на уран и сопутствующие редкие и рассеянные элементы. Проявления окислительных пластово-инфильтрационных процессов в породах карбона–перми на площади Улахан-Курунг-Юрях выражены различно и, очевидно, отражают разную степень окисления. При полном окислении органического вещества и темноцветных минералов Fe^{+2} ярко-желтые лимонитизированные песчаники контактируют с первично сероцветными породами (рис. 3).

В случае неполного окисления органического вещества породы имеют белесый и светло-салатный цвет и контактируют с лимонитизированными породами (рис. 4).

В других случаях отмечается чередование лимонитизированных и осветленных интерва-

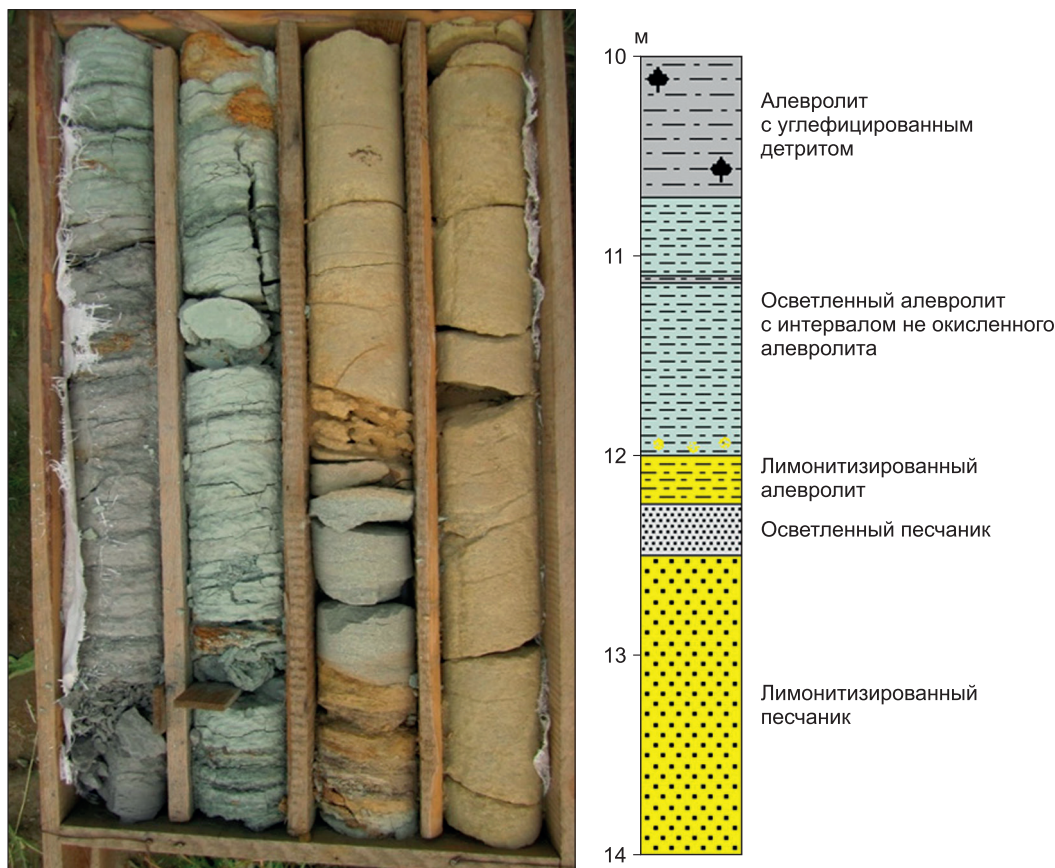


Рис. 4. Зоны пластового окисления в породах ботубинской свиты, снизу вверх (слева направо): неизменные серые алевролиты, осветленные салатово-светло-зеленые, лимонитизированные мелкозернистые песчаники с прослоем осветленных песчаников, алевролиты боруллойской свиты. Скважина 74,61–217,5, интервал 10–14 м

Fig. 4. Zones of formation oxidation in the rocks of the Botuobin formation, from bottom to top, (from left to right): unchanged gray siltstones, clarified light green-light green, limonitized fine-grained sandstones with a layer of clarified sandstones, siltstones of the Borullo formation. Well 74.61–217.5, interval 10–14 m

лов, что указывает на сложное неполное окисление. Встречается и мелкопятнистая лимонитизация или небольшие до первых метров интервалы осветления, свидетельствующие о начальных стадиях окисления. В некоторых разрезах пластовое окисление представлено лишь осветленными песчаниками и алевролитами.

Практически аналогичные проявления окислительных процессов имеют место и в разрезах карбона–перми в пределах поисковой площади Бестях. Здесь изучен керн 131 скважины на площади 6000 км². В большинстве случаев вскрыты лимонитизированные и осветленные разности песчаников. Такое широкое площадное распространение окислительных процессов указывает на значительные масштабы массообмена.

На площади Улахан-Курунг-Юрях внутри лимонитизированных и обеленных пород встречены маломощные в первые сантиметры линзы

черного цвета с сульфидами железа. Они представляются локальными участками вторичного восстановления, связанными с деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий.

Доказательством развития внутрипластового окисления в рассматриваемой толще служит фрагмент латеральной зональности со сменой лимонитизации и полного окисления соединений железа и органического вещества на осветленные породы, где соединения двухвалентного железа не окислены, а углистый материал окислен (рис. 5).

В пределах изученной площади Улахан-Курунг-Юрях в кровле холмолахской свиты под перекрывающими терригенными каменноугольными отложениями очень часто встречается древняя площадная кора выветривания. Она представлена известковистыми монтмориллонит-гидро-слюдистыми глинами с интервалами сидерита. Ее

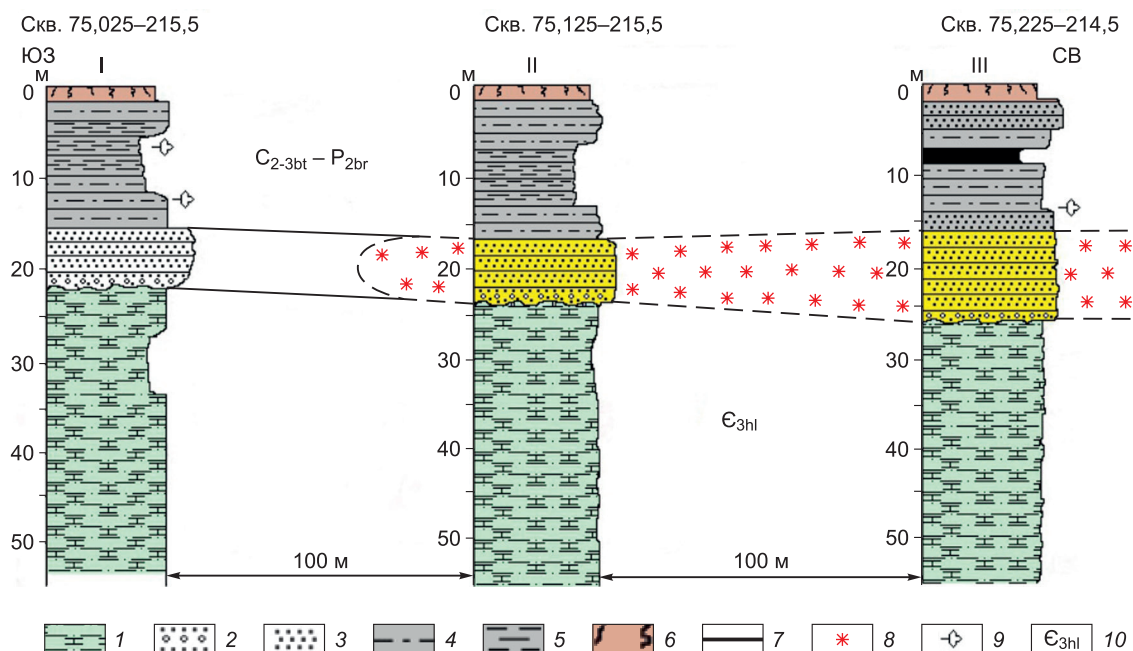


Рис. 5. Латеральная зональность пластового окисления в сероцветных карбон-пермских отложениях на северо-востоке площади Улахан-Курунг-Юрях. 1 – известковистые алевролиты холомолохской свиты кембрия; 2 – среднезернистые песчаники с галькой в базальном слое; 3 – осветленные и сероцветные песчаники; 4 – алевролиты; 5 – аргиллиты; 6 – почвенный слой; 7 – бурый уголь; 8 – лимонитизированные песчаники; 9 – растительный детрит; 10 – возраст отложений

Fig. 5. Lateral zonality of formation oxidation in gray-colored carboniferous Permian deposits in the north-east of the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area. 1 – calcareous siltstones of the Kholomolokha Formation of the Cambrian; 2 – medium-grained sandstones with pebbles in the basal layer; 3 – clarified and gray-colored sandstones; 4 – siltstones; 5 – mudstones; 6 – soil layer; 7 – brown coal; 8 – limonitized sandstones; 9 – vegetable detritus; 10 – age of deposits

строение и минеральный состав подробно описаны в работах Н.Н. Зинчука [4]. В этих образованиях отмечается окисление, которое следует считать трещинно-пластовым. Оно выражено интервалами интенсивной лимонитизации, гематитизации, а также осветленными светло-салатного цвета алевитистыми глинами (рис. 6).

Трещинно-пластовое окисление широко распространено и отсутствует лишь в разрезах, где коры выветривания нет. Характерно, что внутри осветленных и лимонитизированных зон практически повсеместно в нижней части встречаются интервалы 10–40 см тяжелых пород вишнево-красного цвета, сложенных сидеритом и гетитом. Часто с сидеритом встречаются зерна пирита. Сидерит с пиритом залегает под существенно глинистой и более рыхлой монтмориллонит-гидрослюдистой частью каменноугольной (поздний девон–раннекаменноугольной) коры выветривания, что отмечено в Мало-Ботубинском районе [4]. Надо полагать, что осветление этой верхней части коры выветривания, пятна лимонитизации с гематитом являются следами наложения более поздних

окислительных процессов. В ряде случаев зафиксированы непрерывные переходы внутрипластового окисления в породах ботубинской свиты, распространяющегося в горизонты подстилающей коры выветривания, как в приведенном выше примере (см. рис. 6).

В некоторых разрезах верхней части холмо-лохской свиты кембрия обнаружено окисление по крутопадающим трещинам. Оно может распространяться до глубины 25 м от контакта с перекрывающими отложениями. Отмеченные факты позволяют предположить, что при развитии зон окисления существовал единый водоносный комплекс, включавший пласты песчаников в карбоне–перми, трещинно-пластовый коллектор коры выветривания и линейные трещинные зоны в крутопадающих разломах в породах кембрия.

Важно отметить присутствие гипса, ангидрита и ярозита в окисленных породах (см. рис. 6). Гипс встречается в виде друз игольчатых бесцветных кристаллов в трещинах пород кембрия и в виде мелкозернистых агрегатов в цементе лимонитизированных песчаников ботубинской

свиты карбона. Вместе с ангидритом и примесью анальцима он слагает белые маломощные, в первые сантиметры прожилки, встречающиеся в лимонитизированных породах верхнего палеозоя.

Присутствие сульфатов явно указывает на окислительный сернокислый состав подземных вод, формировавших пластовое и трещинное окисление. Унаследованно эти воды сохранились в ручье Улахан-Курунг-Юрях. По данным гидрогеологов Вилуйской ГРЭ, они имеют гидрокарбонатно-сульфатный магниевый-кальциевый-натриевый состав. Присутствие окислительных сульфатных вод в верхней части рассматриваемых разрезов объясняет широкое распространение техногенных поверхностных гематитовых корок до первых сантиметров, развитых на керне сидерита из древней коры выветривания. Картирование такого рода выделений гипса показало, что они приурочены к выходам на поверхность блоков кембрийских пород. Этот факт свидетельствует о том, что содержащие кислород и сульфат-ион подземные воды на этом и других выступах встречали на своем пути кальциевую карбонатную среду, в которой отлагался гипс.

Окислительно-восстановительные процессы в породах карбона–перми и в подстилающей коре выветривания подтверждаются радиогеохимическими данными, полученными в результате литогеохимического опробования и рентгенофлюоресцентным анализом (РФА), выполненным в ЦАЛ Вилуйской ГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО). В породах верхнего палеозоя коэффициент корреляции между торием и ураном, рассчитанный по 42 РФА-анализам, составил 0,95 при Th/U более 4. Это соответствует кларковым содержаниям и отсутствию привноса-выноса урана. А тот же коэффициент, рассчитанный по 97 анализам при Th/U менее 4, составил 0,25. При этом субфоновые содержания урана растут, а тория практически неизменны. Это отражает миграцию урана и его осаждение на восстановительном и частично сорбционном лимонитовом барьере, а также относительную концентрацию радия в сульфатной среде.

На возраст зон пластового и трещинно-пластового окисления косвенно указывают следующие факты. Во-первых, горизонты с признаками ЗПО перекрыты юрскими отложениями, в которых нет признаков окисления. Во-вторых, в одном из разрезов в базальном слое юрских отложений зафиксированы гальки лимонитизированных песчаников. В-третьих, встречены разрезы,



Рис. 6. Пример трещинно-пластового окисления по древней плащевидной коре выветривания, охватившей известковистые глинистые породы кембрия. Осветленные алевролиты ботуобинской свиты с пятнистой лимонитизацией и осветленные также с пятнами лимонита рыхлые известковистые глины и гетит-гематит-сидеритовый агрегат мощностью 30 см в коре выветривания, Скважина 74,925–234,5, интервал 16–20 м

Fig. 6. An example of fractured-formation oxidation along the ancient mantle-shaped weathering crust, which covered calcareous clay rocks of the Cambrian. Clarified siltstones of the Botuobin Formation with spotted limonitization and also clarified with spots of limonite, loose calcareous clays and goethite-hematite-siderite aggregate with a capacity of 30 cm in the weathering crust, Borehole 74.925–234.5, interval 16–20 m

в которых нарушено субгоризонтальное залегание лимонитизированных песчаников позднего палеозоя с углами наклона 30°. Эти данные с учетом аридных условий триасового этапа базальтоидной тектоно-магматической активизации всего региона Восточной Сибири позволяют предположить триасовый возраст пластового окисления.

Предполагается, что с зонами внутрипластового, пластово-трещинного и трещинного окисления могли быть связаны процессы эпигенетического рудообразования [5, 6]. В частности, возможны рудные концентрации базитофильных элементов – Sc, V и, возможно, Re. Особый интерес представляет Sc. Такие типы месторождений являются промышленными [7–13]. По данным 1579 рентгенофлюоресцентных анализов на

Таблица 1

**Распределение скандия и ванадия из разных осадочных образований
на площади Улахан-Курунг-Юрях**

Table 1

**Distribution of scandium and vanadium from different sedimentary formations
in the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area**

Осадочные образования	Коэффициент корреляции Sc/V	Среднее значение выборки Sc	Медианное значение выборки Sc	Среднее значение выборки V	Медианное значение выборки V
Каменноугольная кора выветривания по кембрийским породам	0,16	14,63	13,34	116,08	113,5
Кембрийские породы	0,21	7,88	6,57	78,89	72,05
Карбон-пермские породы	0,4	11,85	11,45	77,122	71,99
Общая выборка	0,25	8,56	7,68	78,4	71,66

Примечание. Использовано по 1579 анализов РФА, аналитик Степанова Т.В., ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО).

Note. 1579 XRF analyses were used, analyst T.V. Stepanova, VGRE AK ALROSA (PAO).

площади Улахан-Курунг-Юрях отмечается рост средних содержаний ванадия и скандия, превышающих кларки, в породах коры выветривания несколько повышенные относительно пород кембрия и верхнего палеозоя (табл. 1).

Многочисленные данные РФА заверены анализами ICP AES по 30 штучным пробам, отобраным для анализа древней зоны окисления в угленосных отложениях и древней коре выветривания (табл. 2).

По данным ICP AES установлены повышенные концентрации обоих элементов в эпигенетически измененных породах карбона–перми по сравнению с окисленными породами коры выветривания по породам кембрия. Повышенные содержания в угленосных терригенных отложениях связаны с местами контакта окисленных (лимонитизированных или осветленных) и неизмененных первично сероцветных пород в зоне геохимического барьера. В коре выветривания повышенные содержания сопровождают рыхлые осветленные белесо-салатного цвета карбонатные алевролитистые глины, которые, очевидно, создавали щелочной и сорбционный геохимический барьеры.

Следует отметить, что в зонах пластового окисления в карбон-пермских отложениях корреляция ванадия и скандия ($K = 0,4$) заметно выше (см. табл. 1), чем в коре выветривания ($K = 0,22$), что, наверное, отражает разные барьеры осаждения – сорбционный и pH для Sc и Eh для V.

Наиболее ценным является Sc, стоимость которого на мировом рынке при чистоте 9,99 в по-

следние годы превышает 1500 долларов США за 1 кг [7, 9, 12, 13]. Из более чем 1500 анализов по площади Улахан-Курунг-Юрях в 44 пробах содержание Sc установлено от 30 до 82 ppm (до 7 кларков-концентраций для глинистых пород). Абсолютное большинство этих значений выявлено в глинистых породах коры выветривания или в терригенных отложениях верхнего палеозоя. Надо отметить, что опробование было нацелено на обнаружение геохимических признаков кимберлитов или их минеральных индикаторов, но отнюдь не на Sc, который вообще не определялся.

В коре выветривания Sc мог накапливаться дважды во время их формирования и после в результате пластового и трещинно-пластового окисления. В терригенных породах карбона–перми его концентрации могут быть связаны со скоплениями акцессорного ильменита, переотложенного материала кор выветривания и зонами выклинивания пластового окисления. Большая часть проб с таким повышенными содержаниями Sc локализована под триасовыми траппами (рис. 7), которые могли служить региональным водоупором в древнем инфильтрационном артезианском бассейне.

Можно предположить, что выявленные концентрационные ореолы Sc фиксируют сложную зону выклинивания внутрипластового окисления в породах верхнего палеозоя и площадной сорбционный и щелочной барьеры его осаждения в карбонатно-глинистом материале древней коры выветривания.

Таблица 2

Содержания Sc и V на площади Улахан-Курунг-Юрях, г/т

Table 2

Sc and V contents in g/t in the Ulakhan-Kurung-Yuryakh area

Линия бурения	Номер скважины	Глубина, м	Порода	Sc, ppm	V, ppm
Породы карбона–перми					
74,5	220,6	28	Крупнозернистый сероцветный песчаник	10,19	83,64
74,61	213,5	12	Углистый алевролит	20,12	122,60
74,61	217,5	10	Углистый алевролит	18,95	131,30
74,61	217,5	11,5	Осветленный серый углистый алевролит	21,67	151,60
74,61	217,5	13	Лимонитизированный песчаник	11,10	83,93
74,61	217,5	5,5	Лимонитизированный песчаник на контакте с углистым алевролитом	22,48	151,20
74,61	217,5	5,5	Серый углистый алевролит на контакте с лимонитизированным песчаником	6,95	47,16
75,025	213,5	8	Серый алевролит	19,53	141,40
75,025	213,5	8,5	Серый алевролит	20,60	166,50
75,025	213,5	8,7	Осветленный алевролит	20,13	133,60
75,025	213,5	9	Лимонитизированный алевролит	19,58	129,70
Породы коры выветривания по холмоложской свите					
71,5	240,5	50	Карбонатно-глинистая порода	6,92	56,03
71,5	240,5	46,5	Сидеритизированная порода	<побн	35,06
72,5	240,5	49	Карбонатно-глинистая порода	8,09	48,79
72,5	240,5	49,7	Осветленная глинистая порода	14,43	133,10
72,5	240,5	50,8	Лимонитизированная порода	2,76	49,84
72,5	240,5	51	Сидеритизированная порода	0,18	32,26
72,9	270,5	43	Сидеритизированная порода	0,70	50,58
73,3	212,5	110	Рыхлая глинистая породы	7,46	62,98
73,3	212,5	113	Карбонатно-глинистая порода	9,31	67,23
73,3	212,5	111	Сидеритизированный доломит с реликтами пирита	3,37	49,59
73,5	240,5	54	Рыхлая глинистая породы	16,14	136,40
73,5	240,5	57,5	Карбонатно-глинистая порода	6,80	38,51
73,7	222,5	31,5	Сидеритизированная порода с пиритом	3,04	46,16
74,61	217,5	35	Сидеритизированная порода	<побн	20,50
74,925	204,5	56	Лимонитизированная порода	5,74	33,64
75,125	213,5	5,5	Осветленная глинистая порода	13,45	107,80
75,125	213,5	6,5	Лимонитизированная порода	16,38	125,00
75,125	213,5	7	Сидеритизированная порода	1,97	38,29
75,225	216,5	30	Прослой черной породы с пиритом	4,68	60,29

Примечание. Анализы ICP AES выполнены в ЦАЛ ВГРЭ АК АЛРОСА (ПАО). < побн – значение меньше предела определения.

Note. The ICP-AES analyses were performed at VGRE AK ALROSA (PAO). < побн – the value is less than the definition limit.

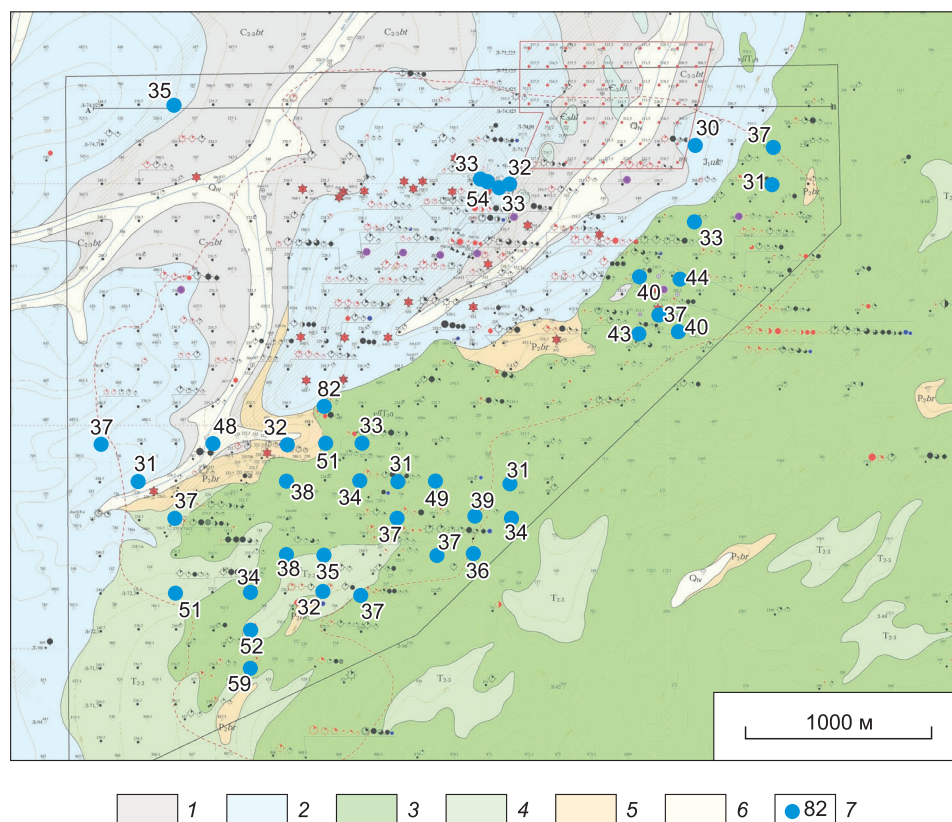


Рис. 7. Распространение концентраций Sc в породах карбона–перми и кембрия с содержаниями более 30 ppm. 1 – современные четвертичные отложения; 2 – юрская система, нижний отдел, укугутская свита; 3 – магматические образования ахтарандинского комплекса; 4 – триасовая система, средний–верхний отдел; 5 – пермская система, верхний отдел, боруллойская свита; 6 – каменноугольная система, средний–верхний отдел, ботуобинская свита; 7 – концентрация Sc, ppm

Fig. 7. Distribution of Sc concentrations in Carboniferous-Permian and Cambrian rocks with contents of more than 30 ppm. 1 – Modern Quaternary deposits; 2 – Jurassic system, lower section, Ukugut Formation; 3 – magmatic formations of the Akhtaran-dinsky complex; 4 – Triassic system, middle-upper section; 5 – Permian system, upper division, Borulloy Formation; 6 – carboniferous system, middle-upper division, Botuobin Formation; 7 – concentration of Sc, ppm

Для прогнозной оценки Sc следует рассмотреть геолого-промышленные типы его месторождений. Согласно классификациям [6, 8], во всех месторождениях как эндогенного, так и экзогенного классов скандий является попутным компонентом. Выделено 15 потенциально-промышленных типов месторождений скандия [8]: магматические 1) Sc–V в ильменит-титаномагнетитовых рудах габбро-ультрабазитовых интрузий; 2) Sc–V в апатит-ильменитовых рудах дифференцированных габбровых интрузий в анортозитах; 3) Sc–Pt с Co–Ni-рудами в ультрамафитах; пегматитовые 4) REE-Sc в тортвейтитовых пегматитах; грейзеновые 5) Sc в W–Sn; метасоматические 6) Sc в U-месторождениях с давидитовой минерализацией; 7) U-редкометалльно-Sc в щелочно-карбонатных метасоматитах; 8) железорудные метасоматиты; в корках выветривания 9) Sc-REE-Nb в переотложенных КВ карбонатов (90 % Sc

из Баюнь Обо); 10) Sc в латеритных корках выветривания по ультрабазитам с кобальт-никелевыми рудами; осадочные 11) Sc в рудах REE-P-U-месторождений в костных остатках рыб; 12) Sc в Zr–Ti прибрежно-морских россыпях; 13) Sc в Ti-россыпях ближнего сноса; 14) Sc в россыпях ближнего сноса грейзеновых руд W–Sn; эпигенетические 15) V–Sc–Re в рудах U пластово-инфильтрационных месторождений в песчаных; 16) Sc в углях.

Похожую более упрощенную классификацию собственно скандиевых месторождений предложил Чженчао Вонг с соавторами [13]. В этой классификации среди гипергенных (супергенных) выделяются три типа месторождений в реолитах: развитые по мафит-ультрамафитовым породам, по карбонатитам и в морских осадочных отложениях.

Полученные данные по наличию древней зоны пластового окисления в отложениях верхнего

палеозоя и широкое распространение в Западной Якутии кор выветривания каменноугольного (поздний девон–каменноугольного) и триас-юрского возрастов [4, 14] позволяют считать, что в регионе можно ожидать месторождения Sc трех типов [15]: 1) в зоне выклинивания ЗПО в угленосных породах карбона–перми; 2) в трещинно-пластовых и трещинных ЗПО в глинах древних кор выветривания по породам кембрия; 3) в древних корях выветривания по кимберлитам и базитам

Четвертым типом месторождений скандия могут стать грунтовые над- или межмерзлотные сернокислые воды как аналоги ионно-адсорбционных «жидких» руд редких металлов, осваиваемых в Китае [7]. При этом надо иметь в виду, что в проектах освоения карьерным способом с сернокислотным выщелачиванием скандия из комплексных кобальт-никелевых руд в латеритах Австралии и Новой Каледонии, развитых по ультрабазитам, содержания скандия колеблются от 41 до 262, достигая 1500 ppm [7, 11].

На территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) разведано и готовится к эксплуатации крупнейшее Nb–TR-месторождение Томтор с рудами в переотложенных эпигенетически измененных корях выветривания со средним содержанием скандия 200 ppm [5–7, 16–18].

Примером концентраций скандия в зонах выклинивания внутрипластового и трещинно-пла-

стового окисления являются отмеченные выше ореолы на площади Улахан-Курунг-Юрях.

Учитывая выделенные типы вероятных месторождений Sc, были проанализированы данные РФА-анализов по двум алмазоносным полям Якутии – Сюльдюкарскому и Накынскому. Сюльдюкарское алмазоносное поле Ыгыаттинского района Якутии имеет весьма близкое геологическое строение с Мало-Ботуобинским районом, включающим изученные площади Улахан-Курунг-Юрях и Бестях. В разрезах позднего палеозоя здесь также отмечены признаки эпигенетического пластового окисления. Как оказалось, из 4082 анализов в 109 содержания Sc превысили 30 ppm, в 12 пробах – 100 ppm. 9 проб с такими концентрациями отобраны из Сюльдюкарских кимберлитов, причем 6 из них взяты из древней коры выветривания и расположены на глубинах 30–50 м (табл. 3).

Все они локализованы вдоль одной линии рудовмещающего субширотного сдвига крутого падения, выявленного по ряду признаков [19]. Полоса скандиевого оруденения составляет не менее 400 м при ширине не менее 10 м и мощности не менее 2 м и представляется перспективным рудопроявлением. Вместе со Sc в выветрелых кимберлитах отмечаются высокие концентрации Co, Ni, La и Ce, что повышает перспективы этого объекта. Интересно отметить, что порядки содержания Co, Ni, V и платиноиды на данном ру-

Таблица 3

Аномальные концентрации скандия в породах Сюльдюкарского поля

Table 3

Abnormal concentrations of scandium in rocks of the Syuldyukar field

Номер скважины	Глубина, м	Возраст	Порода	Содержания Sc, ppm
12–22	126	iPz2	Кимберлитовая брекчия	164,9376
12–22	112	iPz2	То же	128,1744
12–22	102	iPz2	«-»	142,5816
12–26	175	iPz2	«-»	105,363
16–22	30,3	iPz2	«-»	163,944
20–22	37	iPz2	«-»	107,9505
20–22	77	iPz2	«-»	106,7568
20–22	123	iPz2	«-»	106,2945
24–22	38,5–44	G3hl	Доломиты алевритистые	143,7888
32–20	53	iPz2	Кимберлитовая брекчия	155,9952
32–18	41,8–47	G3hl	Мергель доломитовый	204,516
134–98	59,1	P1ah	Песчаники тонкозернистые	123,372

допроявлении сопоставимы с таковыми на месторождении Кониамбо в Новой Каледонии [11]. Концентрации лантана и церия намного выше в якутском объекте, что, вероятно, отражает в принципе повышенный геохимический фон редких земель в кимберлитах Якутии [20, 21].

В большем количестве рудные концентрации скандия обнаружены в Накынском алмазоносном поле, где осваиваются месторождения алмазов. Здесь из 30802 рентгенофлюоресцентных анализов литогеохимических проб в 938 содержания скандия превысили 30 ppm, а в 37 пробах – 100 ppm.

В большинстве случаев (28 проб из 37) они связаны с породами дяхтарской свиты триас-юрского возраста. В одном случае рудным оказалась кора выветривания по среднепалеозойским долеритам. Дяхтарская свита представляет собой материал переотложенных кор выветривания известковистого монтмориллонит-гидро-слюдистого состава [14, 22]. Рассматриваемые пробы отобраны с глубин от 63 до 85,5 м. По большей части они представлены глинами, что указывает на близкий к элювию материал. Кроме того, пробы с аномальными концентрациями скандия взяты в местах палеоподнятий, обрамляющих впадины, в том числе Дюлюнг-Дяхтарскую и Уолбинскую депрессии дяхтарского времени, выявленные геологами Вилуйской ГРЭО [22]. По сближенным скважинам с концентрациями скандия выделен ряд участков. В одном из них вскрыт концентрационный ореол скандия протяженностью более 2 км и шириной более 50 м, расположенный на юго-западе Накынского поля.

Он находится в узле пересечения крупных Дюостахского и Западного разломов, выполненных дайками основного состава девонского возраста. По нашим данным, в центр этого узла попадает и проекция Диагонального разлома, контролирующего тела алмазоносных кимберлитов. Следует учитывать, что именно в разломах северо-восточного простирания в Накынском поле и узлах их пересечения с другими нарушениями сосредоточены трубки взрыва щелочно-базитового состава [23–25].

Скандиевый ореол вытянут более чем на 2 км вдоль Дюостахского нарушения. Его параметры определяют возможность предполагать здесь месторождение скандия. Важно отметить, что в том же Дюостахском разломе в 5 км юго-западнее от края этого ореола в скв. 340-345 на глубине 77 м в алеволитах дяхтарской свиты обнаружено 241,2 ppm скандия.

Другой участок сближенных на площади концентраций скандия расположен на западе Накынского поля в узлах пересечения Лиендокитского и Северного, а также Западного, Ботубинского и Лиендокитского разломов. Здесь надо отметить серию из четырех скважин, расположенных по широте в узлах пересечения упомянутых разломов. В них содержание скандия составляет выше 200 ppm. Надо отметить скважину 396–472, в которой в четырех пробах, отобранных с глубин 30,4, 37,4, 42,4 и 52,4 м, охвативших пачку в 22 м, содержания скандия составили соответственно 107,7, 130,2, 133,7 и 452,4 ppm. В последней, очевидно рудной по скандию, пробе концентрации церия составили 110,4 ppm.

В Накынском поле имеется еще 12 разрезов по поисковым скважинам, в которых в глинах дяхтарской свиты примерно на тех же глубинах определены содержания скандия выше 100 ppm. Породы среднепалеозойских траппов могли быть источниками скандия, поскольку в них отмечены весьма высокие его концентрации. Так, А.И. Киселев [25] приводит следующие содержания скандия по данным ICP MS, ppm: в до-кимберлитовых дайках базитов Вилуйско-Мархинской зоны – 26, 31, 32, 33, 34, 38, 36, 40, 42, 331 и 400; в силлах Накынского поля – 34, 369, 372 и 407; в посткимберлитовых базитах тр. Нюрбинская – 20, 23, 34, 36, 38, 38, 40, 366, 423, 424, 431, 437, 480; в монзонит-порфирах тр. Нюрбинская – 181, 199 и 479.

Значительное число проб с повышенными и рудными содержаниями скандия и ряда сопутствующих элементов определяют большой поисковый потенциал на скандий, прежде всего Накынского поля. Вполне вероятно, что здесь скандий и другие металлы накапливались в два этапа: во время поднятий в позднем девоне–раннем карбоне и формирования кор выветривания и в триасе при образовании кор выветривания и инфильтрации агрессивных сульфатных окислительных кислых грунтовых вод при наличии щелочно-сорбционного барьера осаждения скандия в глинистых горизонтах верхних частей коры выветривания.

Заключение

Представленные материалы позволяют сделать следующие выводы.

Впервые в верхнепалеозойских толщах Западной Якутии в областях поднятий установлены

проявления древнего пластового и трещинно-пластового окисления. Последнее затрагивает каменноугольные перекрытые коры выветривания.

Предположение о масштабных рудообразующих процессах в связи с древним инфильтрационным эпигенезом, в том числе наложенных на материал древних кор выветривания, реализовано на примере рудных концентраций скандия.

Среди промышленных типов месторождений скандия выделены наиболее перспективные для Якутии в корях выветривания по карбонатитам, кимберлитам, базитам и монцититам и в зонах выклинивания внутрипластового окисления. На северо-западе Мало-Ботуобинского района на поисковой площади Улахан-Курунг-Юрях возможны ионно-адсорбционные руды скандия в надмерзлотных грунтовых водах.

На основе многочисленных данных рентгенофлюоресцентных и, меньше, ICP MS анализов в Сюльдюкарском и Накынском алмазоносных полях Якутии выявлена серия рудопроявлений скандия с содержаниями выше 100 и максимумом 462 ppm. Большинство из них локализованы в каменноугольных и триас-юрских перекрытых корях выветривания и расположены на глубинах до 90 м.

Рудопроявление скандия в коре выветривания по Сюльдюкарским кимберлитам содержит высокие концентрации кобальта, никеля, лантана и церия, которые могут оказаться попутными компонентами. В Накынском поле в рудопроявлениях скандия встречаются высокие концентрации церия.

Особенно интересными представляются рудопроявления на западном фланге Накынского поля, в котором осуществляется промышленное освоение алмазных месторождений. Эти участки могут оказаться экономически ценными месторождениями скандия и попутных редкоземельных элементов цериевой группы.

Учитывая, что в Западно-Якутской алмазоносной провинции широко распространены источники скандия – породы траппов среднего палеозоя, известно более 1500 кимберлитовых тел и сотни тел эруптивных брекчий базитов, потенциал на скандий и сопутствующие ценные металлы представляется достаточно большим.

Список литературы / References

1. *Scandium Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027*. IMARC Services Pvt. Ltd.; 2022. 143 p.

2. Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. *Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции*. Мирный; 2015. 475 с.

Kostrovitsky S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A. *Atlas of primary diamond deposits of Yakutian kimberlite province*. Mirny; 2015. (In Russ.)

3. Коробков И.Г. *Тектоника, палеогеография и базитовый магматизм алмазоносных районов восточного борта Тунгусской синеклизы*. Иркутск: ИЗК СО РАН; 2015. 353 с.

Korobkov I.G. *Tectonics, paleogeography and basite magmatism of diamond-bearing areas of the eastern side of the Tunguska syncline*. Irkutsk: IEC SB RAS; 2015. 353 p. (In Russ.)

4. Зинчук Н.Н. *Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы*. Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та; 1994. 240 с.

Zinchuk N.N. *Weathering crusts and secondary changes of kimberlites of the Siberian platform*. Novosibirsk: NSU Publishing House; 1994. 240 p. (In Russ.)

5. Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность. *Геология рудных месторождений*. 1991;33(4):81–91.

Lapin A.V., Tolstov A.V. Oxidative and reducing stages of formation of the hypergenesis zone of carbonatites and their ore content. *Geology of Ore Deposits*. 1991;33(4):81–91. (In Russ.)

6. Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных рудах месторождения Томтор. *Геохимия*. 2016;(12):1104–1121. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120062>

Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. Distribution of Re, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit. *Geochemistry International*. 2016;54(12):1061–1078. <https://doi.org/10.1134/S0016702916120065>

7. Быховский Л.З., Потанин С.Ж., Котельников Е.И., Ануфриева К.И. и др. Редкоземельное и скандиевое сырье России. *Минеральное сырье*; 2018;31:216.

Bykhovsky L.Z., Potanin S.Zh., Kotelnikov E.I., Anufrieva K.I. et. al. Rare earth and scandium raw materials of Russia. *Mineral raw materials*; 2018:216. (In Russ.)

8. Ключарев Д.С. *Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы*. Рений. Редактор Спорыхина Л.В. Справочник. М.: ВИМС; 2016. 39 с.

Klyucharev D.S. *Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth metals*. Renius. Moscow: VIMS; 2016. 39 p. (In Russ.)

9. Поликашина Н.С. *Требования к качеству минерального сырья, содержащего редкие и редкоземельные металлы*. Скандий. Справочник. М.: ВИМС; 2016. 65 с.

Polikashina N.S. *Requirements for the quality of mineral raw materials containing rare and rare earth met-*

- als. Scandium. Handbook. Moscow:VIMS; 2016. 65 p. (In Russ.)
10. Chassé M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Calas G. Scandium speciation in a world-class lateritic deposit. *Geochem. Persp. Let.* 2017;(3):105–114. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1711>
11. Teitler Y., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosio J.P., Munoz M., Sevine B. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. *Journal of Geochemical Exploration.* 2019;196:131–155. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.10.009>
12. Williams-Jones A.E., Vasyukov O.V. The economic geology of Scandium, the runt of the rare Earth element litter. *Economic Geology.* 2018;113(4):973–988. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4579>
13. Zhenchao Wang, Yan Hei Li M., Ze-Rui Ray Liu, Mei-Fu Zhou. Scandium: Ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. *Ore Geology Reviews.* 2021;128. 103906. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103906>
14. Никулин И.И., Савко А.Д. *Литоология алмазных нижнеюрских отложений Накынского кимберлитового поля (Западная Якутия)*. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2009. 134 с.
- Nikulin I.I., Savko A.D. *Lithology of diamond-bearing Lower Jurassic deposits of the Nakyn kimberlite fields (Western Yakutia)*. Voronezh: Voronezh State University; 2009. 134 p. (In Russ.)
15. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции. *Горный журнал.* 2022;(7):12–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.02>
- Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Prospects for the identification of scandium deposits in the Yakut diamond province. *Gornyi Zhurnal.* 2022;(7):12–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.07.02>
16. Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Складнева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А. Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении Томтор. *Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах*. Сборник научных трудов. М.; 1995:223–241.
- Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nechelyustov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G.A. Features of localization of rare-metal mineralization at the Tomtor deposit. *Rare-metal-uranium ore formation in sedimentary rocks*. Collection of scientific papers. Moscow; 1995:223–241. (In Russ.)
17. Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Кубышев А.И., Толстов А.В. Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометалльного сырья. *Геология рудных месторождений.* 1990;32(1):105–109.
- Kravchenko S.M., Belyakov A.Yu., Kubyshev A.I., Tolstov A.V. Scandium-rare earth-yttrium-niobium ores – a new type of rare metal raw materials. *Geology of Ore Deposits.* 1990;32(1):105–109. (In Russ.)
18. Толстов А.В., Лапин А.В., Похиленко Н.П., Овчинников К.В. Скандий и иттрий Томторского рудного поля. *Цветная металлургия.* 2015;(4):37–43.
- Tolstov A.V., Lapin A.V., Pokhilenko N.P., Ovchinnikov K.V. Scandium and yttrium of the Tomtorsky ore field. *Non-ferrous Metals.* 2015;(4):37–43. (In Russ.)
19. Игнатов П.А., Зарипов Н.Р., Толстов А.В., Колесник А.Ю., Мальцев М.В. Гидротермальная минерализация в осадочных породах кембрия как индикатор рудовмещающей структуры кимберлитов Сюльдюкарского поля Якутии. *Руды и металлы.* 2021;(1):93–105. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10006>
- Ignatov P.A., Zaripov N.R., Tolstov A.V., Kolesnik A.Yu., Maltsev M.V. Hydrothermal mineralization in Cambrian sedimentary rocks as an indicator of the ore-containing structure of kimberlites of the Syuldyukar field of Yakutia. *Ores and metals.* 2021;(1):93–105. (In Russ.). <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2021-10006>
20. Лапин А.В., Толстов А.В., Антонов А.В. Изотопный состав Sr- и Nd-кимберлитов и конвергентных с ними пород Сибирской платформы. *ДАН. Наука о Земле.* 2007;414(1):78–82.
- Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. SR and ND isotopic compositions of kimberlites and associated rocks of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sciences.* 2007;414(1):557–560. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07040150>
21. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites. *Geochemistry International.* 2007;45:1197–1209. <https://doi.org/10.1134/S0016702907120026>
22. Граханов О.С. *Строение, состав и условия формирования раннемезозойских погребенных россыпей алмазов Средне-Мархинского района Западной Якутии*. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Мирный; 2010. 24 с.
- Grakhanov O.S. *Structure, composition and conditions of formation of Early Mesozoic buried diamond placers of the Sredne-Markhinsky district of Western Yakutia*. Abstr. ...Diss. Cand.Sci., Novosibirsk; 2010. 24 p. (In Russ.)
23. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. *Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии*. Иркутск: Изд-во ИГТУ; 2008. 507 с.
- Drozdvov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: ISTU Publishing House; 2008. 507 p. (In Russ.)
24. Игнатов П.А., Бушков К.Ю., Новиков К.В., Толстов А.В. Ареал брекчий щелочных базитов Накынского кимберлитового поля. *Известия вузов. Геология и разведка.* 2010;(2):31–35.
- Ignatov P.A., Bushkov K.Yu., Novikov K.V., Tolstov A.V. The area of breccias of alkaline basites of the

Nakyn kimberlite field. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*. 2010;(2): 31–35. (In Russ.)

25. Киселев А.И., Егоров К.Н., Чернышов Р.А., Чашухин А.В., Яныгин Ю.Т. Проявления флюидно-взрывной дезинтеграции базитов в Накынском кимберлитовом поле (Якутская алмазоносная провинция). *Тихоокеанская геология*. 2004;23(1):97–104.

Kiselev A.I., Egorov K.N., Chernyshov R.A., Chashchukhin A.V., Yanygin Yu.T. The nature of basic explosive breccias within the Nakyn kimberlitic field (Yaku-

tian diamondiferous province). *Tikhookeanskaya Geologia*. 2004;23(1):97–104. (In Russ.)

26. Киселев А.И., Ярмолук В.В., Егоров К.Н. и др. Среднепалеозойский базитовый магматизм северо-западной части Вилюйского рифта: состав, источники, геодинамика. *Петрология*. 2006;14(6):626–648.

Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Egorov K.N. et al. Middle Paleozoic basal magmatism of the northwestern part of the Vilyui Rift: composition, sources, geodynamics. *Petrology*. 2006;14(6):588–608. <https://doi.org/10.1134/S0869591106060051>

Об авторах

ИГНАТОВ Петр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Scopus AuthorID: 14624021100, AuthorID: 61399, e-mail: petrignatov@gmail.com

ЕРЕМЕНКО Руслан Умарович, аспирант, инженер-исследователь, e-mail: eremenko-ruslan@mail.ru

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

ОВЧИННИКОВ Илья Максимович, эксперт, AuthorID: 11356007, e-mail: ovchinnikovim@alrosa.ru

About the authors

IGNATOV, Petr Alekseevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, Scopus AuthorID: 14624021100, AuthorID: 61399, e-mail: petrignatov@gmail.com

EREMENKO, Ruslan Umarovich, graduate student, e-mail: eremenko-ruslan@mail.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilyevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, ResearcherID: O-2643-2013, e-mail: tols61@mail.ru

OVCHINNIKOV, Ilya Maksimovich, Expert, AuthorID: 11356007, e-mail: ovchinnikovim@alrosa.ru

Поступила в редакцию / Submitted 22.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 26.04.2023

Принята к публикации / Accepted 17.05.2023

УДК 551.83

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-202-222>

Оригинальная статья

Алмазоносность нижнекаменноугольных отложений западной части Сибирской платформы

Н. И. Акулов[✉], А. С. Гладков, И. А. Громова

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

[✉]akulov@crust.irk.ru

Аннотация

Выполненное исследование направлено на изучение фундаментальной проблемы по установлению роли литолого-палеогеографических обстановок на древних платформах при формировании алмазообразующих систем на рубеже среднепалеозойской (D_3-C_1) тектономагматической перестройки. Основное внимание сосредоточено на стратиграфии нижнекаменноугольных отложений, палеогеографических условиях их накопления и содержащихся в них алмазоносных коллекторах. Установлено, что формирование алмазоносных россыпей происходило в прибрежно-морских и озерных условиях из источников ближнего и дальнего переноса. На представленных в статье литолого-палеогеографических картах показаны места расположения осадочных бассейнов и других ландшафтных зон, позволяющие судить о локализации областей сноса терригенного материала и оконтурить перспективные площади для проведения алмазопромысловых работ.

Ключевые слова: Сибирская платформа, алмазы, палеогеографическая реконструкция, нижний карбон

Финансирование. Исследование проведено в рамках государственного задания ИЭК СО РАН на оказание государственных услуг (выполнения работ) (№ 075-01434-23-00 от 29.12.2022).

Для цитирования: Акулов Н.И., Гладков А.С., Громова И.А. Алмазоносность нижнекаменноугольных отложений западной части Сибирской платформы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):202–222. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-202-222>

Original article

Diamond potential of the lower carboniferous deposits on the western part of the Siberian platform

N. I. Akulov[✉], A. S. Gladkov, I. A. Gromova

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

[✉]akulov@crust.irk.ru

Abstract

In this study, we aimed to investigate the fundamental problem of identifying the role of lithological and paleogeographic settings on ancient platforms during the development of diamond-forming systems at the turn of the Middle Paleozoic (D_3-C_1) tectonic and magmatic reconstruction. The main focus was on the stratigraphy of the Carboniferous (Mississippian) deposits, the paleogeographic conditions of their accumulation, and their diamond-bearing reservoirs. The lithological and paleogeographic maps provided in this article show the locations of the sedimentary basins and other landscape zones, which allow the identification of demolition areas of terrigenous materials and delineate attractive areas for diamond prospecting activity.

Keywords: Siberian Platform, diamond, paleogeographic reconstruction, Lower Carboniferous

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment to the IEC SB RAS (number 075-01434-23-00, dated 29.12.2022).

For citation: Akulov N.I., Gladkov A.S., Gromova I.A. Diamond potential of the lower carboniferous deposits on the western part of the Siberian Platform. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):202–222. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-202-222>

Введение

Более 60 лет ведется добыча алмазов в Якутской алмазодобывающей провинции, расположенной в восточной части Сибирской платформы. В районе западного борта этой платформы коренных источников алмазов до сих пор не установлено, хотя и здесь в составе нижнекаменноугольных отложений обнаружены многочисленные алмазы и их спутники. Как сформировался нижнекаменноугольный алмазодобывающий коллектор западного фланга платформы и что он из себя представляет? На эти и другие вопросы постараемся ответить в данной статье.

Многие исследователи при изучении закономерностей распространения каменноугольных отложений отмечали разнообразие их состава и строения в разных частях Сибирской платформы и выделили ряд структурно-фациальных или структурно-седиментационных зон, которые позднее стали рассматриваться как осадочные палеобассейны Ангарида [9]. Идею о былом существовании Ангарского материка (Ангарида) высказал Э. Зюсс в своем фундаментальном «Лике Земли» [48]. Тем не менее, многие годы считалось, что Ангарида – гипотетический материк, возможно, существовавший на месте Северной Азии с позднеордовикской эпохи до мезозоя включительно [18]. Понятие «Ангарида» как огромная сибирская суша ранее использовалось преимущественно при исследовании основных этапов развития фауны в морях, омывавших ее в прошлом, палеоландшафтов, существовавших на древней суше, и флоры, произраставшей на их площадях, – «флора ангарской серии». Это работы А. Грабау [49], А.А. Борисьяка [13], А.Н. Криштафовича [29], В.М. Синицына [40], С.В. Мейена [33, 34], О.А. Бетехтиной [12]. Об Ангариде писали В.Н. Дубатовов [22], В.Н. Дубатовов совместно с В.И. Красновым [23], Е.А. Елкин с Г.М. Прашкевичем [24] и А.Г. Клец [28].

В процессе многолетних исследований, проведенных нами, сложилась единая обобщающая картина становления Ангарида, а также последовательность ее развития и алмазодобывающей [1–4, 6, 7, 8, 10, 45].

Данное исследование целиком направлено на решение фундаментальной проблемы установления роли литолого-палеогеографических обстановок на древних платформах (на примере Сибирской платформы) при формировании алмазодобывающих систем на рубеже среднепале-

озойской (D_3-C_1) перестройки (эпиplatformенного орогенеза).

Актуальность работы заключается в исследовании условий формирования нижнекаменноугольных отложений и реконструкции палеогеографической обстановки, на основе которой могут быть оконтурены перспективные площади для поисков новых месторождений алмазов. В связи с этим основное внимание сосредоточено на изучении стратиграфии нижнекаменноугольных отложений, палеогеографических условий их накопления и содержащихся в них алмазодобывающих коллекторов.

Материалы и методы

В основу статьи положены результаты полевых работ по изучению верхнепалеозойских отложений в южной части Сибирской платформы и в зоне ее сочленения с Енисейским краем (рис. 1). В полевых условиях осуществлялась пироповая съемка с помощью шлихового опробования перспективных отложений и изучались фациальные условия их накопления. Выполнено исследование шлиховых проб под биноклем и сделано их описание. Химический состав наиболее представительных зерен пиропов получен с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализатора JXA8200. Результаты, полученные с помощью электронно-зондового рентгеноспектрального микроанализатора, приведены в массовых процентах, а данные минералогического анализа – в количественных.

За последние три года проведен анализ 43 геологических карт масштаба 1:200 000, а также изданных к ним объяснительных записок. Большое внимание уделено Государственным геологическим картам третьего поколения (масштаб 1:1000 000), в состав которых входит исследуемая территория. Выполнено петрографическое изучение 123 шлифов пород из нижнекаменноугольных коллекторов и выполнено их описание.

Литолого-палеогеографические реконструкции осуществлены согласно классическим методическим указаниям [32]. Представленная в статье схематическая литолого-палеогеографическая карта составлена согласно требованиям, предъявляемым к данному виду работ [44].

Результаты исследований

В общепринятой региональной стратиграфической схеме [38] нижний отдел каменноуголь-



Рис. 1. Обзорная схема района исследований с элементами палеорекострукции (раннекаменноугольная эпоха)

Fig. 1. Overview scheme of the study area with elements of paleoreconstruction (Early Carboniferous Period)

ной системы исследуемой территории представлен тушамской свитой, положенной в основу для реконструкции тушамского горизонта. Тушамская свита вскрыта в отрогах Енисейского кряжа (район устья р. Ангара). Именно здесь завершил свое существование Тушамский (Ангаро-Тунгусский) седиментационный бассейн. Впоследствии в западной части платформы нижнекаменноугольные породы были обособлены в виде тычанской, шушукской, суриндинской и других свит и слоевых комплексов [14]. Тем не менее до сих пор вопросы объема, границ и возраста тушамского горизонта продолжают оставаться дискуссионными. Прежде чем перейдем к рас-

смотрению литолого-палеогеографических карт, постараемся понять каким образом связаны между собой вышеперечисленные свиты?

В составе ископаемых растительных остатков тушамской свиты М.Ф. Нейбург [35] обнаружила окаменевшие стволы лепидофитов визейско-серпуховского возраста. Возраст свиты неоднократно уточнялся, а так как различался в зависимости от местонахождения отобранных проб, то единое геологическое тело стали рассматривать под видом различных свит (чемдальской, челдуйской и т. д.). Впоследствии О.А. Бетехтина писала, что в Приангарье в районе ее стратотипа установлена турнейская и визейская флора, а в

районе р. Чадобец она содержит евсеевскую флору серпуховского возраста [12]. Причиной этого возрастного несоответствия отложений единого геологического тела, сформированного в Ангаро-Тунгусском осадочном бассейне, явилось большое возрастное различие отложений, возникшее вследствие смещения бассейна седиментации под воздействием поднятия гетерогенных блоков фундамента платформы [5]. Произошла медленная миграция (ингрессия) бассейна седиментации в западном направлении. Подобная внутриконтинентальная ингрессия была отмечена во многих осадочных бассейнах Мира [50, 47].

В настоящее время получен новый материал, полностью подтверждающий модель последовательности этой ингрессии (рис. 2). Проведенный фациальный анализ исследуемых отложений позволил установить, что миграция депоцентра Ангаро-Тунгусского осадочного бассейна происходила с востока на запад на протяжении всей раннекаменноугольной эпохи, включая ее переходные временные рубежи. Именно поэтому в однообразном псаммитовом составе осадочного наполнения бассейна обнаружены ископаемые остатки и споры растений турнейского, визейского и серпуховского возрастов [9]. Именно поэтому тушамский горизонт не имеет четкой палеонтологической характеристики.

Древнее Таймырское мелководное море заходило далеко в глубь Сибирской платформы, образуя обширные заливы и равнины, временами заливаемые морем (рис. 3). Именно в этих условиях формировались нижнекаменноугольные отложения тычанской, шушукской, суриндинской свит, а также «бедошминские», «танадинские» и другие слоевые комплексы.

Тычанская свита впервые выявлена в среднем течении р. Тычаны [31]. Ее стратиграфическими аналогами являются отложения шушукской и тушамской свит (рис. 4). В основании свиты располагаются переотложенные продукты коры выветривания. Они представлены каолиновыми аргиллитами, которые перекрывают грубообломочные отложения, содержащие визе-серпуховские и спорадические верхнедевонские миоспоры, что позволяет сопоставлять их с тушамской свитой Ангаро-Тунгусского бассейна. Присутствие в составе нижней части свиты девонских миоспор свидетельствует о размыве и переотложении не только каолиновой коры выветривания, но и верхнедевонских отложений. Необходимо отметить, что девонские миоспоры

обнаружены не только в базальных слоях свиты, но и в породах ее верхней части. Песчаники вмещают отдельные валуны окремненных строма-толитовых доломитов ордовика и плавающую¹ гальку кварцитовидных песчаников.

Для свиты характерно большое количество материала со слабой гранулометрической сортировкой и беспорядочная пространственная ориентировка удлиненных обломков гравийно-галечного материала. Их базальный конгломератовый пласт (0,4–1,6 м) залегает на размытой поверхности известняков нижнего ордовика. Матриком у конгломератов служат лимонитизированные кварцевые алевропесчаники с примесью каолинита.

Выше по разрезу залегают зеленовато-серые, иногда охристо-бурые песчаники и алевропесчаники с тонкими (до 2 см) линзовидными прослойками зеленых аргиллитов. По всему разрезу пачки встречаются редкая галька и гравий кремневого состава. Кровля свиты сложена зеленовато-серыми и серыми известковистыми кварцевыми алевролитами и алевропесчаниками.

Следует отметить, что в местах развития карбонатно-терригенных образований верхнего кембрия базальный гравийно-галечный пласт тычанской свиты залегает на каолинит-маршаллитовой коре выветривания. Иногда в западинах погребенного рельефа, на размытой коре выветривания встречаются слабо литифицированные кварцевые песчаники, неравномерно обогащенные гравийно-галечным материалом, в составе которого содержатся алмазы и их спутники.

Кропотливый поиск ископаемых отпечатков флоры позволил обнаружить только один отпечаток лепидофита плохой сохранности, который, по определению Л.Н. Петерсон [36], относится к *Angarodendron obrutschewii* Zal. По ее данным, шушукский споровый комплекс содержит большое количество (до 45 %) мелких отороченных спор лепидофитов родов *Lycospora*, *Densosporites* и *Vallatisporites*. Кроме того, в его составе выявлены *Granulatisporites testicutatus* Luben, *Umbonatisporites sibiricus* Pashkevich, *Spelaeotrietes baculus* Peterson, *Retusotrietes setosus* Kedo, *Auroraspora hyalina* (Naumova) var. *tournensis* Kedo, *Grandispora luteoia* (Naumova) Avchimovich, *Asperispora naumova* Stapiin et Jansoni-

¹ Плавающая галька – это наличие отдельных хорошо окатанных, но весьма разобщенных галек в составе массивных псаммитовых преимущественно дельтовых отложений.

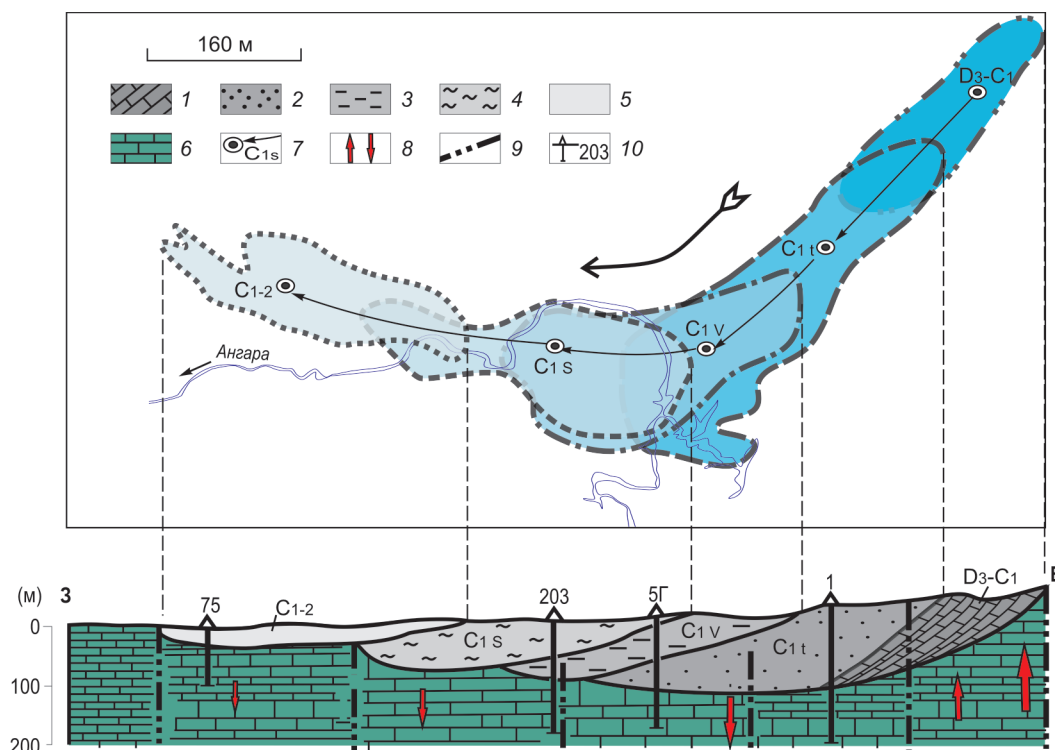


Рис. 2. Схема миграции Ангаро-Тунгусского бассейна седиментации в течение раннекаменноугольной эпохи.

1 – нерасчлененные девонские и нижнекаменноугольные карбонатизированные отложения; 2–4 – нижнекаменноугольные породы различных ярусов: 2 – турнейского, 3 – визейского, 4 – серпуховского; 5 – нерасчлененные ниже- и среднекаменноугольные; 6 – подстилающие карбонатные породы кембрия и терригенно-карбонатные – ордовика; 7 – направление миграции депоцентра; 8 – господствующее направление тектонических движений; 9 – тектонические нарушения (разломы); 10 – опорная скважина и ее номер

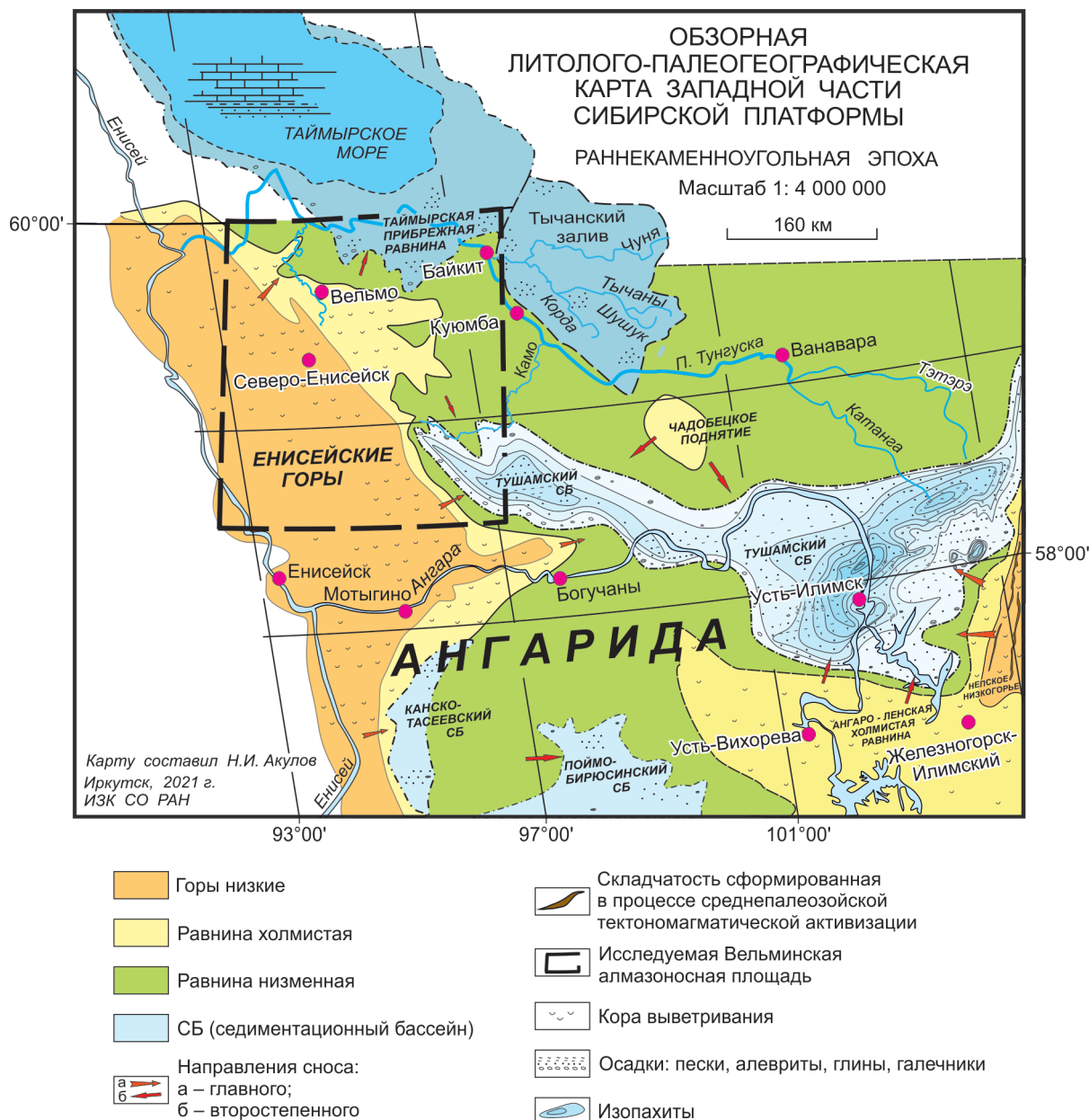
Fig. 2. Scheme of migration of the Angara-Tunguska sedimentation basin during the Early Carboniferous Period.

1 – undivided Devonian and Lower Carboniferous carbonatized deposits; 2–4 – Lower Carboniferous rocks of various stages: 2 – Tournaisian, 3 – Viséan, 4 – Serpukhovian; 5 – undivided Lower and Middle Carboniferous; 6 – underlying Cambrian carbonate rocks and Ordovician terrigenous-carbonate rocks; 7 – direction of depocenter migration; 8 – dominant direction of tectonic movements; 9 – tectonic faults; 10 – reference well and its number

us. Отмечены значительное количество гладких плотных спор *Punctatisporites platirugosus* (Waltz) Sullivan, *P. plicatus* (Waltz) Sullivan и споры девонского облика *Grandispora rugosa*, *G. basilaris*, *Stenozonotriletes*, *Retusotriletes* и *Archaeozonotriletes*. Завершают приведенный список четырехлучевые споры и акритархи *Zonales* *saccatus* Troskova. По сходству данного спорового комплекса с комплексом верхотомского горизонта Кузбасса и верхней части курунгурахской свиты северо-восточной части Сибирской платформы (Кемпендйская впадина) свита датирована визейским веком.

На юго-востоке от поля развития тычанских алмазонасных отложений в субмеридиональном направлении простираются аналогичные алмазонасные образования, названные шушукским коллектором (шушукской свитой).

Шушукская свита впервые описана А.В. Крюковым по керну из скважин на Шушукском поднятии [30]. Это полный стратиграфический аналог тычанской свиты, но который залегает с размывом на породах нижнего палеозоя и перекрыт угленосными отложениями. Свита представлена серыми, голубовато- и зеленовато-серыми тонкослоистыми известковистыми алевролитами и аргиллитами с редкими прослоями алевропесчаников. В ее основании расположены серые мелкозернистые кварцевые гравелистые песчаники, которые вмещают реликты каолиновой коры выветривания. В составе свиты встречаются прослои алевропесчаников и песчаников с трещинами усыхания на плоскостях наложения, выполненные кальцитом. Для пород средней и верхней частей свиты характерна тонкая и тончайшая горизонтальная слоистость, подчеркнутая раз-



**ЛЕГЕНДА К ЛИТОЛОГО-ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИМ КАРТАМ
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ (ВЕЛЬМИНСКАЯ ПЛОЩАДЬ)**

ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ

Горы низкие
Равнина холмистая
Равнина низменная
Озеро
Прибрежная низменная равнина, временно заливаемая морем
Море

ХАРАКТЕРНЫЕ ТИПЫ ОТЛОЖЕНИЙ

Галечник с гравием	Вулканический пепел
Галечник с песком	Песок с пирокластическим материалом
Песок с включением отдельных галек (плавающих галек)	Глина с пирокластическим материалом
Песок с плавающими гальками из аргиллитов	Равномерное чередование отложений
Песок	Господство песчаных отложений над глинистыми

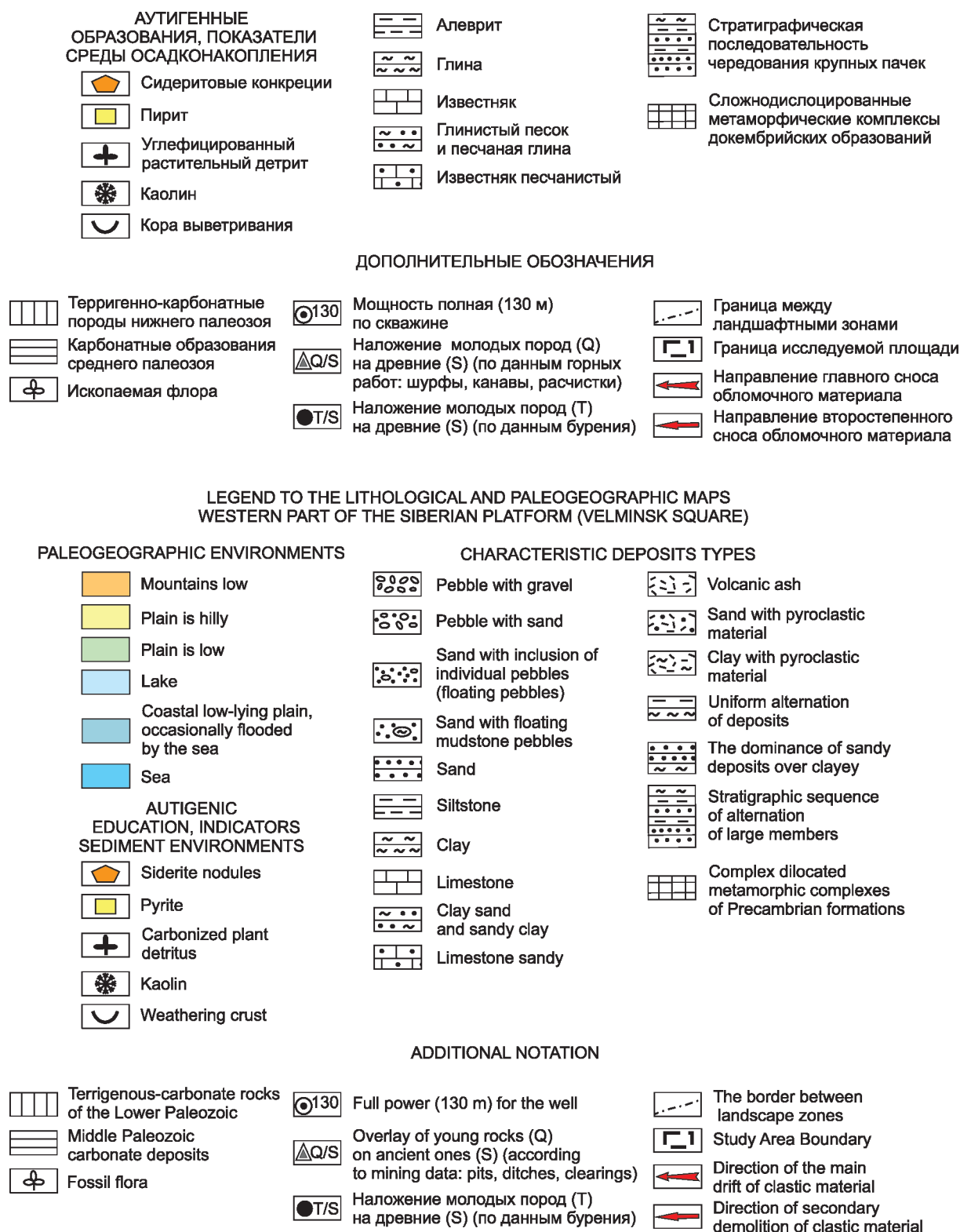


Рис. 3. Обзорная литолого-палеогеографическая карта западной части Сибирской платформы (раннекаменноугольная эпоха). Карта составлена Н.И. Акуловым

Fig. 3. Overview lithological and paleogeographic map of the western part of the Siberian Platform (Early Carboniferous Period). The map was compiled by N.I. Akulov.

КАМЕННОУГОЛЬНАЯ						СИСТЕМА	
НИЖНИЙ			СРЕДНИЙ - ВЕРХНИЙ			ОТДЕЛ	
ТУРНЕЙСКИЙ	ВИЗЕЙСКИЙ	СЕРПУХОВСКОЙ	БАШКИРСКИЙ	МОСКОВСКИЙ	КОСИМОВСКИЙ	ЯРУС	
ТУШАМСКИЙ			ЯНГОТОЙСКИЙ	КАТСКИЙ			ГОРИЗОНТ
Φ₃ - O₁			ТЫЧАНСКАЯ		ЧИНОКСКАЯ		
			СУРИНДИНСКАЯ		ЧИНОКСКАЯ		
O₂			ТЫЧАНСКАЯ		СУРИНДИНСКАЯ		
			СУРИНДИНСКАЯ		КАТСКАЯ		
ШУШУКСКАЯ			ТЫЧАНСКАЯ		СУРИНДИНСКАЯ		
O₁			ТЫЧАНСКАЯ			ЧИНОКСКАЯ	
			Пачка - А			Пачка - Б	Пачка - В
Φ - O			СУРИНДИНСКАЯ		ЧИНОКСКАЯ		
			СУРИНДИНСКАЯ		ЧИНОКСКАЯ		
Φ - O			ТЫЧАНСКАЯ		СУРИНДИНСКАЯ		
			СУРИНДИНСКАЯ		ЧИНОКСКАЯ (КАТСКАЯ)		
Подстилающие породы							

Рис. 4. Схема взаимоотношения алмазоносных отложений в западной части Сибирской платформы

Fig. 4. Scheme of the relationship of diamond-bearing deposits on the western part of the Siberian Platform

мерностью зерен и разной степенью известковистости. В составе тяжелой фракции песчаников содержатся ильменит, магнетит, пироксен, турмалин, циркон, барит, эпидот, рутил, лейкоксен, альмандин и пироп. Особенности литологического состава данных отложений и последовательность их напластования в разрезе позволяют отнести их к мелководным, прибрежно-морским.

Споровый комплекс, выявленный в составе свиты, состоит как из переотложенных девонских форм, так и из спор раннекаменноугольного возраста. Всего в исследуемых отложениях обнаружено более 80 видов спор [36]. Изученные комплексы миоспор позволяют коррелировать вмещающие их отложения с визе-серпуховскими образованиями. Вскрытая мощность свиты 17–25 м.

Суриндинская свита впервые выделена Ю.С. Глуховым [19] в бассейне р. Суринда, где она с размывом залегает на различных горизонтах силура и девона и перекрывается угленосными отложениями чинокской свиты. Свита представлена ритмично-слоистыми разнотекстурными песчаниками (кварцевыми, олигомиктово-кварцевыми и кварц-полевошпатовыми) и алевролитами серовато-розовой окраски с горизонтальной, волнистой, линзовидно-волнистой и косо-волнистой слоистостью.

Отложения суриндинской свиты и ее возрастные аналоги имеют важное значение для поисков алмазов. В Якутской алмазоносной провинции подобные доугленосные слои лапчанской свиты являются основным промежуточным коллектором алмазов с промышленной алмазоносностью.

Возраст свиты обоснован по находкам отпечатков ископаемых растений *Angarodendron obrutschewii* Zal. и многочисленного комплекса миоспор, указывающих на принадлежность данных отложений к янготойскому горизонту (средний карбон).

Чинокская свита выделена Ю.С. Глуховым [19] по керну из скважин, пройденных в среднем течении р. Подкаменная Тунгуска. Средняя мощность свиты около 50 м. Ее стратиграфическим аналогом является широко развитая на Сибирской платформе промышленно-угленосная катская свита.

В береговых разрезах высотой до 30 м она согласно залегает на тычанской свите и сложена желтовато-серыми и серыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами и каменными углями рабочей мощности. По сведениям Н.Б. Доновой [21],

на правом берегу р. Чуня, в нижней части чинокской свиты обнаружена фауна пелеципод *Anthrocomya (?) pigmaea* Tschern., *A. tatarica* Tschern. (определения И.М. Маловецкой), конхострак *Limnadia triangularis* Fritsch (определения Н.И. Новожилова) и рыб *Acrolepis macropoma* Berg (определения Д.В. Обручева). Кроме того, в чинокской свите выделены два флористических комплекса. По определениям Е.С. Рассказовой, С.В. Мейена и других исследователей [36], нижний комплекс представлен *Paracalamites* sp., *Cordaitea* sp., *Samaropsis* sp., *Angarodendron* cf. *obruutschewii* Zalesky, *Angaropteridium* sp., *A. cardiopteroides* (Schmalhausen) Zalesky, *Koretrophyllites mungaticus* Radczenko, *Annularia asteriscus* Zalesky, *Angaridium potanini* (Schmalhausen) Zalesky, *Rufioria subangusta* (Zalesky) S. Meyen, *R. tschirkovae* (Zalesky) S. Meyen, *Neuropteris izylensis* (Tschirkova) S. Meyen. Верхний комплекс представлен *Rufioria theodori* (Zalesky et Tschirkova) S. Meyen, *R. subangusta* (Zalesky) S. Meyen, *Samaropsis subrotunda* Rasskazova, *S. jurabaensis* Rasskazova, *S. ungensis* Zalesky, *Samarospadix penicillata* Neuburg, *Paragondwanidium sibiricum* (Petunnikov) S. Meyen, *Neuropteris djavolskiensis* Suchov, *Ginkgophyllum primaevus* Rasskazova, *Angaropteridium cardiopteroides* (Schmalhausen) Zalesky, *Angaridium finale* Neuburg. Характерно присутствие таксонов, близких к пермским, – *Angaridium* typ. *ignotum* Neuburg, *Bardocarpus* aff. *depressus* (Schmalhausen) Zalesky. Согласно многочисленным палеонтологическим находкам, возраст чинокской свиты средне-позднекаменноугольный.

Завершая рассмотрение стратиграфических особенностей нижнекаменноугольных отложений Западной части Сибирской платформы, необходимо затронуть вопрос о так называемых бедошемских и танадинских слоях [16, 17], или правильнее сказать – слоевых комплексах. Это проблематичные нижнекаменноугольные алмазоносные отложения, которые из-за их малой мощности, отсутствия палеонтологических данных и других стратиграфических особенностей невозможно выделить в качестве свит. По всей видимости, это стратиграфические аналоги тычанской свиты.

«Бедошемские» слои (до 10,7 м) распространены в южной части исследуемого района. Они приурочены к коре выветривания, развитой по породам нижнего палеозоя, и перекрыты угленосной формацией Тунгусского угольного бас-

сейна. Их условно делят на две части. Нижняя часть сложена слабосцементированными, в различной степени разнозернистыми косослоистыми кварцевыми песчаниками с линзами конгломератов и гравелитов, состоящих из плохо окатанных обломков окремненных песчаников, кварца и кварцитов. Местами в песчаниках присутствуют отдельные валуны (до 0,35 м) окремненных строматолитовых доломитов и кварцитовидных песчаников, характерных для тычанского коллектора. В конгломератах найдены алмазы и их спутники – пиропы и хромшпинелиды. Верхняя часть представлена светло-серыми разнозернистыми полевошпатово-кварцевыми песчаниками с тонкими линзами и прослоями гравия и светло-коричневых аргиллитов. Фациальный анализ отложений показал, что они сформировались в условиях прибрежно-бассейновых заливных лагун.

«Танадинские» слои (до 9,5 м) развиты в пределах рек Танади и Чандымба, где залегают на размытой поверхности известняков нижнего ордовика, и представлены переслаивающимися светло-серыми, белыми и желтовато-коричневыми кварцевыми песчаниками и алевролитами. К основанию пачки приурочены разногалечные содержащие пиропы конгломераты с примесью угловатых обломков подстилающих пород ордовика.

Следует отметить, что наряду с данными словесными комплексами на исследуемой территории вскрыты нижнекаменноугольные осадки древнего Таймырского моря, которые объединены в состав джалтулинской свиты, в шельфовой зоне фациально замещающей кондроминской.

Джалтулинская свита выделена в 1939 г. В.П. Табеньковым, И.В. Моисеевым и А.Ф. Михайловым в бассейне р. Бахта. Свита залегает с разрывом на образованиях верхнего девона. В ее составе отмечены известковистые алевролиты и аргиллиты, мергели, известняки, песчаники и гравелиты. В песчаниках нижней части свиты присутствуют известковые оолиты и обломки известняков с остатками фораминифер, иглокожих и брахиопод. В верхней части свиты наблюдается примесь пирокластического материала, окраска пород зеленовато-серая. Раннекаменноугольный возраст отложений определен на основании находок фораминифер [39]. Вскрытая толщина свиты 46,5 м. Литологические особенности пород свидетельствуют о накоплении отложений джалтулинской свиты в эпи-

континентальном мелководном бассейне, имевшем периодическую связь с морем.

Кондроминская свита выделена в 1951 г. Г.Ф. Лунгерстаузенем, Н.В. Дреновым и Н.В. Житковой в бассейне р. Кондромо. Она залегает со стратиграфическим несогласием на различных уровнях ордовика, силура, девона. Литологический состав свиты довольно однообразен и представлен крепко сцементированными хорошо отмытыми белыми кварцевыми песчаниками, конгломератами и гравелитами. Конгломераты состоят из округло-уплощенной формы галек и вмещают отдельные валуны. Кондроминская свита, рассматриваемая как фациальный аналог джалтулинской, формировалась, вероятно, в условиях прибрежной низменной равнины с многочисленными мелкими разрозненными бассейнами с активным гидродинамическим режимом. Свита отвечает регрессивному асимметричному макро-ритму в составе песчаных, редко алевроитовых отложений аллювиально-бассейновых фаций. Толщина свиты достигает 45 м.

Алмазоносность отложений

В составе нижнекаменноугольных алмазоносных коллекторов обнаружены кристаллы алмазов и множество высокобарических минералов, морфологические особенности которых указывают на существование местных алмазоносных тел, располагавшихся в провинции питания терригенным материалом.

Многочисленные исследования показали, что раннекаменноугольный этап развития Сибирской платформы начался с активной деятельности эрозионно-денудационных процессов, способствовавших разрушению кимберлитовых тел переходного возраста от позднедевонской эпохи к раннекаменноугольной. В те времена с возвышенных участков (провинций питания) Ангарида из разрушенных выветриванием кимберлитовых тел, под воздействием временных водных потоков происходил снос алмазов и их спутников в бассейны седиментации. Вблизи вулканических тел формировались россыпи ближнего сноса. Их образование происходило не синхронно, местами через века раннекаменноугольной эпохи. На побережье Таймырского моря и в его заливах аккумуляровались алмазоносные россыпи дальнего сноса (тычанский и шушукский коллекторы).

Наиболее детально нами изучен тычанский алмазоносный коллектор, который расположен на площади более 3 тыс. км² и охватывает бас-

сейны рек Тычаны, Чуня и их водораздел (см. рис. 1). Исследованный ореол алмазов приурочен к полю распространения нижнекаменноугольных отложений, который в виде сложно изгибающейся ленты простирается в северо-западном направлении на расстоянии около 250 км. Коллектор залегает на верхнеордовикских отложениях.

В процессе геолого-поисковых работ коллектор был вскрыт и опробован на шести участках. В общем объеме было отмыто 173 т гравийно-песчано-галечной массы, из которой извлечено 77 алмазов (2372,3 мг) при среднем весе 30,8 мг и содержании 13,7 мг/т. Кристаллы алмазов из данного коллектора представлены преимущественно мелкими прозрачными додекаэдрами различной модификации (рис. 5). По определению В.И. Коптиля [26], тычанские алмазы представлены преимущественно октаэдр-ромбододекаэдрами (до 75 %), додекаэдрами (до 15 %) и их обломками (до 10 %). Проведенный гранулометрический анализ алмазов из исследуемых отложений показал, что они тесным образом связаны как с гранулометрией минералов тяжелой фракции, так и с гранулометрией минералов-спутников алмазов, причем последние характеризуются сильным механическим износом и довольно узкой цветовой гаммой, свидетельствующими об их естественной сортировке в процессе неоднократного перемыва и переотложения в прибрежно-морских условиях.

Многолетний опыт изучения морфологии алмазов на Сибирской платформе позволил выделить пять типов алмазов, вероятно, связанных с разными типами коренных источников (кимберлитовый, импактный, лампроитовый и два из неизвестных источников) [11]. На исследуемой территории геологами-производственниками были извлечены алмазы из девяти пространственно-разобщенных участков тычанского алмазоносного коллектора (расстояние между крайними точками около 100 км), для которых характерны высокий (25,2 мг) средний вес кристаллов алмазов и полное отсутствие мелочи (класс $-1+0,5$ мм). Их генетический анализ показал, что они принесены из трех типов первоисточников. Типоморфные особенности алмазов указывают на преобладание алмазов «мирнинского»¹

¹ «Мирнинский» тип – это алмазы, обнаруженные в пределах Якутской алмазоносной провинции, а «енисейский» и «уральский» типы – алмазы, найденные в отрогах Енисейского кряжа и Уральских гор.

типа (свыше половины от всех кристаллов) при заметных содержаниях ассоциации алмазов «енисейского» типа (около 40 %). Из всех изученных алмазов 15 % округлых алмазов «уральского» типа, характерных для терригенных докембрийских формаций Мира [25, 26]. Отмечена тенденция увеличения содержания ассоциации алмазов «енисейского» типа с увеличением крупности кристаллов в классе $-4+2$ мм по сравнению с классом $-2+1$ (почти в 2 раза).

Базальные гравийно-галечные конгломераты, приуроченные к пониженным участкам древнего рельефа, имеют глинисто-карбонатный цемент и обладают мощностью до 1,2 м. Граница распространения коллектора и его ореола до конца не установлена, так как скрыта под более молодыми отложениями. Наряду с пиропами в шлихах, отмытых из протолченных конгломератов и песчаников, присутствует пикроильменит, количество которого достигает 25 % от всего состава минералов тяжелой фракции. Пикроильмениты крупные (до 0,9 мм) представлены угловато-окатанными или неправильно округлыми зернами с бугорчатой резорбированной поверхностью. Нередко они покрыты «рубашкой» из микроагрегатного лейкоксена. Относительно слабая окатанность пикроильменитов, большой размер зерен и наличие на поверхности лейкоксеновой «рубашки» указывают на их сравнительно близкий перенос.

Многочисленные пиропы, содержащиеся в составе тяжелой фракции базальных слоев тычанской свиты, хорошо сортированы и окатаны. На их поверхности видны многочисленные каверны, которые свидетельствуют об их пребывании в коре выветривания (рис. 6). Тычанские пиропы совместно с другими спутниками алмазов прошли путь преобразования своей формы вначале в процессе пребывания их в коре химического выветривания в составе материнских пород, затем в процессе износа при транспортировке и, наконец, в процессе истирания при окатывании и сортировке в прибрежной зоне бассейна седиментации.

Тычанские пиропы по цвету делятся на две группы: светло-фиолетовые (хромсодержащие, ультраосновного парагенезиса) и оранжево-желтые (бесхромовые, эфолитового парагенезиса) (рис. 7). В Якутской алмазоносной провинции подобного цвета пиропы встречены в кимберлитах «Январского» месторождения [27] и в дру-

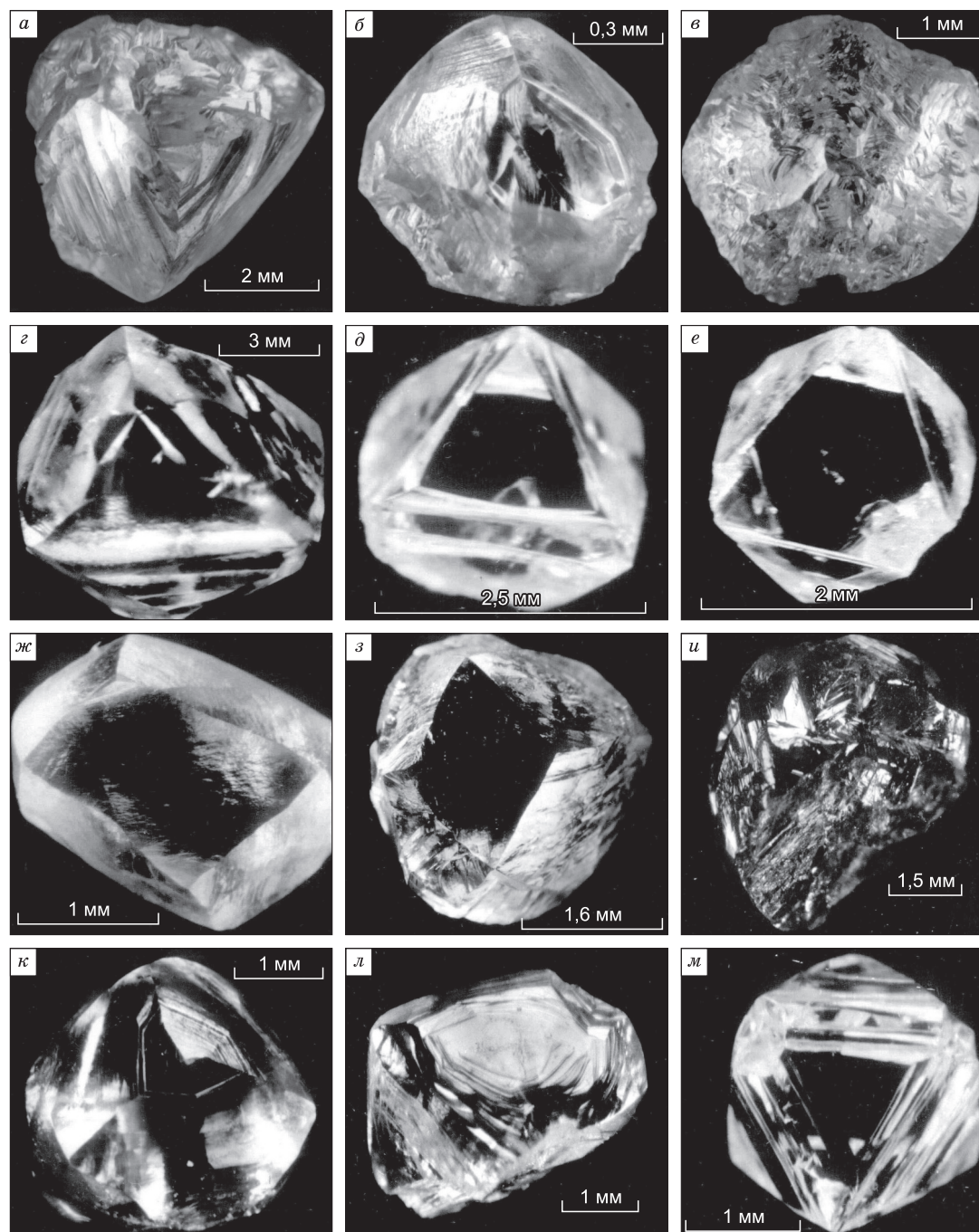


Рис. 5. Алмазы из нижнекаменноугольных отложений западной части Сибирской платформы. Фотографии сделаны С.В. Благодатским и скомпонованы Н.И. Акуловым. Описание алмазов выполнено В.И. Коптелом.

a – бесцветный шпинелевый двойник кристаллов ромбододекаэдрического габитуса весом 61,8 мг, размером 4×3,6×2,6 мм с участка Сунгтапчу-Центральный; *б* – серовато-коричневый шпинелевый двойник додекаэдров весом 10,6 мг; *в* – розовато-коричневый прозрачный шпинелевый двойник кристаллов переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитуса весом 70,4 мг с участка Сунгтапчу-Центральный; *г* – бесцветный и прозрачный кристалл октаэдра, весом 99,7 мг с участка Ханули; *д* – бесцветный октаэдр со сколом аллювиального происхождения, весом 16 мг с участка Бугарикта; *е* – октаэдр с притупленными ребрами с леденцовой скульптурой, весом 16 мг с участка Бугарикта; *жс* – розовато-коричневый додекаэдронд с шагренью, прозрачный, весом 27,9 мг с участка в районе скв.17; *з* – бесцветный и прозрачный шпинелевый двойник додекаэдра с шагренью, весом 111,8 мг с участка в районе скв.17; *и* – дымчато-серый полупрозрачный интенсивно отбитый кристалл ромбододекаэдрического габитуса, весом 188,7 мг с участка Ханули; *к* – бесцветный и прозрачный шпинелевый двойник додекаэдра со сноподобной штриховкой, весом 71,5 мг с участка Ханули; *л* – бесцвет-

ный и прозрачный обломанный кристалл октаэдрического габитуса с участка Кирамкима; *м* – бесцветный и прозрачный кристалл октаэдрического габитуса с вогнутыми гранями с участка Кирамкима

Fig. 5. Diamonds from the Lower Carboniferous deposits on the western part of the Siberian Platform. Photos were taken by S.V. Blagodatsky and arranged by N.I. Akulov. The description of diamonds was made by V.I. Koptel.

a – colorless spinel twin of crystals of rhombic dodecahedral habit weighing 61.8 mg, 4×3.6×2.6 mm in size from the Sungtapchu-Central site; *б* – grayish-brown spinel twin of dodecahedroids weighing 10.6 mg; *в* – pinkish-brown transparent spinel twin of crystals transitional from octahedral to rhombododecahedral habit, weighing 70.4 mg from the Sungtapchu-Central site; *г* – colorless and transparent octahedron crystal, weighing 99.7 mg from the Hanuli site; *д* – colorless octahedron with a cleavage of alluvial origin, weighing 16 mg from the Bugarikt site; *е* – an octahedron with blunt edges with a candy sculpture weighs 16 mg from the Bugarikt site; *ж* – pinkish-brown dodecahedroid with shagreen, transparent, weighs 27.9 mg from a site near well 17; *з* – colorless and transparent spinel twin of a dodecahedron with shagreen, weighs 111.8 mg from a site near well 17; *и* – smoky gray translucent intensely broken crystal of rhombic dodecahedral habit, weighs 188.7 mg from the Khanuli site; *к* – colorless and transparent spinel twin of the dodecahedron with sheaf-like shading, weighs 71.5 mg from the Hanuli site; *л* – colorless and transparent broken crystal of octahedral habit from the Kiramkim site; *м* – colorless and transparent crystal of octahedral habit with concave faces from the Kiramkim site

гих местах [51, 42]. Здесь также преобладают фиолетовые (91 %) пиропы, при этом содержание красных – 5, оранжевых – 3, а розовых – около 1 %.

По данным микронзондового анализа, среднее содержание оксидов хрома в тычанских пиропсах около 3,3 %. Пиропы с подобным содержанием Cr_2O_3 характерны для низкоалмазоносных трубок Якутской провинции (Амакинская – 1,2 %, Таежная – 1,6, Лось – 1,4 %), в то время как в высокопродуктивных трубках этой провинции их содержание достигает нескольких десятков процентов (Удачная – 21,0 %, Айхал – 20,8 %). Согласно генетической диаграмме, предложенной Н.В. Соболевым [41], основная часть фигуративных точек тычанских пиропов приурочена к классификационному полю лерцолитового парагенезиса (рис. 8). По данным А.П. Гунина и его коллег [20], аналогичный химический состав пиропов отмечен на трубке «Галина» в Архан-

гельской алмазоносной провинции. Кроме того, подобный состав пиропов выявлен и на кимберлитовой трубке «Заполяная» в Якутской алмазоносной провинции [37] (см. рис. 8). Таким образом, исследуемые пиропы несомненно возникли из кимберлитовых тел, которые, по всей видимости, погребены в районе междуречья Вельмо–Подкаменная Тунгуска.

Вещественный состав и условия формирования алмазоносных отложений

Для алмазоносных пород тычанской свиты характерна удовлетворительная сортировка обломочного материала. В составе обломочной составляющей преобладают минералы, устойчивые к химическому выветриванию. Среди зерен размером 0,05–0,5 мм резко преобладают в различной степени окатанные и угловатые, относительно изометричные обломки кварца, достигающие 50 % от общего количества зерен в пробе. В том числе присутствуют различно окатанные обломки кремней, микрокварцитов и халцедона. Их содержание резко возрастает в конгломератах, гравелитах и разнозернистых песчаниках.

Полевые шпаты (до 20 %) встречаются преимущественно в мелких зернах (до 0,25 мм). Обычно они наблюдаются в виде угловатых или полуокатанных, часто удлиненных зерен таблитчатой формы, на 60–90 % представленных ортоклазами и решетчатыми микроклинами. В большинстве случаев они выветрелые (пелитизированы), при этом по плагиоклазам развивается серицит. Часто присутствуют обломки кремнистых и карбонатных (до 20 %) пород. Почти повсеместно присутствуют чешуйки слюд, представленные буровато-коричневым биотитом (до 10 %) и прозрачным мусковитом (до 5 %).

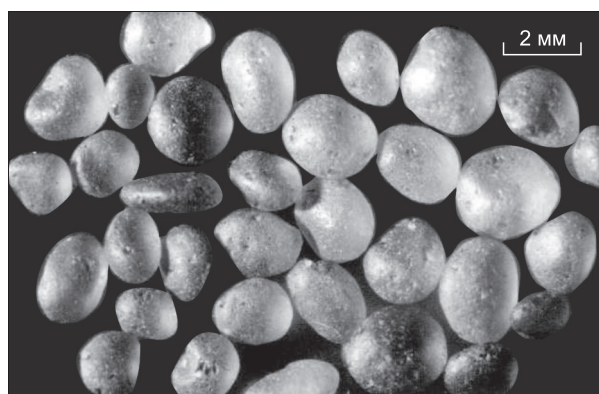


Рис. 6. Хорошо окатанные и сортированные кавернозные пиропы тычанского коллектора (Тычанский залив)

Fig. 6. Well-rounded and sorted cavernous pyropes of the Tychansky reservoir (Tychansky Bay)

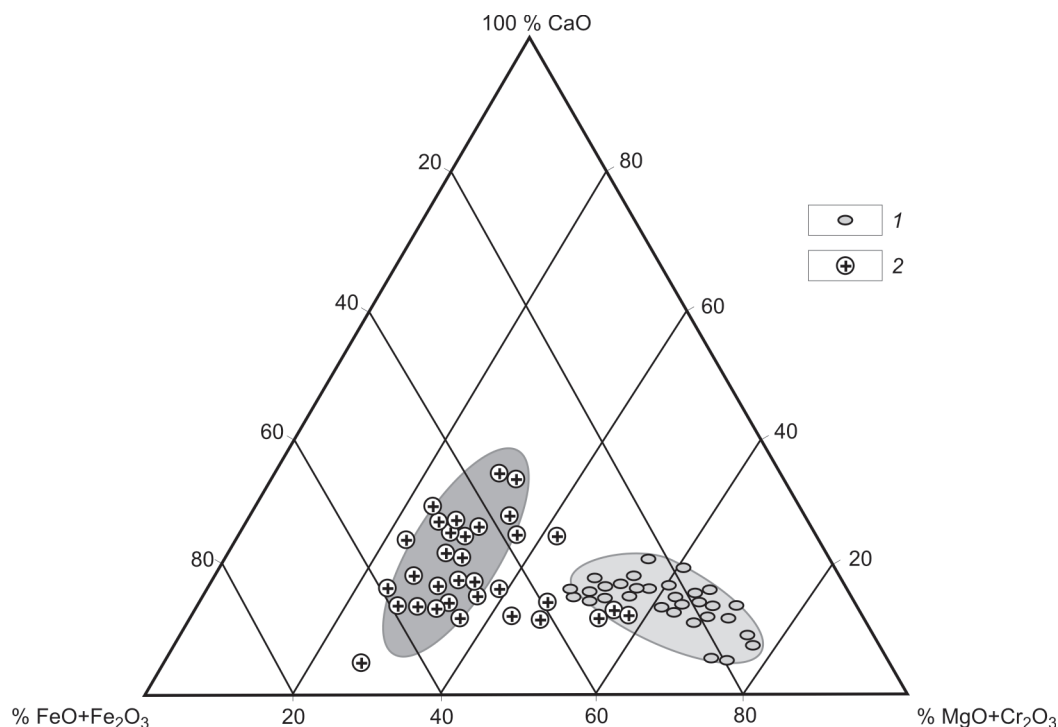


Рис. 7. Содержание некоторых оксидов в пиропсах Тычанского коллектора: 1 – пиропы из ультраосновных и 2 – эколгитовых парагенезисов

Fig. 7. The content of some oxides in the pyropes of the Tychansky reservoir: 1 – pyropes from ultrabasic and 2 – eclogitic parageneses

Количество минералов тяжелой фракции в тычанских породах незначительно (около 1 кг/м^3), что свидетельствует о неоднократном перемыыве и переотложении данных отложений. В составе тяжелой фракции размерностью $0,1\text{--}0,25 \text{ мм}$ господствует ильменит-гранат-цирконовая ассоциация, с наличием турмалина, рутила, апатита, ставролита и шпинели. В долях процента встречаются эпидот, пироксен и хлорит. Содержание ильменита с учетом наличия лейкоксена и анатаза достигает 58% (рис. 9). Среди гранатов, количество которых достигает 74% , преобладают бесцветные и розово-красные зерна, местами с кавернозной поверхностью, что свидетельствует об их пребывании в коре выветривания. Важно отметить, что в базальных пластах свиты в составе тяжелой фракции присутствуют пиропы и алмазы. Из аутигенных минералов доминирует пирит, но встречаются марказит и лимонит.

Глинистая фракция в составе цемента песчаников весьма неоднородная. Обычно присутствует один или три глинистых минерала: монтмориллонит, каолинит или гидрослюда. По данным рентгеноструктурного анализа выявлены неупорядочен смешанно-слоистые минералы типа

гидрослюда-монтмориллонит с присутствием хлорита и каолинита. Вероятно, господство смешанно-слоистого минерала гидрослюдисто-монтмориллонитового типа связано с разложением и преобразованием вулканического пепла. В образцах из подошвы свиты всегда преобладает каолинит, вследствие размыва и переотложения подстилающих продуктов коры выветривания, развитой на нижнепалеозойских отложениях.

Ранее проведенные палеогеографические реконструкции для западной части Сибирской платформы показали, что формированию нижнекаменноугольных отложений предшествовал региональный перерыв осадконакопления [15]. Он совпал во времени со среднепалеозойской эпохой ($D_3\text{--}C_1$) тектономагматической активизации, в период которой произошло внедрение кимберлитового магматизма и сформировалась Якутская алмазоносная провинция [46]. Среднепалеозойская активизация (эпиplatformенный орогенез) на Сибирской платформе выразилась в поднятии гетерогенных блоков фундамента платформы и проявлении ультраосновного магматизма различного состава и типа, в том числе и в виде кимберлитовых трубок взрыва. По всей

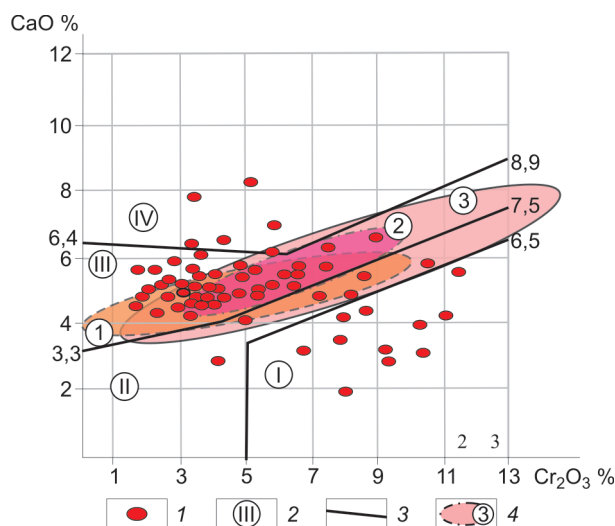


Рис. 8. Распределение пиропов из тычанского коллектора на диаграмме Н.В. Соболева [41].

1 – фигуративные точки тычанских пиропов; 2 – классификационные поля пиропов, разработанные Н.В. Соболевым: I – потенциально алмазоносного парагенезиса, II – гарцбургит-дунитового парагенезиса, III – лерцолитового парагенезиса, IV – верлитового парагенезиса; 3 – граница классификационных полей; 4 – господствующее расположение полей пиропов (приведены для сравнения): 1 – Якутская алмазоносная провинция, Верхнемунское поле, кимберлитовая трубка «Заполярная» [37]; 2 – Архангельская алмазоносная провинция, кимберлитовая трубка «Галина» [20]; 3 – Якутская алмазоносная провинция, Накынское поле, кимберлитовая трубка «Майская» [43]

Fig. 8. Distribution of pyropes from the Tychansky reservoir in the diagram by N.V. Sobolev [41].

1 – figurative points of Tychansky pyropes; 2 – classification fields of pyropes developed by N.V. Sobolev: I – potentially diamond-bearing paragenesis, II – harzburgite-dunite paragenesis, III – hercynite paragenesis, IV – wehrlite paragenesis; 3 – boundary of classification fields; 4 – dominating location of pyrope fields (given for comparison): 1 – Yakutsk diamondiferous province, Upper Munskey field, Zapolyarnaya kimberlite pipe [37]; 2 – Arkhangelsk diamondiferous province, kimberlite pipe “Galina” [20]; 3 – Yakutsk diamondiferous province, Nakynskoye field, Maiskaya kimberlite pipe [43]

видимости, эпицентр активизации находился в районе расположения Якутской алмазоносной провинции, со стороны которой началось поднятие осадочного чехла гетерогенными блоками кристаллических пород фундамента. Этот тектонический процесс вызвал многовековое смещение Ангаро-Тунгусского бассейна седиментации (тушамская свита) в западную часть платформы к отрогам Енисейских гор (см. рис. 2 и 10).

Постепенно регрессировавшее в меридиональном направлении эпиконтинентальное Таймырское море имело обширную прибрежную равнину с заливами. В конце серпуховского века завер-

шилось накопление мелководных прибрежно-морских осадков (тычанская свита), на смену которым пришли озерно-болотные фациальные комплексы тунгусской угленосной формации (чинокская и катская свиты).

Отмечено, что в составе тычанской свиты постоянно присутствуют хорошо окатанные «плавающие» гальки. По данным петрографических исследований, гальки состоят из кварцитовидных мелкозернистых песчаников и алевролитов, обломочная часть которых по составу и морфологии зерен идентична породам среднего ордовика. Вероятно, образование галек произошло в результате разрушения и окатывания при их транспортировке ордовикских песчаников и алевролитов. Таким образом, основные провинции питания терригенным материалом в раннекаменноугольную эпоху располагались не только на Енисейских горах, но и на поднятиях, сложенных нижнепалеозойскими породами.

Фациальный анализ базальных слоев тычанской свиты показал, что их накопление происходило в условиях прибрежных равнин и заливов. Хорошо отмытые и окатанные преимущественно светло-серые конгломераты, гравелиты и кварцевые песчаники формировались в шельфовой зоне постепенно регрессировавшего моря. На приподнятых участках низменной и холмистой равнин, ранее залитых морем, господствовали эрозивно-аккумулятивные процессы. Здесь формировались фации склонов, речных долин, озер и болот. Все фациальные особенности отложений были обусловлены ландшафтно-динамическими условиями осадконакопления.

После породного наполнения бассейнов седиментации произошла нивелировка рельефа в провинциях питания и на водосборах, что вызвало снижение гидродинамической активности поверхностных водотоков, которые на завершающем этапе формирования тычанской свиты поставляли в бассейн преимущественно глинисто-алевритовый и карбонатный (в виде суспензий и взвесей) материал. Наличие линзовидных прослоев песчаников в алевролитовых пластах, а также присутствие в них примеси и тонких прослоев гравия могут быть объяснены как периодической интенсификацией поверхностных водотоков, так и волновым отмучиванием осадков в пределах внутриводосборных отмелей. По всей видимости, осадконакопление происходило в слабо осолоненном заливе, в разных частях которого накапливались разнофациальные тер-

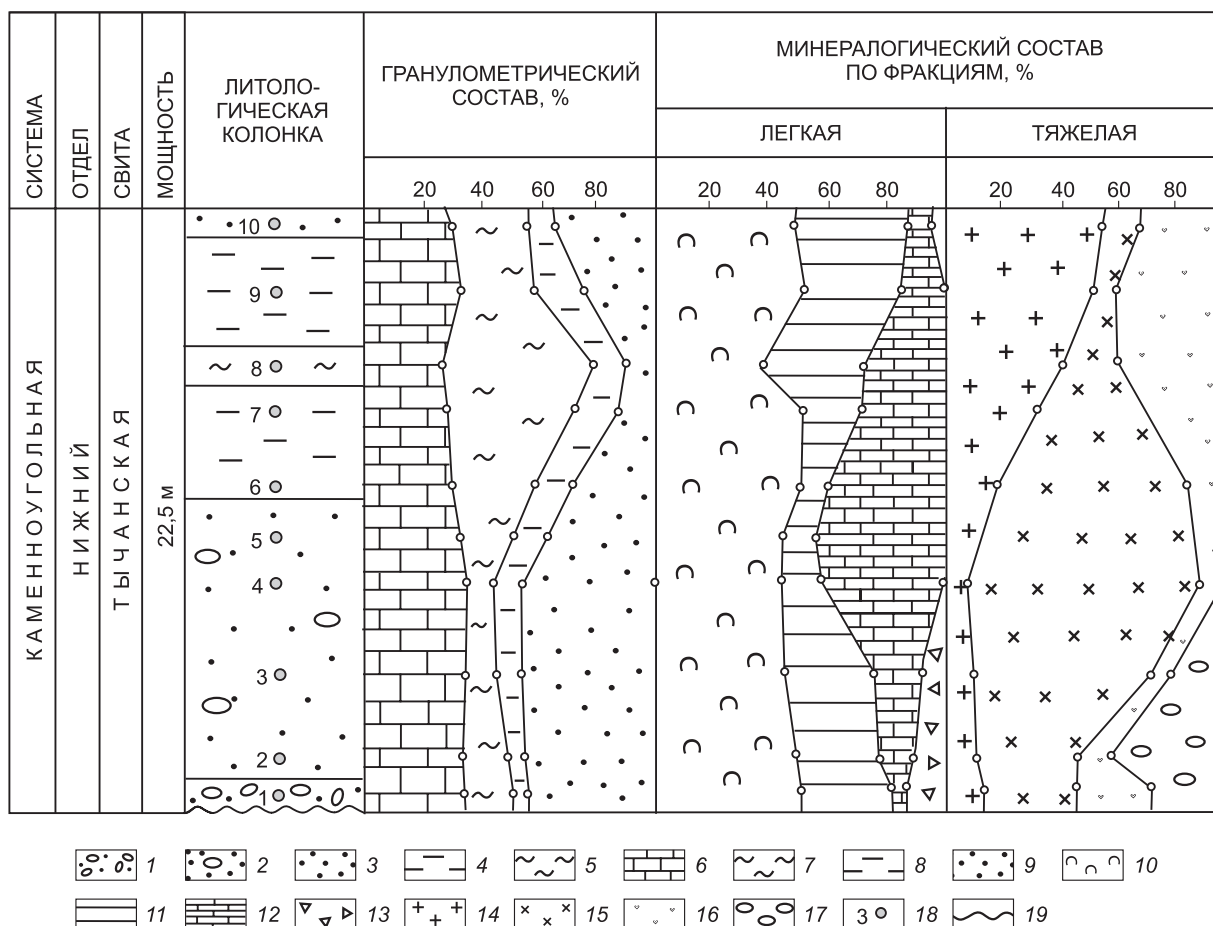


Рис. 9. Литолого-стратиграфический разрез тычанской свиты по скважине ТР-57, пройденной в древнем Тычанском заливе

1–5 – типы пород: гравийно-песчаные (1), песчаники разномерные известковистые с включениями гравия (2), песчаники мелкозернистые (3), алевролиты известковистые (4), аргиллиты (5); 6–9 – гранулометрический состав по фракциям: карбонатная (6), глинистая (7), алевроитовая (8), песчаная (9); 10–17 – минералогический состав легкой (10–13) и тяжелой (14–17) фракций: кварц (10), полевой шпат (11), карбонаты (12), преимущественно кремнистые обломки пород (13), ильменит (14), гранат (15), циркон (16), пирит (17); 18 – место отбора пробы и ее номер; 19 – залегание исследуемых пород с размывом на верхнекембрийских известняках вельминской свиты

Fig. 9. Lithological and stratigraphic section of the Tychanskaya suite along the TR-57 well, drilled in the ancient Tychansky Bay

1–5 – types of rocks: gravel-sandy (1), inequigranular calcareous sandstones with inclusions of gravel (2), fine-grained sandstones (3), calcareous siltstones (4), mudstones (5); 6–9 – granulometric composition by fractions: carbonate (6), clayey (7), silty (8), sandy (9); 10–17 – mineralogical composition of light (10–13) and heavy (14–17) fractions: quartz (10), feldspar (11), carbonates (12), predominantly siliceous rock fragments (13), ilmenite (14), garnet (15), zircon (16), pyrite (17); 18 – place of sampling and its number; 19 – occurrence of the studied rocks with erosion on the Upper Cambrian limestones of the Velma Formation

ригенные отложения кондроминской (западная часть седиментационной области), суриндинской свит и их стратиграфических аналогов. Материалом для осадконакопления служили продукты размыва докарбоновых кор выветривания.

Выводы

Проведенные исследования показали, что основная масса нижнекаменноугольных отложений в западной части платформы сформирова-

лась в серпуховском веке. Тычанский залив представлял один из основных бассейнов седиментации, в котором происходило накопление терригенных осадков, в том числе и алмазов. Это был пресноводный, временами слабо осолонявшийся водоем с многочисленными внутрибассейновыми отмелями и участками островной суши.

Карбонатный материал, присутствующий в цементе терригенных пород или слагающий

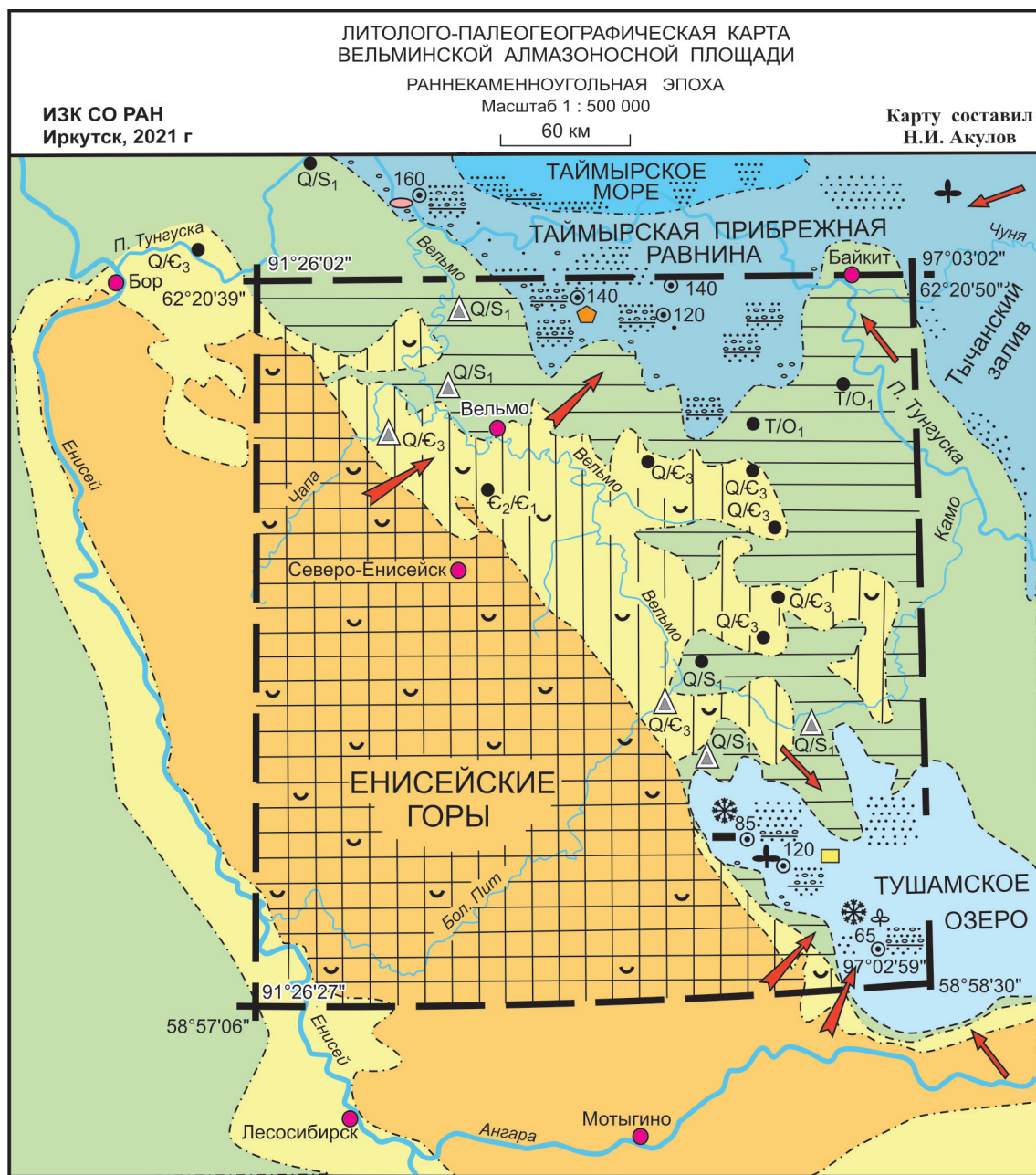


Рис. 10. Литолого-палеогеографическая карта исследуемой площади. Условные обозначения смотри на рис. 3. Карта составлена Н.И. Акуловым

Fig. 10. Lithological and paleogeographic map of the study area. See symbols in Fig. 3. The map was compiled by N.I. Akulov

основную их массу, почти всюду является кластогенным. Он образовался за счет размыва карбонатных пород нижнего палеозоя и поступал в бассейн седиментации в виде суспензий и взвесей.

Выполненная палеогеографическая реконструкция показала, что наиболее вероятным местом расположения коренных источников алмазов и спутников является Ангаро-Подк. Тунгусское междуречье (Байкитское поднятие), в

пределах которого в серпуховско-башкирское время размещалась холмистая равнина, служившая областью сноса или провинцией питания кластогенным материалом.

Анализ результатов выполненных исследований позволяет считать, что алмазоносность западной части Сибирской платформы, как и все промышленные месторождения алмазов Якутской алмазоносной провинции, целиком связана

со среднепалеозойской эпохой кимберлитового магматизма.

Список литературы / References

1. Акулов Н.И. Структурно-седиментационные зоны верхнего палеозоя в юго-западной части Тунгусского бассейна. *Геология и геофизика*. 1984;25(5): 97–101.

Akulov N.I. Upper Paleozoic structure-sedimentary zones in the South-Western part Tunguska Basin. *Russian Geology and Geophysics*. 1984;25(5):97–101. (In Russ.)

2. Акулов Н.И. Фациальный анализ верхнепалеозойских промежуточных коллекторов алмазов Ангариды. *Советская геология*. 1990;(5):48–56.

Akulov N.I. Facial analysis of the Upper Paleozoic intermediate reservoirs of the Angarida diamonds. *Sovetskaya geologiya [Soviet Geology]*. 1990. 1990;(5):48–56. (In Russ.)

3. Акулов Н.И. Погребенные верхнепалеозойские алмазоносные россыпи Ангариды. *Геология промежуточных коллекторов алмазов*. Владимирова Б.М. и др. (ред.). Иркутск; 1991:41–44.

Akulov N.I. Buried Upper Paleozoic diamond-bearing placers of Angarida. *Geology of intermediate diamond reservoirs*. Vladimirov B.M. et al (ed.). Irkutsk; 1991: 41–44. (In Russ.)

4. Акулов Н.И. Палеогеографические предпосылки поисков среднепалеозойских коренных источников алмазов на юге Сибирской платформы. *Известия вузов Сибири*. 1999;4-5:116–118.

Akulov N.I. Paleogeographic prerequisites for the search for the Middle Paleozoic primary sources of diamonds in the south of the Siberian Platform. *Izvestiya Vuzov Sibiri*. 1999;4-5:116–118. (In Russ.)

5. Акулов Н.И., Мишарина В.А., Машук И.М. О раннекаменноугольном возрасте и озерном происхождении тушамского горизонта (Сибирская платформа). *Геология и геофизика*. 2000;41(10):1443–1453.

Akulov N.I., Misharina V.A., Mashchuk I.M. Early Carboniferous age and lake genesis of the Tushama horizon (Siberian platform). *Russian Geology and Geophysics*. 2000;41(10):1443–1453. (In Russ.)

6. Акулов Н.И., Машук И.М. Стратиграфия верхнедевонских и нижнекаменноугольных отложений Приангарья. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2002;10(2):55–66.

Akulov N.I., Mashchuk I.M. Stratigraphy of Upper Devonian and Lower Carboniferous Deposits in the Angara River Region. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2002;10(2):55–66. (In Russ.)

7. Акулов Н.И. Ангариды как среднепалеозойский материк Северного полушария. *Докл. РАН*. 2003;389(3): 341–344.

Akulov N.I. Angarida as a Middle Paleozoic continent of the Northern Hemisphere. *Dokl. RAN*. 2003; 389(3):341–344. (In Russ.)

8. Акулов Н.И. Среднепалеозойская тектономагматическая активизация на Сибирской платформе. *Литосфера*. 2003;(2):121–134.

Akulov N.I. Middle Paleozoic tectonic and magmatic activation on the Siberian Platform. *Lithosphere*. 2003; (2):121–134. (In Russ.)

9. Акулов Н.И. *Осадочные бассейны Ангариды*. Новосибирск: Академическое издательство “ГЕО”; 2010. 222 с.

Akulov N.I. *Sedimentary basins of Angarida*. Novosibirsk. Academic Publishing House “GEO”; 2010. 222 p. (In Russ.)

10. Акулов Н.И., Машук И.М. Становление Ангариды и палеогеографические условия зарождения на ее территории высших растений. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2020;17:4–11. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.001>

Akulov N.I., Mashchuk I.M. Formation of Angaraland and paleogeographic conditions of the higher plants generation in its territory. *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*. 2020;17:4–11. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.001>. (In Russ.)

11. Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Коптиль В.И., Митюхин С.И., Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И. Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2011; 52(3):335–353.

Afanasyev V.P., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., Koptil V.I., Mityukhin S.I., Gerasimchuk A.V., Pomazansky B.S., Gorev N.I. Polygenesis of diamonds of the Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(3):335–353. (In Russ.)

12. Бетехтина О.А., Горелова С.Г., Дрягина Л.Л., Данилов В.И., Батяева С.П., Токарева П.А. *Верхний палеозой Ангариды. Фауна и флора*. Новосибирск: Наука; 1988. 265 с.

Betekhtina O.A., Gorelova S.G., Dryagina L.L., Danilov V.I., Batyaeva S.P., Tokareva P.A. *Upper Paleozoic of Angarida. Fauna and flora*. Novosibirsk: Nauka; 1988. 265 p. (In Russ.)

13. Борисьяк А.А. *Курс исторической геологии*. 4-е издание. Л.;М.: ОНТИ. НКТП; 1934. 423 с.

Borisyak A.A. *Course of Historical Geology*. 4th edition. Leningrad; Moscow: ONTI. NKTP; 1934. 423 p. (In Russ.)

14. Ваг О.В. Региональная стратиграфическая схема нижнего карбона Сибирской платформы. *Региональная стратиграфия нефтегазоносных районов Сибирской платформы*. Сб. науч. тр. Сурков В.С. (ред.). Новосибирск: СНИИГГиМС; 1988:28–31.

Vag O.V. Regional stratigraphic scheme of the Mississippian of the Siberian Platform. *Regional stratigraphy of oil and gas bearing regions of the Siberian Platform. Proceedings*. Surkov V.S. (ed.). Novosibirsk: SNIIGGIMS; 1988:28–31. (In Russ.)

15. Ваг О.В., Матухин Р.Г. *Палеогеография Сибирской платформы в раннем карбоне*. Сурков В.С. (ред.). Новосибирск: СНИИГГиМС; 1989:33–36.

- Vaag O.V., Matukhin R.G. Paleogeography of the Siberian Platform in the Early Carboniferous. *Paleogeography of the Phanerozoic of Siberia. Proceedings*. Surkov V.S. (ed.). Novosibirsk: SNIIGiMS; 1989:33–36. (In Russ.)
16. Ваг О.В., Матухин Р.Г., Мкртычян Г.А. Этапы формирования алмазоносных коллекторов карбона в Тычанском районе. *Актуальные проблемы региональной геологии Сибири (стратиграфия, тектоника, палеогеография, минерагения)*. Новосибирск: СНИИГГиМС; 1992:138–141.
- Vaag O.V., Matukhin R.G., Mkrtychyan G.A. Stages of formation of diamond-bearing reservoirs of the Carboniferous in the Tychan region. *Actual problems of regional geology of Siberia (stratigraphy, tectonics, paleogeography, minerageny)*. Novosibirsk: SNIIGiMS; 1992: 138–141. (In Russ.)
17. Ваг О.В., Матухин Р.Г., Мкртычян Г.А. О бедошемских слоях карбона в левобережье р. Подкаменной Тунгуски. *Геология и полезные ископаемые Красноярского края и Республики Хакасия*. Вып. 3. Красноярск; 1996:91–96.
- Vaag O.V., Matukhin R.G., Mkrtychyan G.A. Bedo-Sheminian layers of the Carboniferous in the left bank of the Podkamennaya Tunguska river. *Geology and minerals of the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Khakassia*. Issue 3. Krasnoyarsk; 1996:91–96. (In Russ.)
18. *Геологический словарь*. Т. 1. М.: Недра; 1973. 486 с.
- Geological Dictionary*. Vol. 1. Moscow: Nedra; 1973. 486 p. (In Russ.)
19. Глухов Ю.С. *Геология верхнепалеозойских отложений центральной части Тунгусской синеклизы*: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск; 1981. 23 с.
- Glukhov Yu.S. *Geology of the Upper Paleozoic deposits of the central part of the Tunguska syncline*. Abstr. ... Diss.Cand.Sci., Tomsk. 1981. 23 p. (In Russ.)
20. Гунин А.П., Вержак В.В., Минченко Г.В., Сотников В.И. Геология, морфология и вещественный состав новых кимберлитовых тел Архангельской алмазоносной провинции. *Сборник публикаций по результатам III и IV ежегодных чтений им. Г.П. Кудрявцевой*. М.: Изд. Институт прикладной минералогии; 2010:50–62.
- Gunin A.P., Verzhak V.V., Minchenko G.V., Sotnikov V.I. Geology, morphology and material composition of new kimberlite bodies of the Arkhangelsk diamondiferous province. *Proceedings of the 3rd and 4th annual readings named after G.P. Kudryavtseva*. Moscow: Institute of Applied Mineralogy; 2010:50–62. (In Russ.)
21. Донов Н.Б. Фитостратиграфическое расчленение разреза чинокской свиты по р. Чуня (верхний палеозой Сибирской платформы). Палеоботанический временник. Приложение к журналу «*Lethaea rossica*». 2015;(2):220–226.
- Donova N.B. Phytostратigraphic subdivision of the Chinok Formation section along the Chunya river (Upper Paleozoic of the Siberian Platform). *Lethaea rossica. Supplement*. 2015;(2):220–226. (In Russ.)
22. Дубатов В.Н. Палеобиогеография. *Фанерозой Сибири*. Т. 1. Венд. Палеозой. Яншин А.Л. (ред.). Новосибирск: Наука; 1984:125–134.
- Dubatolov V.N. Paleobiogeography. *Phanerozoic Siberia. V. 1. Vend. Paleozoic*. In: Yanshin A.L. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1984:125–134. (In Russ.)
23. Дубатов В.Н., Краснов В.И. Палеоклиматы азиатской части России в девоне. *Принципы и методы корреляции полифациальных и разнофациальных отложений*. Новосибирск: СНИИГГиМС; 2002. 108 с.
- Dubatolov V.N., Krasnov V.I. Paleoclimates of the Asian part of Russia in the Devonian. *Principles and methods of correlation of polyfacial and heterofacial deposits*. Novosibirsk: SNIIGiMS; 2002. 108 p. (In Russ.)
24. Елкин Е.А., Прашкевич Г.М. *На заре жизни: Берега Ангариды: Палеозойское время в истории сибирского материка*. Новосибирск: ИНФОЛИО-пресс; 2003. 128 с.
- Elkin E.A., Prashkevich G.M. At the dawn of life: The coast of Angarida: Paleozoic time in the history of the Siberian continent. Novosibirsk: INFOLIO-press; 2003. 128 p. (In Russ.)
25. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфные особенности алмазов как отражение их экзогенной истории. *Отечественная геология*. 2019;(4):66–74. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10033>
- Zinchuk N.N., Koptil V.I. Typomorphic features of diamonds as a reflection of their exogenous history. *Otechestvennaya geologiya [Domestic geology]*. 2019;4:66–74. <https://doi.org/10.24411/0869-7175-2019-10033>. (In Russ.)
26. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. *Типоморфизм алмазов Сибирской платформы = Typomorphism of the Siberian platform diamonds*. М.: Недра; 2003. 603 с.
- Zinchuk N.N., Koptil V.I. *Typomorphism of diamonds of the Siberian platform*. Moscow: Nedra; 2003. 603 p. (In Russ.)
27. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитового тела Январское (Далдыно-Алакитский алмазоносный район). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2018;(5):39–43. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-5-39-43>
- Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Geological structure and material composition of the “Yanvarskoye” kimberlite body (Daldyno-Alakitsky diamond-bearing region). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018;(5):39–43. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-5-39-43>. (In Russ.)
28. Клец А.Г. *Верхний палеозой окраинных морей Ангариды*. Новосибирск: Академическое издательство “Гео”; 2005. 240 с.
- Klets A.G. *Upper Paleozoic of the marginal seas of Angarida*. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”. 2005; 240 p. (In Russ.)
29. Криштофович А.Н. *Геологический обзор стран Дальнего Востока*. Л.;М.: Георастведиздат; 1932. 332 с.

- Krishtofovich A.N. *Geological review of the Far East countries*. Leningrad; Moscow: Georazvedizdat; 1932. 332 p. (In Russ.)
30. Крюков А.В., Петерсон Л.И. Новый тип разреза основания верхнепалеозойского чехла в Тунгусской синеклизе. *ДАН СССР*. 1978;238(3):663–665.
- Kryukov A.V., Peterson L.I. A new type of section at the base of the Upper Paleozoic cover in the Tunguska syncline. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1978;238(3):663–665. (In Russ.)
31. Крюков А.В., Ваг О.В., Мкртычян А.К., Глухов Ю.С., Матухин Р.Г., Петерсон Л.П., Шульгин А.Ю. Новый пиропоносный карбоновый коллектор на юге Тунгусской синеклизы. *Геология и геофизика*. 1989;(4):56–64.
- Kryukov A.V., Vaag O.V., Mkrtychyan A.K., Glukhov Yu.S., Matukhin R.G., Peterson L.P., Shulgin A.Yu. New pyrope-bearing carbonaceous reservoir in the south of the Tunguska syncline. *Russian Geology and Geophysics*. 1989;(4):56–64. (In Russ.)
32. *Методические указания по составлению литолого-фациальных и палеогеографических карт*. М.: Изд-во ИГиРГИ; 1967. 25 с.
- Guidelines for compiling lithofacies and paleogeographic maps*. Moscow: Publishing House of IGI RGI; 1967. 25 p. (In Russ.)
33. Мейен С.В. О гипотезе перемещения континентов с точки зрения палеофлористики карбона и перми. *Геотектоника*. 1969;(5):3–16.
- Meyen S.V. On the hypothesis of the movement of continents from the point of view of paleofloristics of the Carboniferous and Permian. *Geotectonics*. 1969;(5):3–16. (In Russ.)
34. Мейен С.В. *Основы палеоботаники*. М.: Недра; 1987. 403 с.
- Meyen S.V. *Fundamentals of paleobotany*. Moscow: Nedra; 1987. 403 p. (In Russ.)
35. Нейбург М.Ф. О тушамской свите Тунгусского бассейна – аналоге острогской свиты Кузбасса. *ДАН СССР*. 1956;110(2):267–268.
- Neuburg M.F. On the Tushama Formation of the Tunguska Basin, an Analogue of the Ostrog Formation of Kuzbass. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1956;110(2):267–268. (In Russ.)
36. Петерсон Л.Н. *Атлас спор и пыльцы карбона Тычанского алмазоносного района*. Красноярск: Комитет природных ресурсов; 1999. 80 с.
- Peterson L.N. *Atlas of spores and pollen of the Carboniferous of the Tychan diamondiferous region*. Krasnoyarsk; 1999. 80 p. (In Russ.)
37. Писарев П.А., Гаранин В.К., Серов И.В., Гаранин К.В. Особенности состава индикаторных минералов-спутников алмаза из трубок Верхнемунского поля Якутии, оценка их алмазоносности и поля в целом. *Сборник публикаций по результатам III и IV ежегодных чтений им. Г.П. Кудрявцевой*. М.: Изд. Института прикладной минералогии; 2010:133–153.
- Pisarev P.A., Garanin V.K., Serov I.V., Garanin K.V. Features of the composition of indicator minerals-satellites of diamond from the pipes of the Verkhnemunsky field of Yakutia, assessment of their diamond content and the field as a whole. *Proceedings of the 3rd and 4th annual readings named after G.P. Kudryavtseva*. Moscow: Institute of Applied Mineralogy; 2010:133–153. (In Russ.)
38. *Решения Всесоюзного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем докембрия, палеозоя и четвертичной системы Средней Сибири. Средний и верхний палеозой*. Новосибирск: СНИИГГиМС; 1982. 129 с.
- Decisions of the All-Union Conference on the development of unified stratigraphic schemes for the Precambrian, Paleozoic and Quaternary systems of Central Siberia. Middle and Upper Paleozoic*. Novosibirsk; SNIIGGIMS; 1982. 129 p. (In Russ.)
39. Рейтлингер Е.А., Платонов В.А., Меннер Вл.Вл. Микропалеонтологические комплексы девона и нижнего карбона Сибирской платформы. *ДАН СССР*. 1973;210(5):1167–1170.
- Reitlinger E.A., Platonov V.A., Menner V.I. Micro-paleontological complexes of the Devonian and Mississippian of the Siberian Platform. *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1973;210(5):1167–1170. (In Russ.)
40. Синицын В.М. *Древние климаты Евразии*. Л.: ЛГУ; 1970. 134 с.
- Sinityn V.M. *Ancient climates of Eurasia*. Leningrad: LSU; 1970. 134 p. (In Russ.)
41. Соболев Н.В. *Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии*. Новосибирск: Наука; 1974. 264 с.
- Sobolev N.V. *Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle*. Novosibirsk: Nauka; 1974. 264 p. (In Russ.)
42. Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Роль хрома в гранатах. *Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Тр. Ин-та геол. и геофиз. СО АН СССР, Вып. 403*. Новосибирск: Наука; 1978:145–168.
- Sobolev N.V., Pokhilenko N.P., Lavrentiev Yu.G., Usova L.V. The role of chromium in garnets. *Problems of petrology of the Earth's crust and upper mantle. Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics SB RAS USSR (403)*. Novosibirsk: Nauka; 1978:145–168. (In Russ.)
43. Толстов А.В., Минин В.А., Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Разумов А.Н. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции. *Геология и геофизика*. 2009;50(3):227–240.
- Tolstov A.V., Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Razumov A.N. New body of high-diamond-bearing kimberlites in the Nakyn field of the Yakutsk kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics*. 2009;50(3):227–240. (In Russ.)

44. Условные обозначения и методические указания по составлению атласа литолого-палеогеографических карт СССР. М.: Госгеолтехиздат; 1962. 45 с.
- Symbols and guidelines for compiling an atlas of lithological-paleogeographic maps of the USSR.* Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1962. 45 p. (In Russ.)
45. Akulov N.I. History of the origin of Angaraland (Siberia platform). *31st International Geological Congress (17-4. Plat Motions, Paleomagnetism, and Reconstruction of Supercontinents)*. Rio de Janeiro, Brazil, August 6–17; 2000:191–192.
46. Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Tolstov A.V. and al. Age of Mirny field kimberlites (Siberia) and application of rutile and titanite for U-Pb Dating of kimberlite emplacement by LA-ICP-MS. *Geochemical Journal*. 2016; 50(5):431–438.
47. Selley R.C. *Ancient sedimentary environments and their sub-surface diagnosis*. London, Routledge; 1996. 318 p.
48. Süess Ed. *Das Antlitz der Erde*. Bd. 3, Hälfte. Prag, Wien, Leipzig; 1901. 508 p.
49. Grabau A. Migration of geosynclines. *Bull. Geol. Soc.* 1924;III(3-4):207–349.
50. Mesner J.C., Wooldridge L.C.P. Maranhao Paleozoic basin and Cretaceous coastal basins. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.* 1964:1475–1512.
51. Sobolev N.V., Lavrent'ev Yu.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. Chrome-rich garnets of Yakutia and their parageneses. *Contr. Miner. Petrol.* 1973;40(1):39–52.

Об авторах

АКУЛОВ Николай Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5465>, Scopus AuthorID: 10144262200, e-mail: akulov@crust.irk.ru

ГЛАДКОВ Андрей Станиславович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7744-8979>, ResearcherID: D-7285-2014, Scopus AuthorID: 7003379075, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

ГРОМОВА Инна Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0006-8176-6084>, Scopus AuthorID: 36193273800, e-mail: ip@crust.irk.ru

About the authors

AKULOV, Nikolai Ivanovich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5465>, Scopus AuthorID: 10144262200, e-mail: akulov@crust.irk.ru

GLADKOV, Andrey Stanislavovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7744-8979>, ResearcherID: D-7285-2014, Scopus AuthorID: 7003379075, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

GROMOVA, Inna Aleksandrovna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-8176-6084>, Scopus AuthorID: 36193273800, e-mail: ip@crust.irk.ru

Поступила в редакцию / Submitted 30.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 22.03.2023

Принята к публикации / Accepted 17.04.2023

Методика среднемасштабного минералогического районирования при поисковых работах на алмазы (на примере Ыгыаттинской площади, Западная Якутия)

Н. К. Шахурдина¹, О. В. Тарских^{1,✉}, А. Ю. Колесник²

¹Вилуйская геологоразведочная экспедиция (ВГРЭ) АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Российская Федерация

²ОО «Открытая геология Казахстана», г. Алма-Аты, Республика Казахстан

✉ TarskikhOV@alrosa.ru

Аннотация

Показано, что анализ шлихоминералогической информации на современном этапе позволяет разработать новую методику минералогического картирования с применением ГИС-технологий и базовой статистики. Предлагаемая методика описана на примере Ыгыаттинской площади Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Для анализа информативности и продуктивности верхнепалеозойских терригенных коллекторов выбран комплекс минералогических признаков, позволяющий уверенно выделять площади развития прогнозируемого типа месторождений и устанавливать местоположение их первоисточников при среднемасштабном районировании. Представлена созданная ГИС-интегрированная база данных минералогических паспортов выработок на основе определения фоновых и аномальных параметров минералогического поля. С помощью ГИС-инструмента ModelBuilder на площади Ыгыаттинского алмазоносного района (ЫАР) выделены аномальные области минералогического поля. Показано, что предлагаемая методика позволяет оконтурить минералогические таксоны рангов «узел» и «участок» ЫАР и выделить на исследуемой площади шесть минералогических узлов и пятнадцать минералогических участков. Сделан вывод, что применение предложенной методики будет эффективным для среднемасштабного районирования на основе шлихоминералогических данных других алмазоносных районов.

Ключевые слова: Ыгыаттинская площадь, минералогическое районирование, шлих, индикаторные минералы кимберлитов, химико-генетические группы

Благодарности. Авторы выражают признательность к.г.-м.н. Е.В. Проценко за содействие и поддержку, к.ф.-м.н. Л.П. Шадринной за неоценимую помощь.

Для цитирования: Шахурдина Н.К., Тарских О.В., Колесник А.Ю. Методика среднемасштабного минералогического районирования при поисковых работах на алмазы (на примере Ыгыаттинской площади, Западная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):223–235. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-223-235>

Original article

The method of medium-scale mineralogical mapping during diamond searching: a case study in the Ygyatta Region (Western Yakutia)

N. K. Shakhurdina¹, O. V. Tarskikh^{1,✉}, A. Yu. Kolesnik²

¹Vilyui Geological Exploration Expedition, Mirny, Russian Federation,
AK “ALROSA” (PAO), Mirny, Russian Federation

²LLP “Otkrytaja geologija Kazahstan”, Almaty, Republic of Kazakhstan

✉ TarskikhOV@alrosa.ru

Abstract

The analysis of mineralogical information has enabled the development of a novel mineralogical zoning method using GIS and statistics. The proposed method was applied to the Ygyatta Region located within the Yakut Diamond-bearing Province. A set of mineralogical characteristics was chosen to examine the information content and productivity of the

terrigenous collectors, providing an exact identification of the development areas of the deposits and the locations of their primary sources during medium-scale forecasting. The developed GIS-integrated database of the mineralogical passports of mine workings was based on the identification of background and anomalous parameters in the mineralogical field. The latter, within the Ygyatta Region, was delineated using ModelBuilder. The proposed method demonstrates the ability to contour mineralogical taxa of the “node” and “section” ranks within the Ygyatta Region, leading to the identification of six mineralogical nodes and fifteen mineralogical sections. This method can be effective for medium-scale zoning, based on mineralogical data from other diamond-bearing areas.

Keywords: Siberian platform, Vilyui-Markha dike belt, dikes, dolerites, high-titanium basites

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Elena V. Protsenko, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) for full support during the preparation of the study and Ludmila P. Shadrina, Cand. Sci. (Phys.-Math.) for her invaluable assistance.

For citation: Shakhurдина N.K., Tarskikh O.V., Kolesnik A.Yu. The method of medium-scale mineralogical mapping during diamond searching: a case study in the Ygyatta Region (Western Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):223–235. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-223-235>

Введение

Поисковые работы на алмазы на территории Западной Якутии ведутся более 70 лет [15]. При этом наиболее эффективным до сих пор остается шлихоминералогический метод. Основные принципы и методы минералогического районирования перспективных на алмазы территорий по типоморфным характеристикам индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) подробно изложены в работах предшественников [3, 8, 10, 17, 20, 23–25]. В них выделены характеристики, определяющие продуктивность терригенных коллекторов ИМК [8, 9, 10, 24]: содержание ИМК в стандартной 10-литровой шлиховой пробе, относительная концентрация в аллотигенной составляющей тяжелой фракции (ТФ), ассоциация, гранулометрия, сохранность (степень механического износа), химический состав. Типоморфные особенности кимберлитовых минералов дают возможность не только выделять площади развития определенного прогнозируемого типа месторождений (возраста, генезиса, уровня алмазоносности), но и устанавливать местоположение их первоисточников [4, 9–11].

Современные требования к прогнозированию и поискам коренных месторождений алмазов нуждаются в разработке новой ГИС-интегрированной методики минералогического районирования. Целью работы является разработка методики анализа шлихоминералогических данных для среднемасштабного минералогического районирования Ыгыаттинского района с применением ГИС-технологий.

Методика районирования основана на подходе «фон–аномалия»: минимально аномальные значения для каждого минералогического признака принимаются после анализа его распределения на изучаемой территории.

Методика минералогического районирования

Предлагаемая новая методика среднемасштабного районирования с использованием ГИС-технологий анализа базы данных шлихоминералогического опробования может быть описана на примере Ыгыаттинской площади, расположенной в центральной части Центрально-Сибирской субпровинции – Якутской алмазоносной провинции (рис. 1). На его территории известны два кимберлитовых объекта, один из них – алмазоносная трубка Сюльдюкарская [13, 14, 16, 21, 22]. Согласно «Стадийности геологоразведочных работ с целью поисков коренных месторождений алмазов», изученность Ыгыаттинского алмазоносного района соответствует стадии 2 ГРП (Комплексное геологическое изучение территорий и прогнозирование месторождений алмазов в масштабе 1:200 000 – 1:100 000 – 57,5 %) и стадии 3 ГРП (Общие поиски масштаба 1:50 000 – 1:25 000 – 38 %) [15]. Основными коллекторами ИМК в Ыгыаттинском районе являются верхнепалеозойские отложения (ботуобинская свита верхнего карбона, ахтарандинская и боруллойская свиты нижней перми).

В практике поисковых работ на алмазы в АК «АЛРОСА» (ПАО) шлиховое опробование терригенных коллекторов, сопровождающихся бурением, производится по литологическому принципу: каждая литологическая разность опробуется отдельно. Различия в мощности опробуемых интервалов закономерно приводят к различиям в объеме проб.

Для нормирования результатов шлихового опробования производится пересчет количества знаков ИМК на стандартную 10-литровую пробу.

Такой подход к нормированию результатов шлихового опробования информативен при ми-

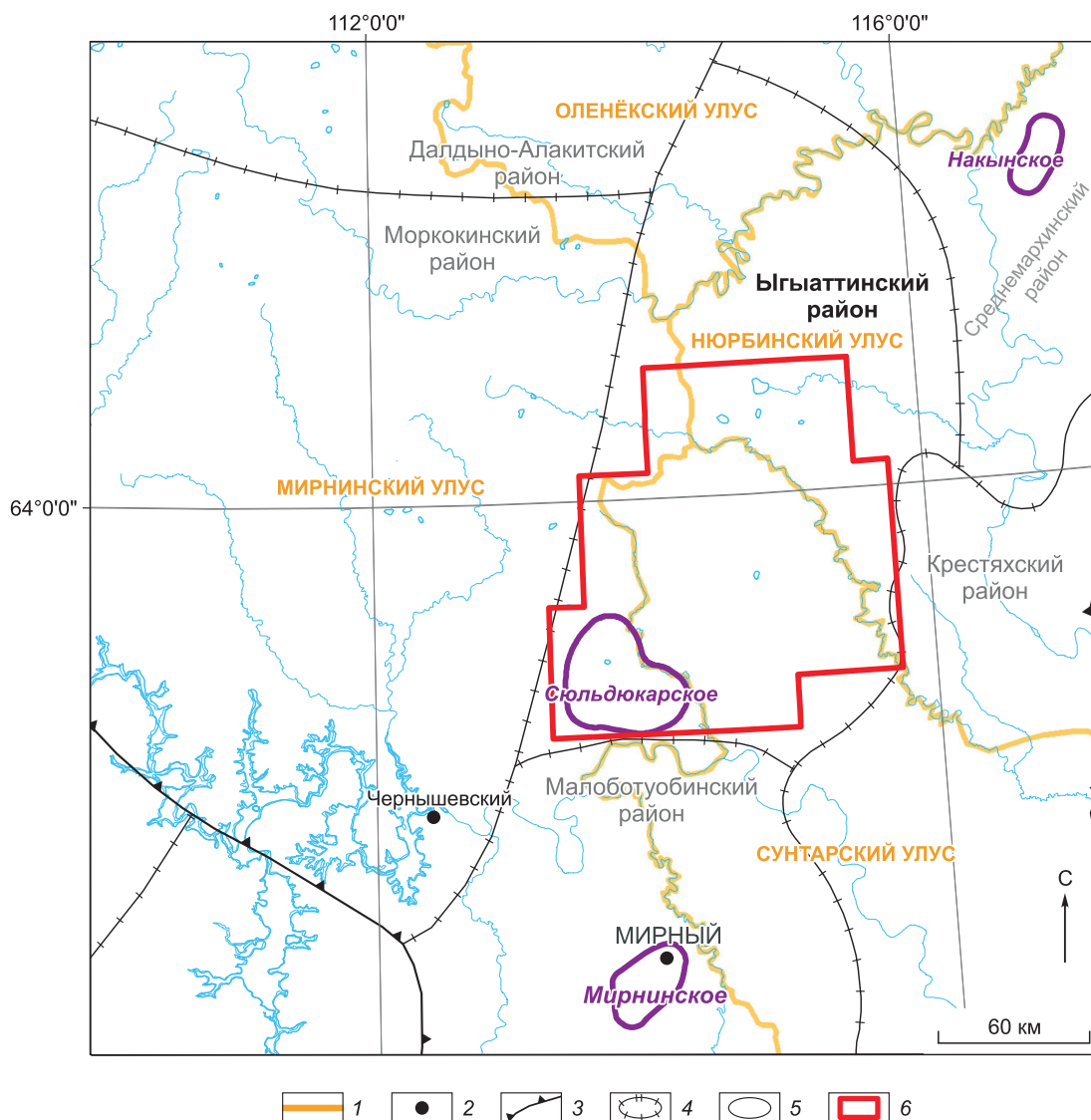


Рис. 1. Обзорная схема Ыгыятинской площади, масштаб 1:300 000: 1 – административные границы районов РС(Я); 2 – населенные пункты; 3 – граница Якутской алмазоносной провинции; 4 – контуры алмазоносных районов; 5 – контуры известных кимберлитовых полей; 6 – Ыгыятинская площадь

Fig. 1. Ygyatta Region review scheme, scale 1:300 000: 1 – administrative boundaries of RS(Ya) districts; 2 – localities; 3 – Yakutia Diamond-bearing Province boundary; 4 – diamond-bearing regions outlines; 5 – known kimberlitic fields outlines; 6 – Ygyatta Region

нерагенических и региональных работах, однако его применение при средне- и крупномасштабном минералогическом картировании дискуссионно: при расчете количества ИМК (в знаках) на стандартную пробу полностью игнорируются гранулометрические и весовые характеристики зерен ИМК, не учитываются литодинамические условия формирования коллекторов и накопление значительных количеств ИМК в благоприятных условиях (гравитационные ловушки).

Расчет весовых соотношений ИМК к общему весу аллотигенной составляющей тяжелой фрак-

ции (ТФ) позволяет разбавить реальные и ложные аномалии концентраций ИМК [1, 2]. На примере Мало-Ботуобинского алмазоносного района (МБАР) для отложений верхнего палеозоя Антипиным И.И. [1, 2] установлена минимально аномальная концентрация ИМК – 16 мг на 1000 мг аллотигенных минералов ТФ (16 %). Однако отдельные существующие в геологоразведочном комплексе АК «АЛРОСА» (ПАО) минералогические банки данных содержат информацию только о количестве и морфометрических характеристиках ИМК (до 5–10 % проб), а

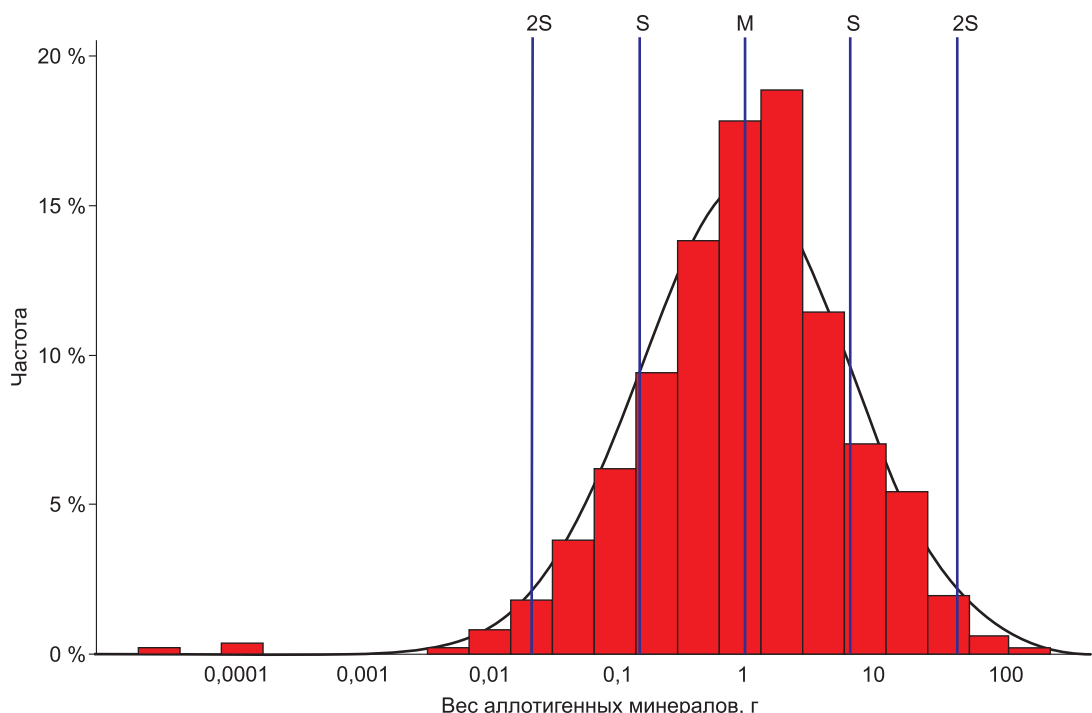


Рис. 2. Гистограмма распределения веса аллотигенных минералов ТФ базального горизонта верхнепалеозойских отложений Ыгыаттинского алмазоносного района (логарифмическая шкала)

Fig. 2. Histogram of weight distribution of allothigenic minerals of the Upper Paleozoic deposits of the Ygyatta Region (logarithmic scale)

не о весе ТФ. Особенно это характерно для банков «ретроданных», созданных во II половине XX в. Отсутствие информации обусловлено частичной утратой первичных материалов или недостаточным уровнем цифровизации аналоговых носителей информации.

С учетом распространения на территории прилегающих друг к другу Малоботуобинского и Ыгыаттинского районов одновозрастных терригенных коллекторов, формировавшихся в сходных литодинамических условиях, мы экстраполировали полученное минимально аномальное значение концентрации ИМК в ТФ на территорию Ыгыаттинского алмазоносного района.

Медианный вес аллотигенной составляющей ТФ в стандартной 10-литровой пробе на рассматриваемой территории составляет 1,0 г, что позволяет получить приблизительное число ИМК, соответствующее минимально аномальному значению. Такой подход позволяет не упускать из виду всю имеющуюся минералогическую информацию (рис. 2).

На исследуемой территории наиболее распространены ИМК гранулометрического класса

–1+0,5 мм. Вследствие этого приняты следующие параметры «среднего» зерна ИМК: диаметр – 0,75 мм, вес – 0,7 мг. Таким образом, минимально аномальное значение количества ИМК в стандартной пробе, соответствующее 16 ‰ ИМК ТФ, составляет ~25 знаков ИМК.

Крупные зерна ИМК концентрируются вблизи коренных источников [5, 6]. Обнаружение зерен крупных размеров может указывать на близость коренного источника. Преобладающие размеры ИМК в Ыгыаттинском районе составляет –1+0,5 мм, поэтому за минимально аномальное значение принимается одна находка зерна размером –2+1 мм.

Механический износ минералов указывает на суммарный путь, пройденный зерном от коренного источника до места захоронения [5]. При этом в континентальных условиях при транспортировке минералов направленными водными потоками степень механического износа действительно должна быть связана с удаленностью от коренных источников [4, 6]. Таким образом, обнаружение в пробе хотя бы одного зерна без признаков механического износа (0 и I классы)

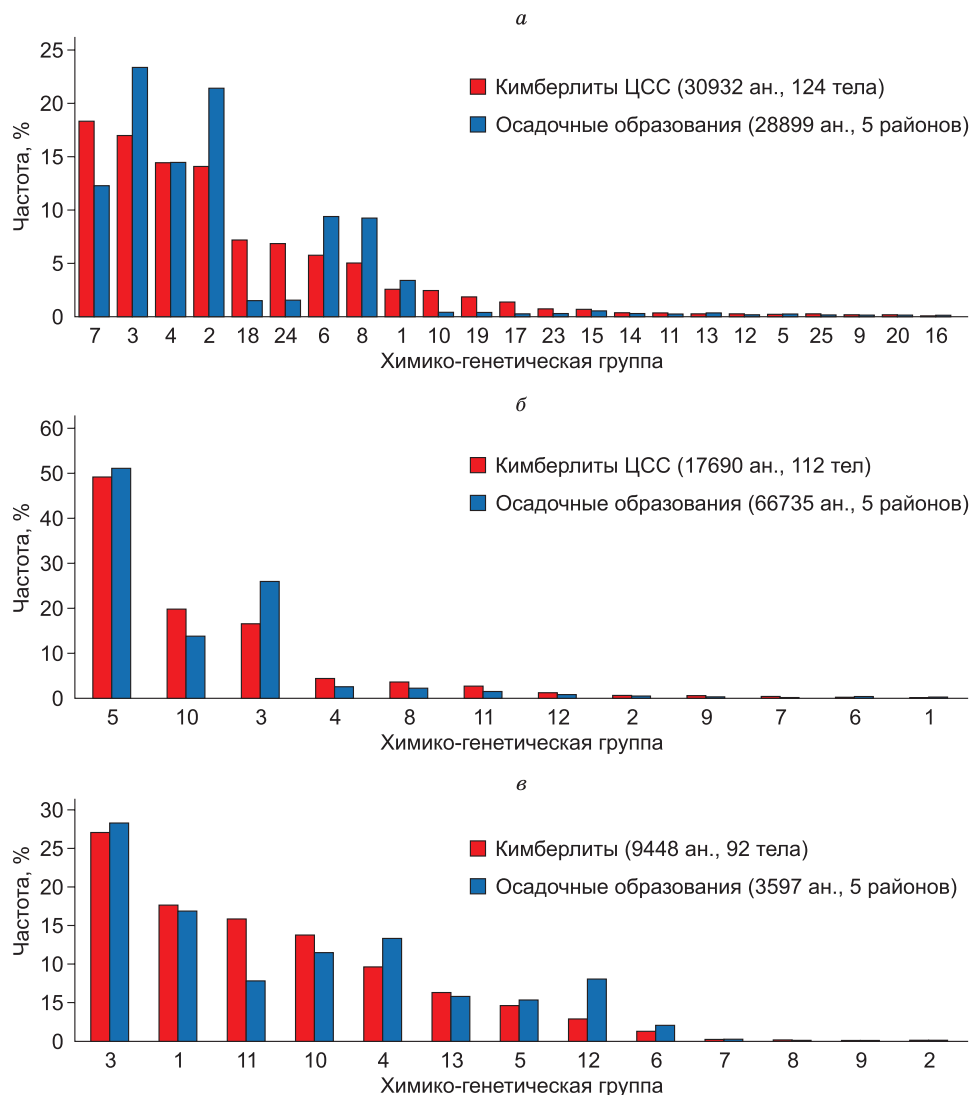


Рис. 3. Распределение ИМК из кимберлитов и осадочных образований Центрально-Сибирской субпровинции по химико-генетическим группам [6] пропорционально встречаемости: а – гранаты, б – ильменит, в – хромшпинелиды

Fig. 3. KIM chemical-genetic groups [6] distribution for kimberlite bodies and sediments of the Central Siberia Subprovince: а) garnet, б) ilmenite, в) chromspinelide

или слабо изношенного (II класс) зерна принимается за минимально аномальное значение.

Химический состав ИМК является одной из ведущих типоморфных характеристик, позволяющих идентифицировать возможные коренные источники и оценить их предполагаемую алмазность, сопоставив с уже известными [12]. Применяемые крупномасштабные минералогические критерии [19] сложно формализуются, и их визуализация в ГИС-средах затруднена. Решить эту проблему позволило применение химико-генетической классификации, предложенной В.К. Гараниным [7]. Для этого проанализировано распространение химико-генетиче-

ских групп в кимберлитах Центрально-Сибирской алмазональной субпровинции и установлено, что для каждого ИМК существуют от двух (ильменит) до четырех (гранат, хромшпинелид) наиболее распространенных химико-генетических групп, которые составляют порядка 70 % от всех выборок (рис. 3).

В предлагаемой методике эти доминирующие химико-генетические группы отнесены к «фоновым». После выделения «фона» возникла необходимость в различении степени «аномальности».

Наиболее благоприятным минералогическим признаком является присутствие в отложениях ИМК, состав которых максимально близок к со-

Таблица 1

**Химико-генетические группы ИМК Центрально-Сибирской субпровинции
по степени «аномальности» и их балльная оценка**

Table 1

**The anomaly grade of chemical-genetic groups KIM
of Central-Siberian subprovince sediments and their rating**

Характеристика	Номера химико-генетических групп			Рейтинг, балл
	гранатов	ильменита	хромшпинелидов	
Генетически связанные с алмазами, эклогитовые	16, 17, 18, 19, 20	—	—	8
Генетически связанные с алмазами	1	1, 2, 7, 8	1	7
Эклогитовые	22, 23	—	—	6
Редкие	5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	4, 6, 11, 12	2, 6, 7, 8, 9, 12, 13	5
Наиболее распространенные («фон»)	2, 3, 4, 6, 7, 8	3, 5, 10	3, 4, 5, 10, 11	1

ставу включений в алмазах [5, 7, 18, 20], они и формируют алмазную ассоциацию. По классификации В.К. Гаранина [7], алмазной ассоциации соответствуют: для гранатов и хромшпинелидов – первая химико-генетическая группа, для ильменита – первая, вторая, седьмая и восьмая. Таким образом, выделена первая группа по степени «аномальности» – химико-генетические группы «генетически связанные с алмазами».

Анализ распространения и химического состава гранатов в осадочных образованиях на территории Центрально-Сибирской субпровинции показал [5, 6, 24], что гранаты эклогитового парагенезиса встречаются в заметных количествах только на небольшом удалении от коренного источника, поэтому «эклогитовые» химико-генетические группы (ХГГ) гранатов (16–23) выделены нами отдельно.

Гранаты алмазной ассоциации эклогитового парагенезиса (ХГГ 16–20), таким образом, максимально «аномальны» (генетически связаны с алмазами и указывают на близость к коренному источнику), поэтому выделены в отдельную группу с максимальным рейтингом.

Следующая градация – «редкие» химико-генетические группы, частота встречаемости которых не превышает 7 %.

Таким образом, получены четыре группы по степени «аномальности» с оценкой в баллах (табл. 1).

Поскольку в расчет принимаются три минерала, точка, в которой отмечены только фоновые группы, будет иметь рейтинг в 3 балла, поэтому, во избежание перекрытия, принято решение принять минимально-аномальным значением 5 бал-

лов и присвоить его «редким» химико-генетическим группам.

Таким образом, для каждой горной выработки формируется индивидуальный «паспорт» с набором типоморфных характеристик ИМК. Анализ распределения фоновых и аномальных параметров для Ыгыаттинской площади приведен в табл. 2. Всего на территории пройдено 1270 горных выработок, вскрывших осадки верхнепалеозойского возраста, аномальные концентрации ИМК в пробе выявлены в 27 %, в тяжелой фракции – в 18, высокосохранные ИМК – в 27 %. Химический состав ИМК изучен для 678 горных выработок, вскрывших верхнепалеозойские отложения, аномальные составы ИМК зафиксированы в 35 % от количества изученных.

**Обсуждение результатов применения
ГИС-системы цифровой базы
минералогических данных**

Для анализа пространственных геологических данных авторами создана ГИС-интегрированная база минералогических данных (*.gdb), содержащая ID ТН, объект, участок, номер линии, номер точки, координаты, тип выработки, общее количество находок ИМК, стратиграфическую разбивку, разделение по механическому износу и классу крупности, доли ИМК в весе ТФ, наличие микронзондовых анализов, разделение ИМК на химико-генетические группы, ранжирование ХГГ. Далее все выработки с находками ИМК разделены на «фоновые» и «аномальные» по значениям прогнозно-поисковых признаков.

С помощью конструктора Model Builder ArcGIS ArcMap 10.8.1 разработана модель управления

Таблица 2

**Распределение фоновых и аномальных параметров типоморфных особенностей ИМК
для Ыгыаттинского алмазоносного района**

Table 2

**The distribution KIM baseline and anomaly typomorphic features
for the Ygyatta Diamond-bearing Region**

Типоморфные особенности ИМК	Выработки	
	Кол-во	%
Концентрация ИМК в пробе	1270	
Фоновая (<25 зн. на 10 л)	928	73
Аномальная (>25 зн. на 10 л)	342	27
Содержание ИМК в тяжелой фракции	1270	
Фоновое (< 16 ‰)	1040	82
Аномальное (>16 ‰)	230	18
Механический износ ИМК	1270	
Фон (III, IV кл.)	930	73
Аномалия (0, I, II кл)	340	27
Химический состав ИМК	678	
Фоновые ХГГ	442	65
Аномальные ХГГ	236	35

процессами обработки цифровых минералогических данных. В ее основе лежит использование полученных цифровых данных: контур площади, шлихоминералогические аномалии. Сам процесс состоит в построении равномерной сетки со следующими параметрами: ширина и высота ячейки – 2000 м (так как плотность сети бурения 2×2 км занимает >50 % всей площади), тип геометрии – Polygon. Далее происходит объединение шлихоминералогических аномалий с построенной сеткой и суммирование значений в каждой ячейке (рис. 4).

Анализ полученных цифровых данных позволил ранжировать территорию Ыгыаттинской площади по степени проявленности аномальных минералогических данных. При среднемасштабном прогнозировании производится минералогическое районирование на основе геолого-минералогического картирования масштаба 1:200 000, с выделением таксонов следующих уровней: минералогический район, узел, участок [1].

Применение данной модели позволяет выделить на территории ЫАР шесть минералогических узлов: Сюльдюкарский, Западный, Вос-

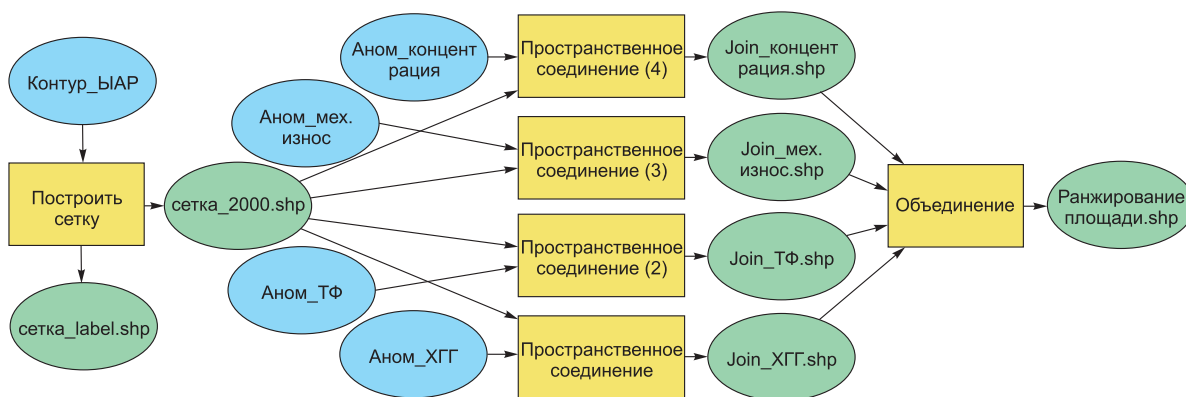


Рис. 4. Обработка минералогических цифровых данных при помощи ModelBuilder

Fig. 4. ModelBuilder processing for mineralogical digital data

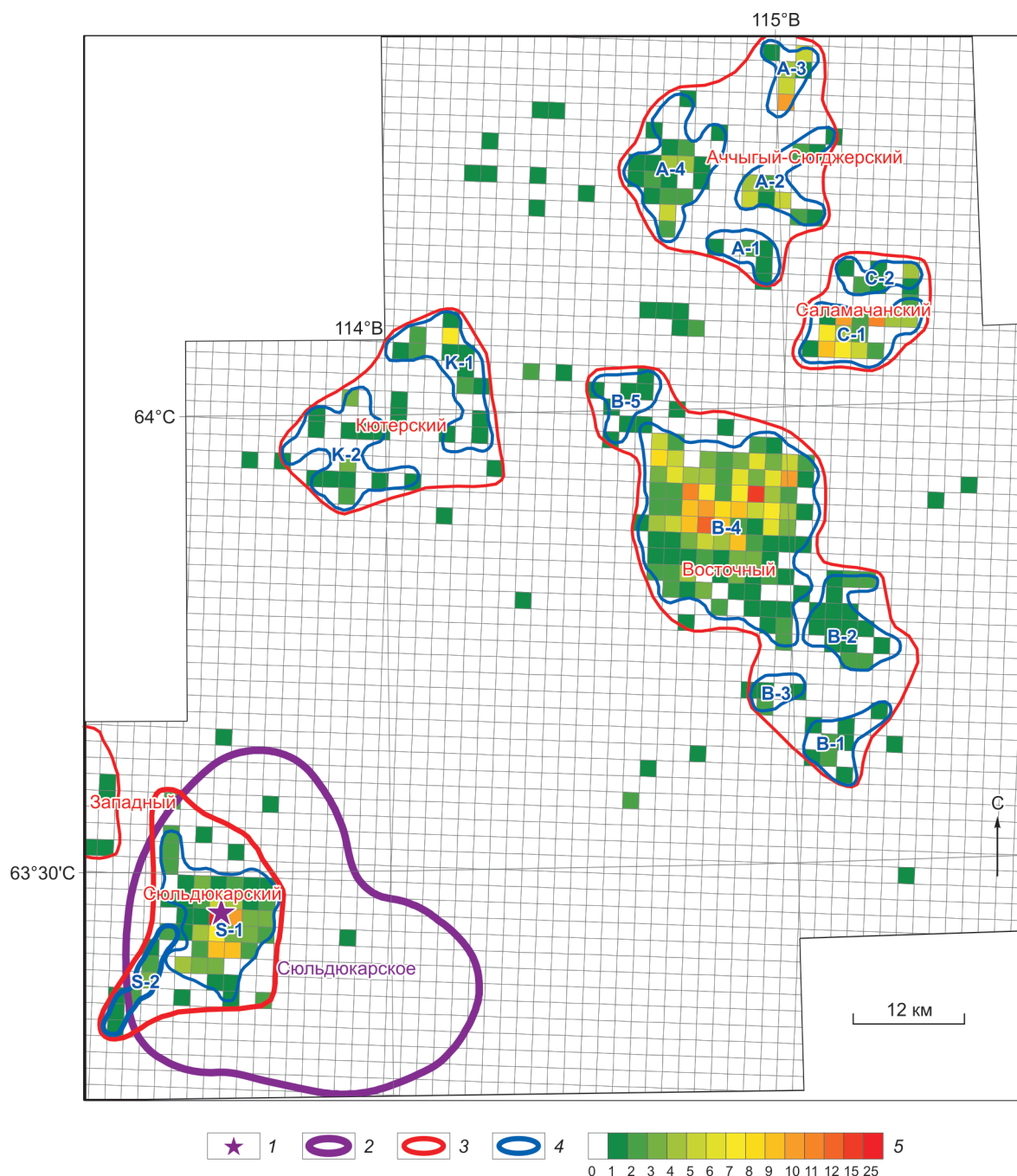


Рис. 5. Схема минералогического картирования южной части Ыгыаттинского района, масштаб 1:600 000: 1 – Сюльдюкарская кимберлитовая трубка, 2 – Сюльдюкарское кимберлитовое поле, 3 – контуры минералогических узлов PZ2, 4 – минералогические участки с названиями; 5 – ранжирование площадей по наличию шлихоминералогических аномалий

Fig. 5. Mineralogical regionalization scheme for southern part of the Ygyatta Region, scale 1:600 000. 1 – Syuldyukar kimberlitic pipe, 2 – Syuldyukar kimberlitic field, 3 – PZ2 mineralogical nodes outlines; 4 – mineralogical sections; 5 – ranking of areas with heavy-concentrated anomaly presence

точный, Кютерский, Саламачанский и Аччыгый-Сюгджерский, различающихся количественным соотношением ИМК в ассоциации и типоморфными характеристиками ИМК (рис. 5). Так, для Саламачанского минералогического узла харак-

терна ассоциация с преобладанием пикроильменита, для Кютерского и Восточного – увеличенная по сравнению с другими узлами доля гранатов, а для Сюльдюкарского и Западного узлов – преобладание хромшпинелидов над остальными

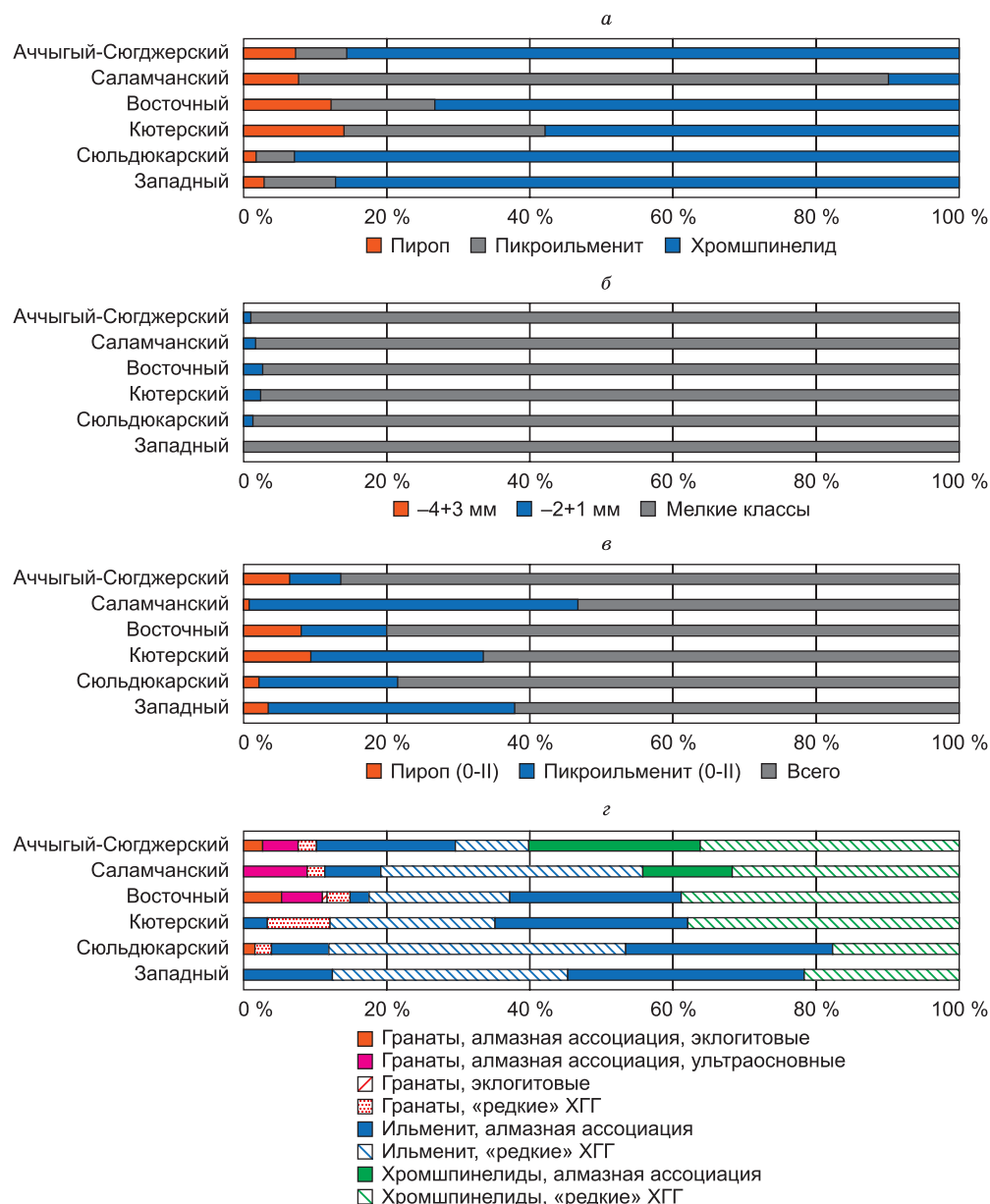


Рис. 6. Минералогические узлы Ыгыаттинского алмазоносного района: *а* – ассоциация; *б* – доля сохранных ИМК (0–II класс), %; *в* – доля ИМК размером +1мм, %; *г* – типохимические особенности ИМК

Fig. 6. *a*) Association; *б*) safe (0–II class) KIM percent; *в*) +1mm size KIM percent; *г*) KIM typochemical peculiarities of the Ygyatta Diamond-bearing Region mineralogical nodes

ИМК (рис. 6). Это может свидетельствовать о коренных источниках алмазов с разным соотношением индикаторных минералов на изучаемой территории. Крупные зерна ИМК наиболее часто встречаются в верхнепалеозойских отложениях Восточного и Кютерского минералогических узлов, сохранные – в пределах Саламчанского, Кютерского и Западного узлов.

Признаки близости кимберлитовых тел на основе химического состава ИМК наиболее про-

явлены на территории Восточного, Аччгыгый-Сюгджерского, Кютерского и Сюльдюкарского минералогических узлов (см. рис. 6, г).

Таким образом, в Ыгыаттинском районе аномальными значениями определены следующие характеристики ИМК:

- концентрация ИМК в 10-литровой пробе – более 25 знаков;
- содержание ИМК в тяжелой фракции свыше 16 %;

- ИМК высокой степени сохранности (0–II класс);
- ИМК «аномальных» химико-генетических групп.

Использование ГИС-технологий и разработанной методики позволило сократить территорию поисков с 12 870 км² до 2627 км², поскольку за пределами выделенных минералогических узлов поиски представляются нецелесообразными.

Новый ГИС-интегрированный подход к оконтуриванию таксономических единиц «минералогический узел» и «минералогический участок», учитывающий максимально возможное количество (от двух до четырех) типоморфных особенностей ИМК осадочных коллекторов, позволил выделить не только вышеупомянутые минералогические узлы, но и 15 минералогических участков.

Заключение

Описанная нами методика минералогического картирования основана на выделении минералогических узлов и участков с использованием подхода «фон–аномалия». Предлагается формировать индивидуальный «паспорт» горной выработки с набором типоморфных характеристик ИМК посредством принятия минимально аномальных значений для каждого минералогического признака.

Для каждой горной выработки формируется индивидуальный «паспорт» с идентичным набором типоморфных характеристик ИМК, что позволяет оценить распределение параметров минералогического поля на площади в пределах выбранного возраста отложений и позволяет выполнять машинную обработку информации с выделением аномальных участков.

Применение статистических методов при обработке результатов минералогического анализа существенно облегчает обработку поступающей информации.

Методика может применяться не только при среднемасштабных, но и при крупномасштабных алмазопроизводственных работах, о чем свидетельствуют выделенные минералогические участки.

При применении методики в других алмазных районах необходимо учитывать специфику изучаемой площади. Стабильно аномальными значениями ИМК могут быть признаны только высокосохранные зерна ИМК и аномальные химико-генетические группы.

Список литературы / References

1. Антипин И.И., Антипин И.И., Тарасов И.О. Основные аспекты методики и технологии обработки шлихоминералогических материалов при поисках месторождений алмазов на закрытых территориях. *Наука и образование*. 2006;(4):24–30.
- Antipin I.I., Antipin I.I., Tarasov I.O. Methodology and technology of mineralogical material processing basic aspects in the search of diamond deposits on closed territories. *Nauka i obrazovaniye*. 2006;(4):24–30. (In Russ.)
2. Антипин И.И., Антипин И.И. Особенности современных ореолов индикаторных минералов кимберлитов Якутии (по данным ретроспективного анализа исследований). *Наука и образование*. 2009;(2):9–13.
- Antipin I.I., Antipin I.I. Peculiarities of recent kimberlite indicator minerals haloes in Yakutia. *Nauka i obrazovaniye*. 2009;(2):9–13. (In Russ.)
3. Антипин И.И., Антипин И.И. Среднемасштабное алмазопрогнозирование на примере Центрально-Сибирской субпровинции. *Руды и металлы*. 2018;(1):4–10.
- Antipin I.I., Antipin I.I. Medium-scale diamond prospecting exemplified by the Central Siberian subprovince. *Ores and Metals*. 2018;(1):4–10. (In Russ.)
4. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. *Морфология и морфогенез индикаторных минералов кимберлитов*. Новосибирск: Филиал «Гео» Издательства СО РАН, Издательский дом «Манускрипт»; 2001.
- Afanasiev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. *Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals*. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”, Publishing House “Manuscript”; 2001. (In Russ.)
5. Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Похиленко Н.П. *Поисковая минералогия алмаза*. Новосибирск: Академическое издательство «Гео»; 2010.
- Afanas'yev V.P., Zinchuk N.N., Pokhilenko N.P. *Diamond prospecting mineralogy*. Novosibirsk. Academic Publishing House “Geo”; 2010. (In Russ.)
6. Афанасьев В.П., Агашев А.М., Похиленко Н.П. Основные черты истории и условий формирования ореолов индикаторных минералов кимберлитов Сибирской платформы. *Геология рудных месторождений*. 2013; 55(4):295–304. <https://doi.org/10.7868/S0016777013040023>
- Afanas'yev V.P. Dispersion halos of kimberlite indicator minerals in the Siberian Platform: History and formation conditions. *Geology of Ore Deposits*. 2013;55(4):256–264. <https://doi.org/10.1134/S1075701513040028>
7. Гаранин В.К. *Минералогия кимберлитов и родственных им пород алмазоносных провинций России в связи с их генезисом и поисками*: Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. М.; 2006. 551 с.
- Garanin V.K. *Kimberlites and related rocks mineralogy of Russia diamondiferous provinces in connection*

with their genesis and search. Diss. ... Doct. Sci. Moscow; 2006. 551 p. (In Russ.)

8. Горев Н.И., Масленникова Э.А. Информативность шлихоминералогического метода поисков погребенных месторождений алмазов в Западной Якутии. *Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения: Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Алмазной лаборатории ЦНИГРИ – НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, 29 мая – 01 июня 2018 г. Мирный*; 2018:262–266.

Gorev N.I., Maslennikova E.A. Slimeminerological searching method informativity in the search of buried diamond deposits in Western Yakutia. *Efficiency of geological exploration for diamonds: Predictive, methodological, innovative, and technological ways for improvement: Materials of the 5th All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 50th anniversary of the Diamond Laboratory TSNIGRI – NIGP AK «ALROSA» (PAO), Mirny, May 29 – 01 June 2018. Mirny*; 2018:262–266. (In Russ.)

9. Зинчук Н.Н. Первичные минералы кимберлитов и районирование территорий для оценки их перспективности. *Эволюция биосферы и техногенез: материалы Всероссийской конференции с международным участием, г. Чита, 21–25 мая, 2022 г. Чита*; 2022:150–152.

Zinchuk N.N. Primary minerals of kimberlites and zoning of territories to assess their prospects. *Biosphere evolution and technogenesis. Proceedings of All-Russian conference with international participation, Chita, May 21–25. Chita*; 2022:150–152. (In Russ.)

10. Зинчук Н.Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмазов на Сибирской платформе. *Отечественная геология*. 2021;(2): 41–56. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2021-10012>

Zinchuk N.N. Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in forecasting diamond deposits on the Siberian platform. *Otechestvennaya geologiya*. 2021;(2):41–56. <https://doi.org/10.47765/0869-7175-2021-10012>. (In Russ.)

11. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Борис Е.И., Липашова А.Н. Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений. *Руды и металлы*. 1999;(3):24–30.

Zinchuk N.N., Koptil' V.I., Boris E.I., Lipashova A.N. Typomorphysm of diamond from placers of Siberian Platform as a diamond deposits prospecting base. *Ores and Metals*. 1999;(3):24–30. (In Russ.)

12. Кудрявцева Г.П., Вержак В.В., Гаранин В.К. Повышение эффективности минералогических методов при проведении поисков алмазных месторожде-

ний. *Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. АК «АЛРОСА» (ЗАО) Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие ЦНИГРИ*; Воронежский государственный университет. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2001:505–517.

Kudryavtseva G.P., Verzhak V.V., Garanin V.K. Increasing of mineralogical methods efficiency at prospecting of diamond deposits. *Problems of diamond geology and some ways to solve them. AK «ALROSA» YANIGP TSNIGRI*; Voronezh State University: Voronezh; 2001: 505–517. (In Russ.)

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

Maltsev M.V., Tolsov A.V., Berezhnev I.I. Conditions of localization and criteria for kimberlites exploration (on the example of Igyatta Diamondiferous Region, Western Yakutia). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018;(6):41–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-41-49>

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

Maltsev M.V., Tolsov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic especially its indicators minerals. *Voronezh university vestnik, Geology series*. 2016;(3):86–94. (In Russ.)

15. Масайтис В.Л., Эринчек Ю.М. Первые карты прогноза алмазоносности Сибирской платформы (1952–1954). *Региональная геология и металлогения*. 2005;(26):17–27.

Masaytis V.L., Erinchek Yu.M. The history of the first diamond-prediction maps of Siberian Platform (1952–1954). *Regional Geology and Metallogeny*. 2005;(26): 17–27. (In Russ.)

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

Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Kimberlite prospecting criteria and new perspectives of Yakutia native diamondiferous. *Ores and Metals*. 2018;(4):14–23. (In Russ.)

17. Самданов Д.А., Афанасьев В.П., Тычков Н.С., Похиленко Н.П. Минералогическое районирование алмазоносных территорий: опыт применения парагенетического анализа гранатов из кимберлитов. *Доклады Академии наук*. 2016;467(2):192–195. <https://doi.org/10.7868/S0869565216080193>

Samdanov D.A., Afanas'ev, V.P., Tychkov N.S., Pokhilenko N.P. Mineralogical zoning of the diamon-

diferous areas: Application experience of paragenetic analysis of garnets from kimberlites. *Doklady Earth Sciences*. 2016;467(1):228–231. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16030120>.

18. Сарсадских Н.Н. Поиски месторождений алмаза по минералам спутникам. *Информационный сборник ВСЕГЕИ*. 1958;(5):122–132.

Sarsadskikh N.N. Diamond deposits prospecting by accompanying minerals. *VSEGEI*. 1958;(5):122–132. (In Russ.)

19. Серов И.В., Никифорова А.Ю., Коршикова Л.Б. Повышение эффективности минералогических методов: районирование поисковых площадей на основе типоморфных особенностей МСА как основа прогноза на коренную алмазоносность. *Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии: Материалы IV Региональной научно-практической конференции, г. Мирный, 9–11 июня 2014*. Мирный; 2014:207–208.

Serov I.V., Nikiforova A.Yu., Korshikova L.B. Improving the efficiency of mineralogical methods: zoning of prospecting areas based on typomorphic features of the diamond accompanying minerals as prospecting native diamond deposits base. *Geological support of the mineral resource base of diamonds: problems, solutions, innovative developments and technologies: Materials of the 4th Regional Scientific and Practical Conference, Mirny, June 9–11, 2014*. Mirny; 2014:207–208. (In Russ.)

20. Серов И.В., Граханов О.С., Кошкарев Д.А. Прогнозирование и поиски коренных месторождений алмазов на Сибирской платформе: Методическое пособие. Мирный: АЛРОСА; 2020.

Serov I.V., Grachanov O.S., Koshkarev D. A. *Native diamonds deposits prospecting and search on Siberian platform: Guidance manual*. Mirny: ALROSA; 2020. (In Russ.)

21. Старкова Т.С., Муллаярова Л.С., Овчинников И.М., Остапенко Д.В., Толстов А.В. Новые кимберлиты Слюдякарского поля (Ыгыаттинский алмазоносный район, Якутия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН*. 2022:354–357.

Starkova T.S., Mullayarova L.S., Ovchinnikov I.M., Ostapenko D.V., Tolstov A.V. The new kimberlites of the Suldyukar field (Ygyattinsky diamonds region, Yakutia). *Geology and mineral resources of North-East Russia: Materials of XII all-Russian scientific-practical conference devoted to the 65-year anniversary of Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS*. 2022:354–357. (In Russ.)

22. Старкова Т.С., Мальцев М.В., Толстов А.В. Сравнительная характеристика минералов-индикаторов кимберлита и новые перспективы Ыгыаттинского алмазоносного района (Западная Якутия). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2019;(2):35–44.

Starkova T.S., Maltsev M.V., Tolstov A.V. Comparative characteristics of indicator minerals of kimberlites and new perspectives diamond of the Ygyatta diamondiferous region (Western Yakutia). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*; 2019(2):35–44. (In Russ.)

23. Толстов А.В., Проценко Е.В. Подготовка площадей для поисков новых алмазоносных районов в Западной Якутии. *Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции*. 2019:48–49.

Tolstov A.V., Protsenko E.V. Preparation of areas for the search for new diamond-bearing areas in western Yakutia. *Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of diamond deposits, precious and non-ferrous metals. Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference*. 2019: 48–49.

24. Толстов А.В., Проценко Е.В. Подготовка площадей для поисков новых алмазоносных районов в Западной Якутии. *Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник тезисов докладов IX Международной научно-практической конференции, г. Москва, 17–19 апреля 2019 г.* М.:ЦНИГРИ; 2019:48–49.

Tolstov A.V., Protsenko E.V. Preparation of areas for the search for new diamond-bearing areas in western Yakutia. *Scientific and methodological foundations of forecasting, prospecting, evaluation of diamond deposits, precious and non-ferrous metals. Proceedings of 9th International Scientific and Practical Conference, Moscow, April 17–19, 2019*. Moscow: TsNIGRI; 2019: 48–49. (In Russ.)

25. Юшкин Н.П. *Топоминералогия*. М.: Недра; 1982. Yushkin N.P. *Topomineralogy*. Moscow: Nedra; 1982. (In Russ.)

Об авторах

ШАХУРДИНА Надежда Константиновна, руководитель направления, <https://orcid.org/0000-0003-2894-7530>, e-mail: ShakhurdinaNK@alrosa.ru

ТАРСКИХ Оксана Васильевна, кандидат геолого-минералогических наук, эксперт, <https://orcid.org/0000-0002-1004-0546>, e-mail: TarskikhOV@alrosa.ru

КОЛЕСНИК Александр Юрьевич, ведущий геолог, <https://orcid.org/0000-0001-9623-321X>, e-mail: kolesnikau@yandex.ru

About the authors

SHAKHURDINA, Nadezhda Konstantinovna, Head of Research, <https://orcid.org/0000-0003-2894-7530>, e-mail: ShakhurdinaNK@alrosa.ru

TARSKIKH, Oksana Vasilievna, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Expert, <https://orcid.org/0000-0002-1004-0546>, e-mail: TarskikhOV@alrosa.ru

KOLESNIK, Alexander Yurievich, Leading Geologist, <https://orcid.org/0000-0001-9623-321X>, e-mail: kolesnikau@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.02.2023

Поступила после рецензирования / Revised 19.04.2023

Принята к публикации / Accepted 25.04.2023

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 556.314; 551.34

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Оригинальная статья

Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования

Н. А. Павлова[✉], В. В. Шепелев, М. В. Данзанова, Л. Д. Иванова, В. А. Ефремова

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

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация

На основе систематизации и обобщения результатов изучения мерзлотно-гидрогеологических условий Центральной Якутии выявлены закономерности формирования и распространения подмерзлотных гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатных натриевых холодных минеральных вод, а также оценены перспективы их использования в лечебных целях. Установлено, что исследованные маломинерализованные подземные воды являются базовыми аналогами минеральных вод майкопского и карачинского типов без специфических биогенно-активных компонентов. Основными критериями для выделения этих вод как минеральных, помимо минерализации, являются концентрации гидрокарбонатов в пределах 400–1200 мг/дм³, хлоридов – 100–600, сульфатов – 50–250 для карачинского типа и <50 для майкопского типа, натрия – 400–800 мг/дм³, содержание кальция и магния <10 мг/дм³. Формированию гидрокарбонатных и хлоридно-гидрокарбонатных натриевых минеральных вод на исследуемой территории способствуют геокриологические условия, обуславливающие концентрирование составляющих макрокомпонентного состава воды при низких температурах и затрудненном водообмене. Изучение микрокомпонентного состава подмерзлотных вод региона показало, что уровень содержания в них фтора и лития превышает предельно-допустимые концентрации для питьевых вод, но позволяет рассматривать эти воды в качестве лечебных. Подчеркивается необходимость дальнейших биолого-физиологических исследований подмерзлотных вод с повышенным содержанием фтора и лития. Это будет способствовать развитию санаторно-курортного комплекса в Якутии и даст возможность расширить бальнеологический спектр лечения и профилактики заболеваний жителей республики и сопредельных регионов.

Ключевые слова: минеральные воды, мерзлотно-гидрогеологические условия, химический состав, фтор, литий
Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного контракта на выполнение научно-исследовательской работы по теме «Прогноз изменения геокриологических условий и риски освоения криолитозоны (№ 4964 от 6 мая 2022 г.). Использование криогенных ресурсов и ресурсов подземной гидросферы Якутии. 2 этап». Изучение микрокомпонентного состава подмерзлотных вод выполнено в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН (регистрационный номер 122012400106-7).

Для цитирования: Павлова Н.А., Шепелев В.В., Данзанова М.В., Иванова Л.Д., Ефремова В.А. Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):236–247. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Original article

Mineral medicinal groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use

N. A. Pavlova[✉], V. V. Shepelev, M. V. Danzanova, L. D. Ivanova, V. A. Efremova

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

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract

In this study, we reviewed and summarized the data on permafrost and groundwater areas of Central Yakutia to understand the formation and distribution of subpermafrost mineral waters of sodium bicarbonate and chloride-bicarbonate

types, and to evaluate their potential use for medical purposes. Analysis of the data indicated that these low-mineralized groundwaters are basic analogues to the Maykop and Karachi mineral waters, with no particular bioactive components. These mineral water types contain 400 to 1200 mg/dm³ bicarbonates, 100 to 600 mg/dm³ chlorides, 50 to 250 mg/dm³ (Karachi) and <50 mg/dm³ (Maykop) sulfates, 400 to 800 mg/dm³ sodium, and <10 mg/dm³ calcium and magnesium. The formation of sodium bicarbonate and chloride-bicarbonate type water in Central Yakutia is influenced by permafrost which promotes concentration of major chemical components under the cold temperatures and slow groundwater circulation. The study of minor and trace constituents indicates that the subpermafrost waters in the study region contain fluorine and lithium in excess of the drinking water standards but are potentially appropriate for balneotherapy. Further research on the bio-physiological effects of subpermafrost waters with elevated fluorine and lithium concentrations contribute to the development of the spa and health resort industry in Yakutia. Moreover, the study will expand the balneological spectrum of disease prevention and treatment for the benefit of residents of Yakutia and the adjacent regions.

Keywords: mineral water, deposit, permafrost hydrogeology, chemical composition, fluorine, lithium

Funding. This study was conducted under Public Contract “Research Project on Prediction of Permafrost Changes and Risks for Development. Use of Yakutia’s Cryogenic and Groundwater Resources, Stage 2” (number 4964, dt. 06.05.2022). The study of minor and trace constituents of subpermafrost waters was supported by the Program of Foundation Scientific Research at the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS (number №122012400106-7).

For citation: Pavlova N.A., Shepelev V.V., Danzanova M.V., Ivanova L.D., Efremova V.A. Mineral medicinal groundwaters in Central Yakutia and prospects for their use. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):236–247. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-236-247>

Введение

В Центральной Якутии, большая часть которой находится в пределах Восточно-Сибирской платформы, площадное распространение имеют подмерзлотные водоносные комплексы [1]. Они содержат разные химические типы подземных вод, перспективные для использования в санаторно-курортном деле. Согласно определению В.В. Иванова и Г.А. Невраева [2, 3], «лечебными минеральными водами называются природные воды, которые содержат в повышенных концентрациях те или другие минеральные (реже органические) компоненты и газы и (или) обладают какими-нибудь физическими свойствами (радиоактивность, реакция среды и др.), благодаря чему эти воды оказывают на организм человека лечебное действие в той или иной степени, которое отличается от действий пресной воды» [2, с. 7]. Питьевые минеральные воды с минерализацией менее 1 г/дм³ относят к природным столовым водам, от 1 до 10 г/дм³ – к лечебно-столовым (которые могут быть использованы как столовые напитки при непостоянном употреблении). Минеральные воды с минерализацией более 10 г/дм³ и меньшей при содержании в них определенного количества биологически активных компонентов и соединений относят к лечебным водам, которые используют по назначению врача.

На территории Центральной Якутии с момента первых исследований бальнеологических ресурсов этого региона, начавшихся с изучения оз. Абалах в конце 19 века, к настоящему време-

ни оценены запасы четырех месторождений минеральных подземных вод, различающихся по геохимическим показателям и лечебным свойствам: Верхне-Бестяхское месторождение крепких гидросульфидных лечебных минеральных вод для наружного применения, Абалахское месторождение маломинерализованных гидрокарбонатных натриевых вод для наружного и внутреннего применения, Нюрбинское месторождение питьевых лечебно-столовых среднеминерализованных хлоридных кальциево-натриевых вод и месторождение Ленские зори – питьевых лечебно-столовых маломинерализованных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод [4–6]. В фондовых материалах геологических предприятий и отдельных публикациях имеются разрозненные сведения и о других проявлениях минеральных подмерзлотных вод, запасы и прогнозные ресурсы которых не оценивались [7–9]. Эти проявления, выявленные попутно при решении задач хозяйственно-питьевого водообеспечения населения, можно рассматривать как перспективные геолого-гидрогеологические объекты.

Геологическое строение и мерзлотно-гидрогеологические условия рассматриваемого региона предопределили широкое распространение в подмерзлотных водоносных комплексах группы минеральных подземных вод, лечебное действие которых определяется ионным составом и минерализацией. В Центральной Якутии наиболее широко эта группа представлена гидрокарбонатными натриевыми и хлоридно-гидро-

карбонатными натриевыми холодными лечебными минеральными подземными водами, которые и явились объектом исследований.

Геологическое строение и геокриологические условия территории

При характеристике геолого-гидрогеологических условий и минеральных вод исследуемого региона, помимо авторских, использованы материалы изысканий геологических организаций, проводивших работы в Центральной Якутии для водоснабжения различных хозяйственных объектов.

Основной гидрогеологической структурой региона является Якутский артезианский бассейн, чехол которого сложен терригенно-карбонатными отложениями палеозойского и мезозойского возрастов. Мощность осадочной толщи достигает 1–4 км и более и сокращается до 538–890 м в районе Якутского сводового поднятия [8, 9]. Регион расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Глубина залегания их подошвы изменяется от 170 до 600 м, максимальная достигает 885 м на Буотамо-Амгинском междуречье [10]. Значительное снижение мощности мерзлых пород вплоть до образования сквозных таликов отмечается под руслом р. Лена, ее крупными притоками и под отдельными озерами. В соответствии с общим пологим наклоном отложений чехла к внутренней части бассейна, по направлению с юго-востока на север и северо-запад под многолетнемерзлой толщей происходит смена водоносных комплексов. В южной части региона первыми регионально выдержанными водоносными комплексами являются верхнепротерозойский, нижнекембрийский, среднекембрийский, сложенные карбонатными породами. На широте г. Якутск подмерзлотные воды вскрыты скважинами в юрских терригенных отложениях, а севернее развит меловой терригенный водоносный комплекс. Благодаря отсутствию выраженных водоупоров, водоносные комплексы кембрийских и юрских отложений имеют гидравлическую взаимосвязь [9, 11].

В подмерзлотных водоносных горизонтах Центральной Якутии маломинерализованные щелочные гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды доминируют (см. рисунок). Их минерализация изменяется от 0,7 до 3 г/л, pH варьирует в пределах 7,5–9,3, а температура не превышает 3,5 °С. Воды такого хи-

мического типа вскрыты скважинами как в мезозойских терригенных отложениях, так и в среднекембрийских карбонатных породах.

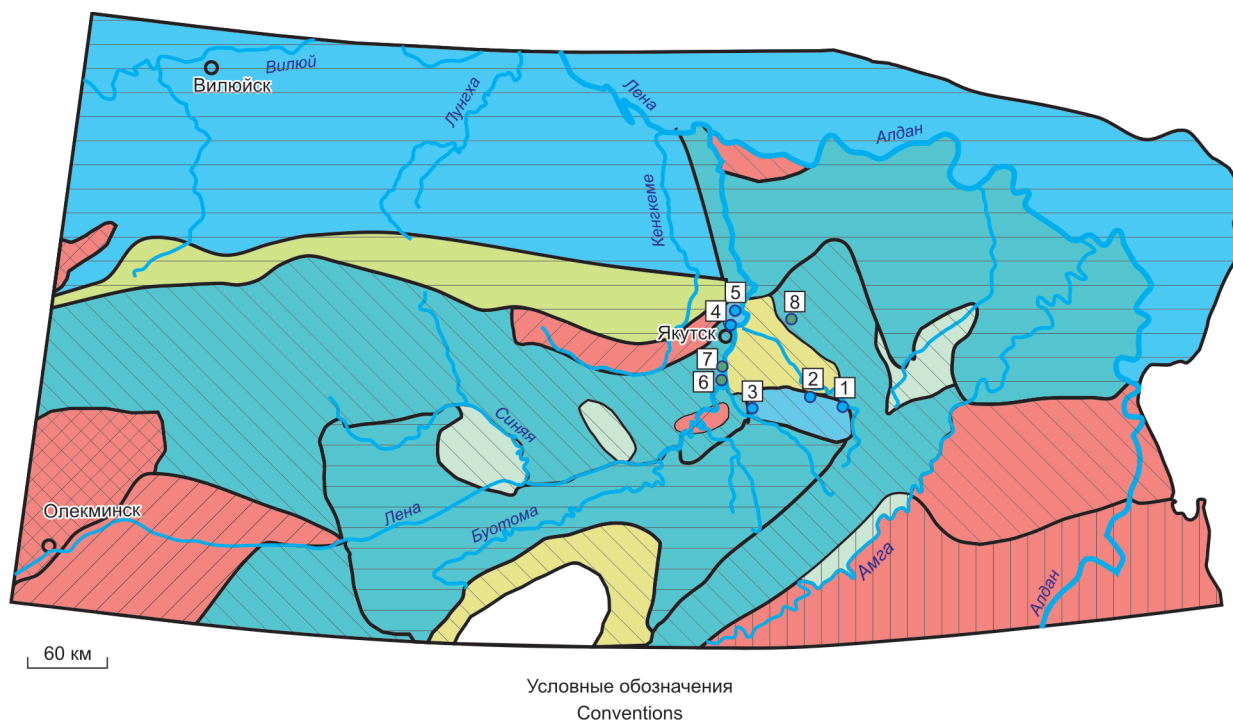
Гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды Центральной Якутии, согласно действующей классификации [12], могут быть отнесены к минеральным водам майкопского и карачинского типов без специфических биогенно-активных компонентов. Основными критериями для выделения этих вод как минеральных, помимо минерализации, являются концентрации гидрокарбонатов в пределах 400–1200 мг/дм³, хлоридов – 100–600, сульфатов – 50–250 для карачинского типа и <50 для майкопского типа, натрия – 400–800 мг/дм³, содержание кальция и магния <10 мг/дм³.

Формирование и распространение минеральных гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод

Согласно С.Л. Шварцеву и др. [13], формированию гидрокарбонатных натриевых (содовых) подземных вод способствуют гидролиз алюмосиликатов и испарительное концентрирование, в процессе которых происходит насыщение водного раствора кальцием. С момента достижения равновесия воды с кальцитом последний осаждается в виде карбонатов, а в растворе концентрируется натрий. При гидролизе молекула воды разлагается на ионы H⁺ и OH⁻. Первые связываются с глинами, а ионы OH⁻ в отсутствие углекислоты накапливаются в растворе и способствуют увеличению его pH.

Содообразование возможно в любых горных породах, которые содержат натрий [14]. В области криолитозоны аналогом испарительного концентрирования является криогенное [15]. В условиях низких температур насыщение маломинерализованных растворов кальцием достигается довольно быстро. Это наглядно подтверждают скопления кальцита на наледях поверхностных вод, а также на ледяных образованиях карстовых карбонатных и гипсовых пещер [16–19]. В результате осаждения кальцита при вымораживании пресного раствора в его химическом составе становятся преобладающими ионы гидрокарбоната и натрия [20, 21].

Обогащение подземных вод ионом натрием и повышение их щелочности может происходить и на стадии деградации многолетнемерзлых пород. Именно протаиванием криогенной толщи Р.С. Кононова объясняет распространение в Центральной Якутии до глубины 2 км маломинерализованных натриевых вод.



Схематическая гидрохимическая карта подмерзлотных вод Центральной Якутии.

1 – подземные воды в чехле бассейна отсутствуют; 2 – граница площадей с различным химическим составом подземных вод; 3 – участки с выявленными месторождениями и проявлениями минеральных вод: 1 – Абалах, 2 – Табага, 3 – Ломтука, 4 – Марха, 5 – Тулагино, 6 – Якутск (Ленские зори), 7 – Хатассы, 8 – Тюнгиюлю

Schematic hydrochemical map of subpermafrost waters in Central Yakutia.

1 – groundwater is absent in the sedimentary cover; 2 – boundary of areas with different groundwater chemical composition; 3 – sites in proved mineral water deposits and seeps: 1 – Abalakh, 2 – Tabaga, 3 – Lomtuka, 4 – Markha, 5 – Tulagino, 6 – Yakutsk (Lena Dawns), 7 – Khatassy, 8 – Tyungyulu

нерализованных подземных вод с преобладанием натрия [22]. О совместных процессах кальцитизации водовмещающих пород и избирательного концентрирования ионов натрия в подмерзлотных водоносных комплексах Центральной Яку-

тии свидетельствуют включения кальцита в кернах скважин и гидрокарбонатный натриевый состав подземных вод юрских и среднекембрийских водоносных комплексов, ранее подвергшихся многолетнему промерзанию [20, 21].

Впервые подмерзлотные минеральные гидрокарбонатные натриевые (содовые) воды были изучены в котловине термокарстового оз. Абалах. Озеро расположено в Мегино-Кангаласском районе РС(Я), на Лено-Амгинском междуречье, в 85 км на восток от г. Якутск. Скважинами, пробуренными вблизи озера, под толщей многолетнемерзлых пород мощностью 173–260 м в трещиноватых закарстованных карбонатных отложениях среднего кембрия были вскрыты подземные высоконапорные воды [11]. Их статический уровень установился на 7 м выше поверхности земли. Основными ионами, определяющими химический состав и физические свойства воды, являются гидрокарбонат-ионы (HCO_3^-) в концентрации 1013–1049 мг/дм³, содержание хлорид-ионов (Cl^-) изменяется в пределах 71–89 мг/дм³, а сульфат-ионов (SO_4^{2-}) – 12–31 мг/дм³. Из катионов в подмерзлотных водах оз. Абалах преобладают натрий-ионы (Na^+) суммарно с калий-ионами (K^+) в концентрации 408–437 мг/дм³. Содержание ионов магния (Mg^{2+}) и кальция (Ca^{2+}) составляет соответственно 10–11 и 8–14 мг/дм³. Из биологически активных компонентов в воде скважины обнаружены метакремниевая кислота 11–32 мг/дм³ (при кондиции отнесения к минеральным водам 50 мг/дм³). Минеральная вода «Абалахская» по минерализации и основному ионно-солевому составу является маломинерализованной (1,6 г/л) гидрокарбонатной натривой, со слабощелочной реакцией (pH 7,9–8,1).

В соответствии с принятыми критериями оценки, подземная минеральная вода «Абалахская» является аналогом майкопского типа минеральных вод. Согласно бальнеологическому заключению Томского НИИ курортологии и физиотерапии, минеральная вода «Абалахская» рекомендована для питьевого лечения при заболеваниях органов пищеварения: рефлюкс-эзофагите, хронических гастритах с гипо-, нормо- и гиперсекрецией, язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки, хроническом холецистите, дискинезии желчевыводящих путей, хроническом панкреатите, синдроме раздраженной кишки [6, 7]. Кроме того, минеральная подземная вода «Абалахская» показана при болезнях эндокринной системы, расстройствах питания и нарушении обмена веществ (сахарный диабет, ожирение, нарушение солевого обмена, нарушение обмена липопротеидов), а также при болезнях мочеполовой системы (хронический пиелонефрит, мочекаменная болезнь, хронический цистит, уретрит,

тригонит). Оцененные запасы Абалахского месторождения минеральных подземных вод составляют 750 м³/сут [11].

Предпосылки наличия минеральных подземных вод этого типа имеются и на смежной территории. Так, у пос. Табага Мегино-Кангаласского района скважиной вскрыты высоконапорные подмерзлотные гидрокарбонатные натриевые воды с минерализацией 0,8–1,3 г/дм³ (табл. 1). Они приурочены к среднекембрийским отложениям, представленным известняками и доломитами. Глубина залегания кровли водоносного комплекса 225 м.

Подземные воды, как и на участке «Абалах», высоконапорные, при их вскрытии скважины самоизливали с дебитом до 4,2 л/с. Содержание в них макроэлементов соответствует кондициям, установленным для лечебно-столовых вод.

Вблизи с. Ломтука (Мегино-Кангаласский район) выявлено месторождение маломинерализованных гидрокарбонатных натриевых минеральных подземных вод. Они залегают в интервале 253–266 м в закарстованных известняках среднекембрийского возраста [5]. По заключению Томского НИИ курортологии и физиотерапии, эти подмерзлотные воды могут быть отнесены к минеральным лечебно-столовым и являются разновидностью минеральных вод майкопского типа. Их выявленные запасы составляют 30 м³/сут.

К проявлениям минеральных вод этого типа можно отнести подземные воды, вскрытые отдельными скважинами в окрестностях г. Якутск в районе Якутского сводового поднятия (п. Марха) и у с. Тулагино. На первом участке при совместном опробовании средне-нижнеюрских водоносных комплексов обнаружены подземные воды с минерализацией 1,2–1,3 г/дм³ [8]. В с. Тулагино в переслаивающихся песчаниках и алевролитах среднеюрского возраста подземные воды имеют минерализацию 1,3–1,5 г/дм³.

Гидрокарбонатный натриевый состав подмерзлотных вод мезозойских водоносных комплексов на этих участках является, вероятно, следствием их взаимодействия с алюмосиликатными минералами водовмещающих отложений. На этот процесс влияет также деградационное смещение подошвы многолетней мерзлоты в условиях затрудненного водообмена. О последнем свидетельствует дефицит гидростатических давлений в подмерзлотных водоносных комплексах (абсолютные отметки пьезометрического уровня подземных вод близки к нулю или даже отрицательные).

Таблица 1

Характеристика подмерзлотных минеральных гидрокарбонатных натриевых вод

Table 1

Characteristics of subpermafrost mineral sodium bicarbonate water

Участок и индекс водовмещающего комплекса Site and aquifer index	Интервал залегания, м Depth interval, m	Глубина залегания абс. отм. пьезометрического уровня, м Depth of piezometric level, m a.s.l.	Формула ионного состава Ionic composition formula
Абалах Є ₂ Abalakh Є ₂	173–260	$\frac{+7}{165}$	$F3,6 \text{ Li}0,6 \text{ M}_2 \frac{\text{HCO}_3(85 - 88)\text{Cl}(10 - 13)\text{SO}_4(1 - 2)}{(\text{Na} + \text{K})(93 - 94)\text{Mg}42\text{Ca}(2 - 3)} \text{pH}8,0$
Табага Є ₂ Tabaga Є ₂	225–235	$\frac{+4,5}{165}$	$F4,7 \text{ Li}0,5 \text{ M}_2 \frac{\text{HCO}_3 93 \text{Cl}5 \text{SO}_4 2}{(\text{Na} + \text{K})95 \text{Mg}2 \text{Ca}2} \text{pH}8,1$
Ломтука Є ₂ Lomtuka Є ₂	253–266	$\frac{9}{145}$	$\text{Li}0,4 \text{ M}_1 \frac{\text{HCO}_3 98 \text{Cl}1 \text{SO}_4 1}{(\text{Na} + \text{K})96 \text{Mg}2 \text{Ca}2} \text{pH}7,6 - 8,4 \text{F}10$
Марха J ₂₋₁ Markha J ₂₋₁	250–420	$\frac{129}{-31}$	$\text{Li}0,4 \text{ M}_1 \frac{\text{HCO}_3 82 \text{Cl}15 \text{SO}_4 1}{(\text{Na} + \text{K})100} \text{pH}9,0 \text{F}11$
Тулагино J ₂ Tulagino J ₂	380–500	$\frac{123}{-27}$	$\text{Li}0,3 \text{ M}_1 \frac{\text{HCO}_3(81 - 85)\text{Cl}(12 - 15)}{(\text{Na} + \text{K})99} \text{pH}7,9 - 8,4 \text{F}10$

Формирование и распространение хлоридно-гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод

Хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды изучены в районе Табагинского мыса р. Лена вблизи г. Якутск. Проявления их отмечены и на правобережье р. Лена. Подземные воды приурочены к нижнеюрскому водоносному комплексу, сложенному трещиноватыми песчаниками и алевролитами. Залегающие под многолетнемерзлыми породами подземные воды по химическим показателям близки к карачинскому типу.

В районе Табагинского мыса хлоридно-гидрокарбонатные натриевые подмерзлотные воды с минерализацией 1,7 г/дм³ вскрыты скважиной в интервале глубин 240–310 м (табл. 2). Месторождение минеральных вод, получившее наименование «Ленские зори», расположено в области межфациальных перетоков подземных вод из

среднекембрийского водоносного комплекса в нижнеюрский. В геолого-тектоническом отношении оно находится в зоне влияния сейсмо-активного Табагинского сдвига, пересекающего Якутский разлом [23]. На участке пересечения Табагинского разлома и р. Лена бурением достоверно установлено наличие сквозного подруслового талика [8]. Минерализация подземных вод в талике возрастает по разрезу, от 0,6 г/дм³ в кровле нижнеюрского водоносного комплекса до 1,3 г/дм³ в нижнекембрийском водоносном комплексе. С глубиной анионный состав воды изменяется в отложениях юры от гидрокарбонатного до хлоридно-гидрокарбонатного, в кембрийском водоносном комплексе он гидрокарбонатно-хлоридный. Среди катионов, независимо от литологии и возраста пород, в подземных водах сквозного талика преобладают ионы натрия, доля их с глубиной увеличивается от 81 до 98 % экв.

**Характеристика подмерзлотных
минеральных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод**

Table 2

Characteristics of subpermafrost mineral sodium chloride-bicarbonate water

Участок и индекс водовмещающего комплекса Site and aquifer index	Интервал залегания, м Depth interval, m	Глубина залегания абс. отм. пьезометрического уровня, м Depth of piezometric level, m a.s.l.	Формула ионного состава Ionic composition formula
Якутск (Ленские зори) J ₁ Yakutsk (Lena Dawns) J ₁	240–310	$\frac{57,5}{47}$	F5,3 Li0,4 M ₂ $\frac{\text{HCO}_3 47 \text{Cl} 44 \text{CO}_3 5 \text{SO}_4 4}{(\text{Na} + \text{K}) 99 \text{Mg} 1}$ pH8,9
Хатассы J ₁ -C ₂ Khatassy J ₁ -C ₂	305–400	$\frac{53}{40}$	F4,8 Li0,4 M ₁ $\frac{\text{HCO}_3 51 \text{Cl} 25 \text{SO}_4 22}{(\text{Na} + \text{K}) 92 \text{Mg} 4 \text{Ca} 4}$ pH8,4
Хатассы J ₁ Khatassy J ₁	260–290	$\frac{27}{70}$	F3,8 Li0,4 M ₁ $\frac{\text{HCO}_3 45 \text{Cl} 30 \text{SO}_4 25}{(\text{Na} + \text{K}) 90 \text{Mg} 6 \text{Ca} 4}$ pH7,1
Тюнгюлю J ₁ Tyungyulu J ₁	470–500	$\frac{171}{-33}$	F8,0 Li0,3 M ₂ $\frac{\text{HCO}_3 57 \text{Cl} 38 \text{CO}_3 5}{(\text{Na} + \text{K}) 99 \text{Mg} 1}$ pH8,2

Сходный химический состав подрусловых вод и подмерзлотных вод, вскрытых вблизи р. Лена, позволяет утверждать о большой (не исключено, что ведущей) роли тектонической и мерзлотно-гидрогеологической обстановки в районе Табагинского мыса в формировании месторождения «Ленские зори».

Минеральная вода месторождения пригодна к лечебному (внутреннему) применению и может использоваться для профилактики и лечения широкого спектра заболеваний мочеполовой и эндокринной систем, а также органов пищеварения. Утвержденная величина запасов минеральных подземных вод месторождения «Ленские зори» с учетом промышленного их разлива и санаторного лечебно-профилактического потребления позволяет организовать производство с мощностью выпускаемой продукции до 100 м³/сут [11].

К перспективным для выявления минеральных хлоридно-гидрокарбонатных натриевых вод от-

носится территория с. Хатассы вблизи г. Якутск. Здесь в гидравлически связанных нижнеюрском и среднекембрийском водоносных горизонтах, представленных песчаниками и известняками, содержатся подмерзлотные воды с минерализацией 1,1–1,3 г/дм³ с кондиционными концентрациями макрокомпонентов.

Аналогом минеральных вод карачинского типа могут быть подземные воды, вскрытые скважиной вблизи озерной котловины оз. Тюнгюлю на правобережье р. Лена в отложениях нижнеюрского возраста. Водоносный горизонт сложен песчаниками с прослоями алевролита и бурого угля. Площадь, на которой выявлены хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды, приурочена к узлу пересечения активных сдвиговых деформаций пород Нижнеалданской впадины с Кангаласским разломом [23]. Для оценки ресурсов подмерзлотных вод на этих участках и получения заключения об их бальнеологической ценности требуются дополнительные исследования.

Микрокомпонентный состав подмерзлотных минеральных вод

В подмерзлотных водах гидрокарбонатного и хлоридно-гидрокарбонатного натриевого состава Центральной Якутии присутствуют микроэлементы, концентрации которых превышают предельно-допустимые для питьевых вод, но позволяют рассматривать эти воды в качестве лечебных. Одним из таких активных биоэлементов является фтор. Этот галоген в детском возрасте необходим для своевременной минерализации зубов и костей, в дальнейшем – для профилактики остеопороза. Суточная потребность организма человека во фторе составляет 0,03 мг/кг массы тела для взрослого и 0,15–0,1 мг/кг для детей. Согласно современным требованиям, в лечебно-столовых минеральных водах с общей минерализацией 1–10 г/дм³ норма массовой концентрации фтора составляет 1,5–10 мг/дм³, а в лечебных минеральных – 10–15 мг/дм³ [24].

В водный раствор фтор поступает из горных пород. Основными его источниками являются минералы селлаит, слюда, флюорит, криолит, фтор-апатит, которые обогащают подземные воды фтористыми соединениями. Установлено, что в щелочных условиях и диапазоне минерализации воды от 0,7 до 1,7 г/дм³ скорость растворения фторидных минералов возрастает [25, 26], а преобладание в воде кальция среди катионов подавляет их растворимость [27, 28].

В Центральной Якутии в подмерзлотных водах, приуроченных к отложениям нижней и средней юры, содержание фтора в целом изменяется от 4,1 до 11,7 мг/дм³. Локальное повышение его содержания в воде (до 9,0–15,5 мг/дм³) зафиксировано в районе выступа кристаллического фундамента Якутского сводового поднятия [29]. Минерализация подземных вод юрских отложений 0,9–1,5 мг/дм³, химический состав преимущественно гидрокарбонатно-натриевый. По величине рН это слабо- и умеренно-щелочные воды. В подмерзлотных водах юрских водоносных комплексов доля кальция, который мог бы образовывать со фтором вторичные минералы, редко достигает 2 %. Ранее было показано, что в этом регионе геохимические условия, благоприятные для извлечения фтора из водовмещающих пород и аккумуляции его в растворе, формируются в процессе криогенного метаморфизма подземных вод и водовмещающих пород [29, 30].

В санаторном лечении целенаправленно фтористые минеральные воды как ведущий лечебный

фактор, как правило, не применяются. Тем не менее, курсовой прием такой воды может оказывать терапевтический эффект. В России наиболее известные минеральные питьевые воды, обогащенные фтором, выпускаются под марками «Ессентуки 4» (3 мг/дм³), «Ессентуки 17» (2), «Рычал-Су» (4), «Славяновская» (3 мг/дм³), «Смирновская» (2 мг/л), Белокуринские воды с содержанием фтора до 14 мг/л используются для наружного применения и ирригаций [31].

Другим жизненно важным элементом, высокие концентрации которого характерны для гидрокарбонатных натриевых подмерзлотных вод Центральной Якутии, является литий [8, 32]. Недостаток его в организме человека – одна из причин психических, неврологических, некоторых злокачественных патологий [33–35]. Избыток лития приводит к поражению почек, сердечно-сосудистой системы и щитовидной железы. Адекватный уровень потребления лития составляет 100 мкг, а верхний допустимый предел – 300 мкг [36]. Диапазон безвредной концентрации этого элемента в минеральных водах не установлен. В настоящее время для лечения неврологических расстройств часто используют литиевые препараты, как альтернативу им можно рассмотреть минеральные воды, обогащенные этим элементом.

Источником поступления лития в подземные воды могут быть растворы древних морских бассейнов, захороненные в процессе седиментогенеза, и горные породы. Содержание лития в морской воде около 0,15–0,2 мг/дм³. В горных породах наибольшие концентрации лития отмечаются в глинистых разностях и продуктах их метаморфизма (0,0054 и 0,0038 % соответственно), а также кислых изверженных породах (0,0034 %) [37]. В минералах глины он присутствует в основном в виде изоморфной примеси. В кислых изверженных породах главным концентратом и носителем лития является биотит, в меньшей степени – мусковит и сподумен. Эндогенные литиевые минералы в условиях гипергенеза и гидротермальных процессов легко изменяются, и литий выносятся с водами и рассеивается.

В Центральной Якутии в юрских водоносных комплексах подмерзлотные воды гидрокарбонатно-натриевого состава содержат литий в количестве от 0,07 до 0,68 мг/л (ПДК для питьевых вод 0,03 мг/л) [32]. В карбонатных водоносных комплексах концентрация лития в подземных

водах изменяется от 0,6 до 1,2 мг/дм³. Несомненно, предполагаемая бальнеологическая ценность подмерзлотных минеральных вод с повышенным содержанием лития должна быть предварительно подтверждена биолого-физиологическими исследованиями. Так, по данным А.Н. Васильева и В.Г. Амелина, содержание лития в минеральных водах кавказского региона «Ессентуки 4», «Ессентуки 17» и «Рычал Су» составляет 1,0–1,6 мг/дм³, но токсического воздействия ее на организм человека не зафиксировано [38].

Заключение

В Центральной Якутии в водоносных горизонтах, залегающих под толщей многолетнемерзлых пород, широко распространены холодные гидрокарбонатные и хлоридно-гидрокарбонатные натриевые воды, которые являются базовыми аналогами минеральных вод майкопского и карачинского типов. Формированию их во многом способствуют мерзлотно-геокриологические условия, обуславливающие концентрирование составляющих макрокомпонентного состава воды при низких температурах и затрудненном водообмене. Анализ геокриологических, гидрогеологических и гидрогеохимических условий указывает на высокую перспективность обнаружения месторождений минеральных подземных вод в регионе.

Наряду с рассмотрением подмерзлотных вод как минеральных, бальнеологическое действие которых определяется ионным составом и минерализацией, стоит оценить их как фтористые и литиевые подземные минеральные воды. Это будет способствовать развитию санаторно-курортного комплекса в Якутии и даст возможность расширить бальнеологический спектр лечения и профилактики заболеваний жителей республики и сопредельных регионов.

Необходимо отметить, что спрос местного населения на профилактическое и реабилитационное лечение сегодня достаточно большой и намного превышает возможности имеющейся в республике санаторно-курортной базы. Это можно объяснить тем, что в существующих геополитических и социально-экономических реалиях бывшие советские здравницы, располагавшиеся в Грузии, Молдавии, Средней Азии, Прибалтике, стали труднодоступны для многих. Кроме того, люди все больше стали осознавать преимущества отдыха и лечения в местных оздоровительных учреждениях. В этом случае не про-

исходят нарушения биологических ритмов в организме человека, психологические и адаптационные перегрузки, вызываемые при дальних поездках, резкой смене климата и привычного пищевого рациона. Следует подчеркнуть, что существенным преимуществом бальнеологических ресурсов нашей республики является их экологичность, что, безусловно, повышает интерес к местным здравницам.

Список литературы / References

1. Шепелев В.В., Толстухин О.Н., Пигузова В.М. и др. *Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири*. Новосибирск: Наука; 1984. 192 с.
Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. et al. *Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. (In Russ.)
2. Иванов В.В., Невраев Г.А. *Классификация подземных минеральных вод*. М.: Недра; 1964. 168 с.
Ivanov V.V., Nevraev G.A. *The classification of underground mineral water*. Moscow: Nedra; 1964. (In Russ.)
3. Иванов В.В. *Основные критерии оценки химического состава минеральных вод. Методические рекомендации*. М.: Центрсоветкурорт; 1982. 93 с.
Ivanov V.V. *The main criteria for assessing the chemical composition of mineral water. Guidelines*. Moscow: Tsentrsovetkurort; 1982. (In Russ.)
4. Трофимова Т.П. История исследования, химический состав воды и грязи озера Абалах. *Международный научный институт «Educatio»*. 2015;П(9):72–75.
Trofimova T.P. History of research, chemical composition of water and mud of Lake Abalakh. *International Scientific Institute "Educatio"*. 2015.П(9):72–75. (In Russ.)
5. Скутин В.И., Тихонов Д.Г. Минеральные воды Якутии и перспективы их использования в лечебно-оздоровительных целях. *Актуальные проблемы курортологии. Профилактика, реабилитация и восстановительное лечение на Крайнем Севере: материалы конференции, 2005*. 2005:102–106.
Skutin V.I., Tikhonov D.G. Mineral water and prospects for their use for health-improving purposes in Yakutia. *Actual problems of balneology. Prevention, rehabilitation and rehabilitation treatment in the Far North: proceedings of the conference, 2005*. 2005:102–106. (In Russ.)
6. Сафонова С.Л., Емельянова Э.А., Платонова А.А., Филиппов А.А. *Минеральная вода «Абалахская» как природный фактор в терапии заболеваний органов пищеварения*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2012. 132 с.
Safonova S.L., Emelyanova E.A., Platonova A.A., Filippov A.A. *Mineral water "Abalakhskaya" as a natural factor in the treatment of digestive system diseases*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2012. (In Russ.)
7. Шепелев В.В., Черепанова А.П., Дмитриева Т.Г. О состоянии и перспективах развития санаторно-ку-

портной базы в Якутии за счет использования минеральных лечебных подземных вод. *Якутский медицинский журнал*. 2009;4(28):84–86.

Shepelev V.V., Cherepanova A.P., Dmitrieva T.G. Status and prospects of sanatorium and resort base in Yakutia by the use of mineral medical groundwaters. *Yakut Medical Journal*. 2009;4(28):84–86. (In Russ.)

8. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М. и др. *Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования*. Новосибирск: Филиал ГЕО Изд-ва СО РАН; 2003. 174 с.

Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M. et al. *Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS “Geo”; 2003. (In Russ.)

9. Шепелев Н.Г., Макогонова О.В. Моделирование гидрогеологических условий подмерзлотного водоносного комплекса для территории г. Якутска. *Наука и образование*. 2010;2(58):21–26.

Shepelev N.G., Makogonova O.V. Modeling of hydrogeological conditions of subpermafrost aquifer for the Yakutsk city area. *Nauka i obrazovaniye*. 2010;2(58):21–26. (In Russ.)

10. Иванова Л.Д., Никитина Н.М. Об уточнении схемы мерзлотно-гидрогеологического районирования в южной части Якутского артезианского бассейна. *Криосфера Земли*. 2000;IV(2):52–56.

Ivanova L.D., Nikitina N.M. On the refinement of the scheme of permafrost-hydrogeological zoning in the southern part of the Yakutsk artesian basin. *Earth's Cryosphere*. 2000; IV(2):52–56. (In Russ.)

11. Федоров А.А., Федоров М.А. Особенности изучения и использования минеральных вод Центральной Якутии. *XXI Совецание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием: материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России, 25–28 июня 2015 г.* 2015:177–180.

Fedorov A.A., Fedorov M.A. Features of the study and use of mineral waters in Central Yakutia. *21th conference on groundwater in Siberia and Far East with international participation: Proceedings of the National conference on groundwater in Eastern Russia*, June 22–28 2015. 2015:177–180. (In Russ.)

12. ГОСТ Р 54316-2020 *Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия*. М.: Стандартинформ; 2020. 49 с.

GOST R 54316-2020 *Drinking natural mineral waters. General specifications*. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russ.)

13. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А. и др. *Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2: Система вода – порода в условиях зоны гипергенеза*. Новосибирск: СО РАН; 2007. 389 с.

Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A. et al. *Geological evolution and self-organization of the water –*

rock system. Vol. 2: The water – rock system under conditions of hypergenesis. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS; 2007. (In Russ.)

14. Шварцев С.Л. *Гидрогеохимия зоны гипергенеза*. М.: Недра; 1998. 366 с.

Shvartsev S.L. *Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone*. Moscow: Nedra; 1998. (In Russ.)

15. Комаров И.А. *Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах*. М.: Научный мир; 2003. 608 с.

Komarov I.A. *Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks*. Moscow: Nauchnyy mir; 2003. (In Russ.)

16. Richter D.K., Meissner P., Immenhauser A., Schulte U., Dorsten I. Cryogenic and non-cryogenic pool calcites indicating permafrost and non-permafrost periods: A case study from the Herbstlabyrinth-Advent Cave system (Germany). *The Cryosphere*. 2010;4(4):501–509. <https://doi.org/10.5194/tc-4-501-2010>

17. Кадебская О.И., Чайковский И.И. Минеральные образования пещеры Победа (Башкортостан), связанные с формированием и оттаиванием многолетнего льда. *Известия РАН. Серия географическая*. 2014;3: 66–72. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-66-72>

Kadebskaya O.I., Chaikovskiy I.I. Mineral formations of Pobeda cave (Bashkortostan) associated with the formation and thawing of multi-year ice *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya*. 2014;3:66–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2014-3-66-72>

18. Базарова Е.П., Кадебская О.И., Цурихин Е.А. Криогенные минералы пещер р. Вижай (Северный Урал). *Вестник Пермского университета. Геология*. 2018;17(1):11–17. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.11>

Bazarova E.P., Kadebskaya O.I., Tsurikhin E.A. Cryogenic Minerals in Caves of the Vizhay River (Northern Urals). *Bulletin of Perm State University. Geology*. 2018;17(1):11-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.17.1.11>

19. Munroe J., Kimble K., Spötl C. et al. Cryogenic cave carbonate and implications for thawing permafrost at Winter Wonderland Cave, Utah, USA. *Scientific Reports*. 2021;11(1):6430. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85658-9>

20. Анисимова Н.П. *Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука; 1981. 153 с.

Anisimova N.P. *Cryohydrogeochemical features of the frozen zone*. Novosibirsk: Nauka; 1981. (In Russ.)

21. Фотиев С.М. *Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты)*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2009. 279 с.

Fotiyev S.M. *Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)*. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2009. (In Russ.)

22. Кононова Р.С. Гидрохимическая зональность подземных вод как один из показателей палеомерз-

лотных условий. II Международная конференция по мерзлотоведению. Доклады и сообщения. 1973;5:90–94.

Kononova R.S. Hydrochemical zoning of groundwater as one of the indicators of paleo-permafrost conditions. 2nd International Conference on Permafrost. Reports and communications. 1973;5:90–94. (In Russ.)

23. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Петров А.Ф., Шибаев С.В., Гриб Н.Н., Колодезников И.И. Возможности оценки сейсмической опасности природного и техногенного риска агломерации «Большого Якутска». Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018;26(4):16–29. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-16-29>

Imaev V.S., Imaeva L.P., Kozmin B.M., Petrov A.F., Shibaev S.V., Grib N.N., Kolodeznikov I.I. Possibilities of seismic danger estimation of natural and technogenic risk of «Yakutsk City» agglomeration. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2018;26(4):16–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2018-26-4-16-29>.

24. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности упакованной питьевой воды, включая природную минеральную воду» (ТР ЕАЭС 044/2017). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456090353>.

EAEU Technical Regulation on Safety of Packaged Potable Water Including Natural Mineral Water” (TR EAEU 044/2017). (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/456090353>

25. Saxena V., Ahmed S. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. Environmental Geology. 2001;40:1084–1087. <https://doi.org/10.1007/s002540100290>

26. Савенко А.В., Савенко В.С. Экспериментальное изучение мобилизации фтора из магматических горных пород. Геохимия. 2020;65(12):1245–1248. <https://doi.org/10.31857/S0016752520090101>

Savenko A.V., Savenko V.S. Experimental study of fluorine mobilization from igneous rocks. Geochemistry International. 2020;58(12):1386–1389. <https://doi.org/10.31857/S0016752520090101>

27. Посохов Е.В. По поводу статьи А.А. Алексеева «Фтор в акротермах». Геохимия. 1957;4:346–347.

Posokhov E.V. Regarding the article by A.A. Alekseev «Fluorine in acrotherms». Geochemistry International. 1957;4:346–347. (In Russ.)

28. Крайнов С.Р., Швеиц В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра; 1987. 237 с.

Krainov S.R., Shvets V.M. Geochemistry of technical and drinking groundwater. Moscow: Nedra; 1987. (In Russ.)

29. Павлова Н.А., Федорова С.В. Особенности распределения фтора в подмерзлотных водах Центральной Якутии. Криосфера Земли. 2022;XXVI(2):41–50 <https://doi.org/10.15372/KZ20220203>

Pavlova N.A., Fedorova S.V. Fluoride distribution in subpermafrost groundwater in Central Yakutia. Earth's Cryosphere, 2022;XXVI(2):34–41. <https://doi.org/10.15372/KZ20220203>

30. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2014. 189 с.

Anisimova N.P., Pavlova N.A. Hydrogeoghechemical studies of permafrost in Central Yakutia. Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”; 2014. 189 p. (In Russ)

31. Барышников Г.Я., Елисеев В.А. Фтористые минеральные воды Сибири и их бальнеологическая значимость. География и природопользование Сибири. 2009;11:19–24.

Baryshnikov G.Ya., Eliseev V.A. Fluorine mineral waters of Siberia and their balneological significance. Geography and nature management in Siberia. 2009;11:19–24. (In Russ)

32. Федорова С.В., Павлова Н.А. Особенности распределения лития в подмерзлотных водах Центральной Якутии. Подземная гидросфера: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием, 21–26 июня 2021. 2021:304–307 <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-304-307>

Fedorova S.V., Pavlova N.A. Distribution of lithium in subpermafrost waters in Central Yakutia. Underground hydrosphere: Proceedings of the 23rd National conference on groundwater in Eastern Russia with international participation, June 21–26, 2021. 2021:304–307. (In Russ.). <https://doi.org/10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-304-307>

33. Шестопалов В.М., Моисеева Н.П., Моисеев А.Ю. Минеральные воды Украины с повышенным содержанием бальнеологически активных микроэлементов. Геологический журнал. 2008;3:84–94.

Shestopalov V.M., Moiseeva N.P., Moiseev A.J. Mineral waters of Ukraine with the promoted maintenance of balneological active microelements. Geologicheskii zhurnal. 2008;3:84–94. (In Russ.)

34. Ерылкина Е.И., Обухова Л.М., Алясова А.В., Горшкова Т.Н., Французова В.П. Литий как фактор сопряжения нарушений минерального и углеводного гомеостаза при злокачественных новообразованиях эпителиальных тканей. Злокачественные опухоли. 2014;4(11):10–18. <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2014-4-10-18>

Erlykina E.I., Obukhova L.M., Alyasova A.V., Gorshkova T.N., Frantsuzeva V.P. Lithium as a coupling factor of mineral and glucose homeostasis disorders in malignant tumors of epithelial tissues. Malignant tumours. 2014;4(11):10–18 (In Russ). <https://doi.org/10.18027/2224-5057-2014-4-10-18>.

35. Беккер Р.А., Быков Ю.В. Препараты лития в психиатрии, наркологии и неврологии. Часть II. Биохимическая. Acta Biomedica Scientifica. 2019;4(2):80–100. <https://doi.org/10.29413/ABS.2019-4.2.13>

Bekker R.A., Bykov Yu.V. lithium preparations in psychiatry, addiction medicine and neurology. part II. biochemical mechanisms of its action. *Acta Biomedica Scientifica*. 2019;4(2):80–100. (In Russ). <https://doi.org/10.29413/ABS.2019-4.2.13>

36. Гальченко А.В., Шерстнева А.А. Условно-эссенциальные ультрамикроэлементы в питании вегетарианцев и веганов: никель, литий, ванадий, германий. *Микроэлементы в медицине*. 2021;22(2):3–16 <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-2-3-16>

Galchenko A.V., Sherstneva A.A. Conditionally essential ultra-trace elements in nutrition of vegetarians and vegans. Nickel, lithium, vanadium, germanium. *Trace Elements in Medicine*. 2021;22(2):3–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-2-3-16>

37. Григорьев Н.А. Распределение лития и литиевых максиминалов в верхней части континентальной коры. *Литосфера*. 2008;3:112–120.

Grigoriev N.A. Distribution of lithium and lithium maximineral in the upper part of the continental crust. *Lithosphere*. 2008;3:112–120. (In Russ.)

38. Васильев А.Н., Амелин В.Г. Исследование индикаторных свойств химических элементов, отвечающих особенностям геохимии сред формирования природных минеральных вод. *Георесурсы*. 2016;18(2):133–137. <https://doi.org/10.18599/grs.18.2.11>

Vasilyev A.N., Amelin V.G. Study of indicator properties of chemical elements, corresponding to geochemical environment of natural mineral water formation. *Georesursy=Georesources*. 2016;18(2):133–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.18.2.11>

Об авторах

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus AuthorID: 70878, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

ДАНЗАНОВА Марина Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, ResearcherID: AAC-8680-2019, Scopus AuthorID: 652603, e-mail: dmv_1585@mail.ru

ИВАНОВА Лена Дмитриевна, ведущий инженер, Scopus AuthorID: 63440, e-mail: ldivanova@mpi.ysn.ru

ЕФРЕМОВА Вилена Альбертовна, младший научный сотрудник, Scopus AuthorID: 1179502, e-mail: efremovavilena@gmail.com

About the authors

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus AuthorID: 70878, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

SHEPELEV, Viktor Vasilievich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, ResearcherID: P-8179-2018, Scopus AuthorID: 58611, e-mail: sheply@mpi.ysn.ru

DANZANOVA, Marina Viktorovna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, ResearcherID: AAC-8680-2019, Scopus AuthorID: 652603, e-mail: dmv_1585@mail.ru

IVANOVA, Lena Dmitrievna, Senior Technical Assistant, Scopus AuthorID: 63440, e-mail: ldivanova@mpi.ysn.ru

EFREMOVA, Vilena Albertovna, Junior Researcher, Scopus AuthorID: 1179502, e-mail: efremovavilena@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 18.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.05.2023

Принята к публикации / Accepted 23.05.2023

Оригинальная статья

Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии

М. И. Петров✉, А. Н. Федоров

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ pitrofv@yandex.ru

Аннотация

Проведен анализ данных по лесным пожарам и климатическим условиям в Центральной Якутии за период 2000–2020 гг. Целью исследования является определение роли климатических условий в образовании лесных пожаров активность которых в районе исследований в последние годы сильно повысилась. Лесные пожары могут привести к коренному преобразованию мерзлотных ландшафтов, их деградации. Площади ежегодно образующихся гарей заметно увеличились с 2000-х гг. В 2002 и 2011 гг. лесными пожарами были охвачены территории площадью более чем 1000000 га. Данная тенденция связана с климатическими изменениями. Так, в г. Якутск средняя годовая температура воздуха с 2000 по 2020 г. повысилась примерно на 2 °С. Вместе с тем в последние 20 лет наблюдается понижение суммы летних осадков. От температуры воздуха и количества осадков пожароопасного сезона зависит накопление под пологом лесов сухого горючего материала, т. е. будут ли созданы благоприятные условия для возникновения и распространения лесных пожаров на большие площади. Высокая пожарная активность образуется при очень высоких температурах воздуха, однако решающая преобладающая роль в этом принадлежит осадкам, вернее, их дефициту.

Ключевые слова: пожарная активность, пожароопасный сезон, температура воздуха, сумма осадков, количество пожаров, площадь гарей

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

Для цитирования: Петров М.И., Федоров А.Н. Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):248–260. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260>

Original article

Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia

M. I. Petrov✉, A. N. Fedorov

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ pitrofv@yandex.ru

Abstract

The activity of forest fires has greatly increased in recent years in Central Yakutia. This can lead to the radical transformation of permafrost landscapes and their degradation. This study aimed to determine the effects of climatic conditions on forest fire activity in this area. We analyzed data on air temperature and rainfall during the fire season from 2000 to 2020. The total annual burned areas have noticeably increased since the 2000s. Forest fires covered an area of more than a million hectares in 2002 and 2011. This trend was associated with climate change. The mean annual air temperature in Yakutsk increased by approximately 2 °C from 2000 to 2020, while the summer precipitation decreased. Both air temperature and the amount of precipitation during the fire season affect the accumulation of dry combustible material under the forest canopy, which determines whether favorable conditions are created for the spread of forest fires over large areas. We showed which climatic conditions are typical for periods of high and low fire activity. We analyzed the climatic conditions of certain years with the maximum and minimum burnt areas. Fire activity in the study area depends on the climatic conditions at the beginning of the fire season. High fire activity oc-

curs at very high air temperatures; however, the predominant role is the deficiency of precipitation. The study of the dependence of forest fire activity on climatic conditions is important for estimating the consequences caused by climate change in permafrost landscapes.

Keywords: fire activity, fire season, air temperature, amount of precipitation, number of fires, burnt areas

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment to the MPI SB RAS and financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Petrov M.I., Fedorov A.N. Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):248–260. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260>

Введение

Повышение активности лесных пожаров в последнее двадцатилетие наблюдается по всей бореальной зоне планеты, и данное явление привлекает внимание исследователей по всему миру [1–5]. Например, в работе А. Соджа и др. 2007 г. [5] приводятся сведения о том, что в Сибири средняя площадь ежегодных гарей в 1990-х гг. была примерно на 29 % больше, чем в 1980-е гг., и на 19 % больше, чем средний многолетний показатель за 47 лет.

Наша цель заключается в определении роли климатических условий в образовании лесных пожаров в районе исследования. Работа имеет большое значение для оценки влияния лесных пожаров как наиболее распространенного в районе исследования вида нарушения на мерзлотные ландшафты. Исследование зависимости активности лесных пожаров от климатических условий также является важным для оценки последствий, вызываемых в мерзлотных ландшафтах изменением климата.

Лесные пожары подразделяются на низовые и верховые. Наибольший урон ландшафту наносят верховые пожары. Они приводят к массовой гибели древостоя. В районах вечной мерзлоты такое нарушение может вызвать кардинальное изменение ландшафта. Низовые пожары подразделяют по степени интенсивности, зависящей, при равных климатических условиях, от количества и состава напочвенных горючих материалов, таких как подстилка, опад и травяно-кустарниковый ярус. По условиям и характеристикам горения выделяются два вида низовых пожаров: со слабой и средней интенсивностью [6] или с малой и средней интенсивностью огня по кромке [7].

Пожары в лесах таежной зоны являются одним из основных ландшафто- и средообразующих факторов. Их влияние не ограничивается только поверхностными условиями, а существенно затрагивает динамику криогенных процессов. Лесные пожары влияют на мерзлые грунты опосредованно путем уничтожения напочвенного и

растительного покровов, которые служат защитным слоем от нарушений, приводящих к деградации вечной мерзлоты. В результате уничтожения теплоизолирующего слоя между приземным слоем атмосферы и грунтами в мерзлотных ландшафтах увеличивается глубина сезонно-талого слоя, что может привести к началу протаивания подземных льдов – термокарсту. Данный процесс может сильно изменить ландшафтный облик территории [8].

В свою очередь, мерзлые грунты служат для растительности одним из источников водного питания в условиях чрезвычайно засушливого климата Центральной Якутии и являются необходимым условием существования лесной растительности в этом регионе [9].

Вблизи г. Якутск территория представляет собой мозаику из различных стадий сукцессии после пожаров и вырубок разных лет давности. Во время летних сезонов 2001 и 2002 гг. с феноменальной пожарной активностью большая часть территории вблизи г. Якутск, покрытой лесом, подверглась пожарам. Основными причинами возникновения лесных пожаров в Центральной Якутии исследователи считают как естественную грозовую активность, так и человеческую деятельность [10]. На рассматриваемой территории, составляющей 3,7 % площади всей Республики Саха (Якутия), проживает 31 % ее населения. Здесь находится свыше 50 % сельскохозяйственных угодий республики [11].

По данным информационной системы дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз), в 2000–2020 гг. в Центральной Якутии наблюдается высокая пожарная активность (см. ниже рис. 3). Это может быть связано с изменением современного климата в регионе.

В динамике средней годовой температуры воздуха в г. Якутск за 2000–2020 гг. можно выделить два периода повышения (рис. 1). По сравнению с 2000–2006 гг. температура воздуха в

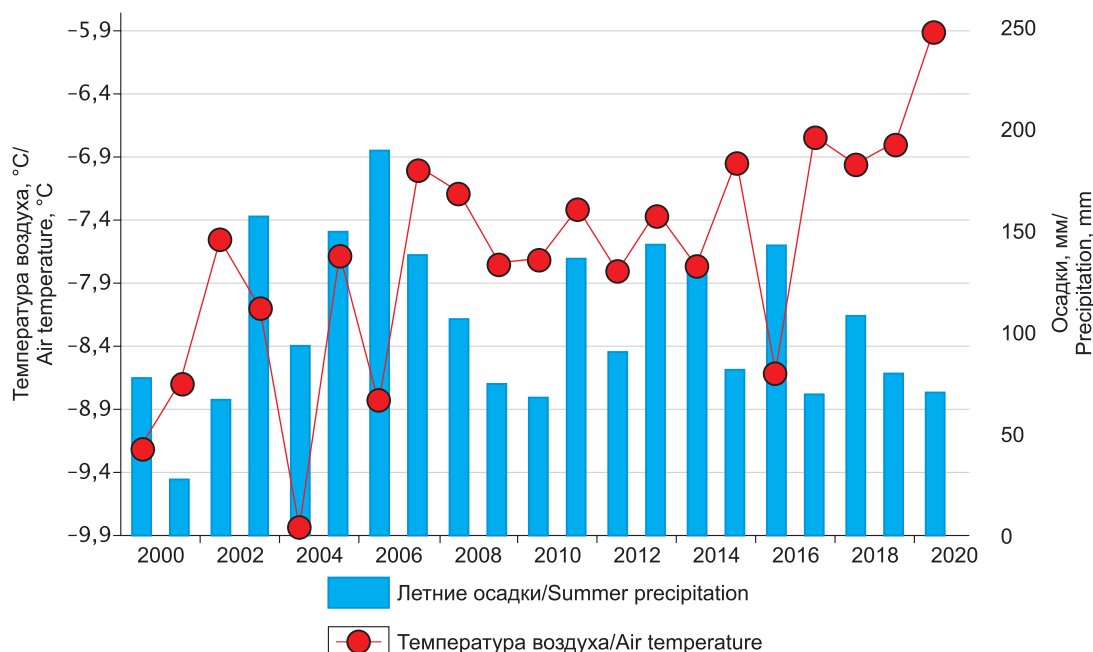


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха и количества летних осадков в г. Якутск за период исследования

Fig. 1. Changes in the mean annual air temperature and summer precipitation in Yakutsk over the study period

2007–2016 гг. в среднем повысилась на 1 °С, в 2017–2020 гг. еще на 1 °С. Таким образом, в г. Якутск средняя годовая температура воздуха с 2000 по 2020 г. повысилась примерно на 2 °С.

Межгодовая динамика количества осадков в летние месяцы имеет циклический характер (см. рис. 1). В течение первого десятилетия количество летних осадков изменяется с большой амплитудой, а во второй половине периода исследования варьирует в относительно небольших пределах.

Долгосрочное изменение средней месячной температуры воздуха в летние месяцы по данным метеостанции Якутск показывает повышение в июне и августе в среднем на 1,5 °С (рис. 2).

Материалы и методы

Данные по лесным пожарам и метеоданные

Температура воздуха и количество осадков за пожароопасный сезон (май–сентябрь) напрямую влияют на пожарную активность. Это факторы, воздействие которых на возникновение и распространение пожаров проявляется через небольшое время. Как высокая температура воздуха, так и отсутствие осадков или их малое количество приводят к накоплению под пологом леса массы сухого горючего материала, который вы-

ступает проводником и катализатором горения, тем самым многократно увеличивая вероятность возникновения пожаров и распространения их на большие площади [12]. В периоды без осадков также не происходит самогашения уже существующих пожаров. Анализ этих климатических данных вкупе с данными по пожарной активности за многолетний период может прояснить природу сезонной и межгодовой динамики активности лесных пожаров.

В данной работе мы рассматривали среднюю месячную температуру воздуха и сумму месячных осадков пожароопасного сезона (май–сентябрь) с 2000 по 2020 г. Использована база данных NOAA (www.ncdc.noaa.gov/ghcnm).

Мы находили средние значения обоих параметров за рассматриваемые диапазоны лет, чтобы определить изменение метеоусловий между периодами с разной пожарной (табл. 1). В табл. 1 в строках сгруппированы года с низкой и высокой пожарной активностью согласно рис. 3. По этим годам представлены средние многолетние количество и площадь пожаров, а также для всего рассматриваемого диапазона лет. По тем же периодам в табл. 1 представлены средние многолетние за 20 лет количество осадков и температура воздуха по месяцам пожароопасного се-

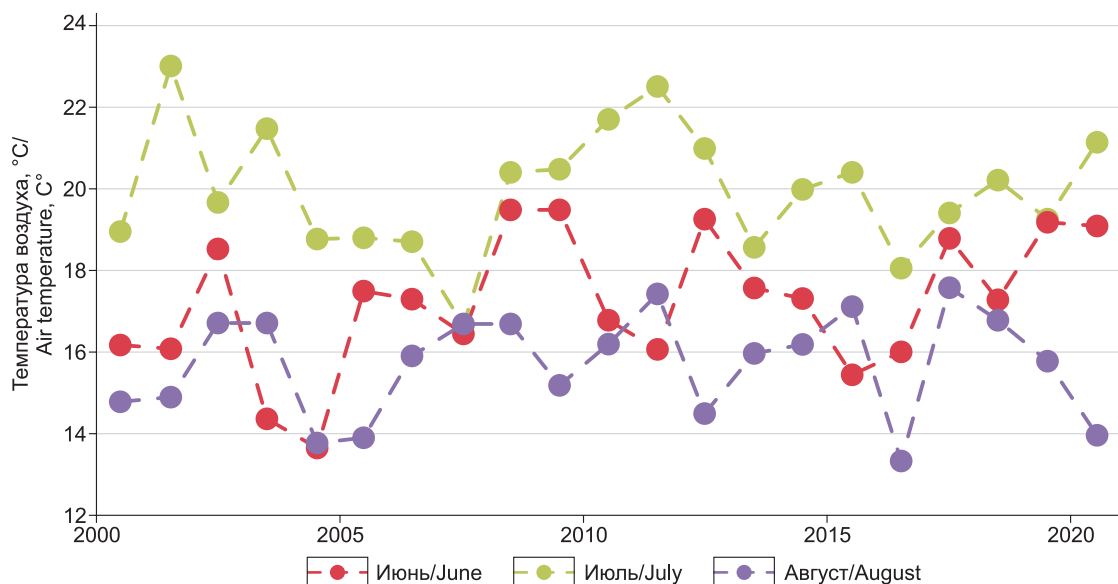


Рис. 2. Изменчивость средней месячной температуры воздуха в летние месяцы в г. Якутск за период исследования

Fig. 2. Variability of the mean monthly air temperature in the summer months in Yakutsk over the study period

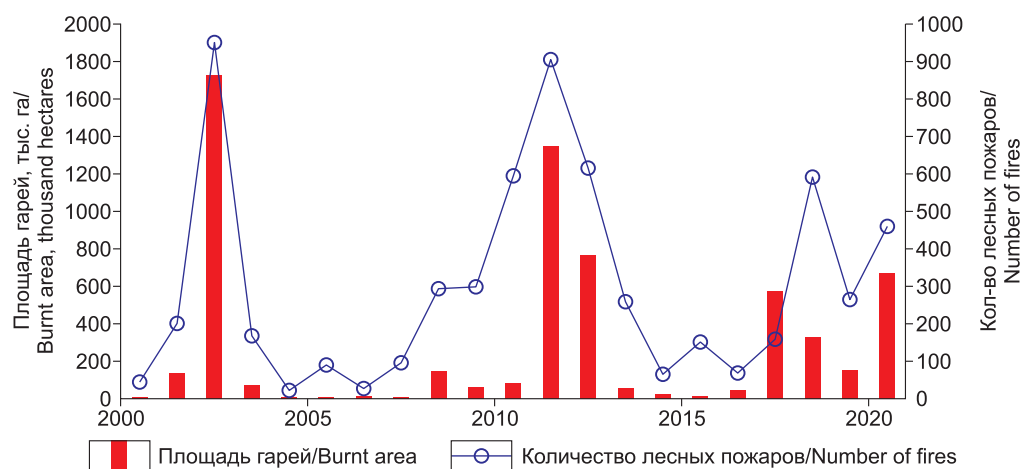


Рис. 3. Динамика лесных пожаров в Центральной Якутии (2000–2020 гг.)

Fig. 3. Dynamics of forest fires in Central Yakutia (2000–2020)

зона (май–сентябрь). Мы сравнили данные периодов с разной пожарной активностью и разница показателей пожарной активности и метеословий между этими периодами представлены в нижней строке табл. 1.

Кроме того, мы изучали метеословия определенных лет, с высокой и низкой пожарной активностью, и сопоставляли их со среднелетними значениями за весь период исследования (табл. 2 и 3). В рассматриваемом периоде были выделены по пять сезонов с наибольшими и наименьшими площадями гарей.

Данные по пожарной активности с 2000 по 2020 г. мы взяли из информационной системы дистанционного мониторинга Рослесхоза (ИСДМ-Рослесхоз), которая следит за пожарной обстановкой по всей России с помощью спутниковых снимков. Кроме того, мы используем для сравнения результаты нашей работы 2010 г., в которой был проанализирован период 1955–2009 гг. по данным наземного и авиамониторинга Департамента по лесным отношениям Республики Саха (Якутия) [13]. Количество и площади пожаров в гектарах в базах данных представля-



Рис. 4. Административная карта Центральной Якутии

Fig. 4. Administrative map of Central Yakutia

ются по лесничествам. Мы отобрали данные по лесничествам, контролирующим территорию восьми улусов в Центральной Якутии (рис. 4) и г. Якутск, и взяли суммарные значения.

Годы с высокой и низкой пожарной активностью мы выбрали исходя из площади, охваченной лесными пожарами. В данной работе мы придавали больше значения площади гарей, чем количеству лесных пожаров, так как именно площадь выгоревшей территории отражает величину нарушения, производимого лесными пожарами. Тем не менее, количество лесных пожаров тоже рассматривается в данной работе как неотъемлемая часть характеристики изучаемого явления.

Данные космического мониторинга намного превышают данные наземного и авиационного мониторинга, особенно по площади пожаров. Если сравнить данные из двух разных источников за 2000–2009 гг., то можно увидеть, что по годам с большими площадями пожаров (от нескольких десятков тысяч гектаров и больше) корреляция хорошая, за исключением 2002 г. Этот год по пожарной активности выходит из

ряда по обоим источникам, данные между ними различаются в разы. Площадь пожаров согласно ИСДМ-Рослесхоз больше таковой по данным департамента более чем в 5 раз. Есть разница между данными по 2001 г., который также был с высокой пожарной активностью. По годам с небольшими площадями пожаров (от нескольких тысяч гектаров и меньше) различие между данными из разных источников большое. Площадей пожаров согласно ИСДМ-Рослесхоз намного больше. По количеству пожаров корреляция в целом хорошая (сопоставимые данные), разница между данными из двух разных источников составляет в среднем несколько десятков случаев возгораний.

Район исследования

Район исследования в региональном плане относится к Лено-Амгинской аласной провинции Средней Сибири [14], которая отличается развитием бореальных среднетаежных, преимущественно лиственных лесов и аласного рельефа.

Таблица 1

Лесные пожары и климатические условия (2000–2020 гг.)

Table 1

Forest fires and climatic conditions (2000–2020)

Период/ Period	Кол-во лесных пожаров/ Number of fires	Площадь гарей, га/ Burnt area, ha	Осадки*, мм/ Precipitation, mm					Температура воздуха*, °C/ Air temperature, °C				
			Месяцы/Months									
			5	6	7	8	9	5	6	7	8	9
2000–2020	300	295716	21	24	41	41	27	8	17	20	16	7
2004–2007, 2013–2016 гг. с низкой пожарной активностью/ Low fire activity	97	19649	23	31	52	52	26	8	16	19	15	7
2000–2003, 2008–2012 и 2017–2020 с высокой пожарной активностью/ High fire activity	425	465604	19	19	34	34	28	8	18	21	16	6
Разница между годами с высокой и низкой пожарной активностью/ Difference between years of high and low fire activity	328	445955	–4	–12	–18	–18	2	0	2	2	1	–1

* Среднемноголетние значения.

* Average long-term values.

Таблица 2

Сезоны с высокой активностью лесных пожаров

Table 2

Seasons with high forest fire activity

Номер сезона/ Seasons number	Годы/ Years	Кол-во лесных пожаров/ Number of fires	Площадь гарей, га/ Burnt area, ha	Осадки*, мм/ Precipitation, mm					Температура воздуха*, °C/ Air temperature, °C				
				Месяцы/Months									
				5	6	7	8	9	5	6	7	8	9
1	2002	949	1730463	−14	−18	4	−25	−12	0	2	0	1	0
2	2011	902	1348448	−15	1	−1	31	−7	2	−1	3	1	−3
3	2012	616	758297	−11	−4	−21	10	−6	2	2	1	−2	1
4	2020	459	667715	−9	4	−7	−32	−21	1	2	1	−2	2
5	2017	158	573859	−7	−2	−19	−15	40	−1	2	−1	2	1
Средние отклонения/Average deviations				−11	−4	−9	−6	−1	1	1	1	0	0
2000–2020		300	295716	21	24	41	41	27	8	17	20	16	7

* Отклонения от среднемноголетних значений.

* Deviations from average long-term values.

В Центральной Якутии средняя годовая температура воздуха составляет $-10,3^{\circ}\text{C}$ при средней многолетней температуре самого холодного месяца $-43...-45^{\circ}\text{C}$ и самого теплого месяца $18-19^{\circ}\text{C}$. Продолжительность теплого периода (выше 0°C) составляет около 140 дней. Осадков

выпадает 200–220 мм, из них на теплый период (май–сентябрь) приходится 70–75 % годовой суммы [15].

В геоморфологическом отношении район исследования представляет собой эрозионно-аккумулятивную равнину с абсолютными высотами

Сезоны с низкой активностью лесных пожаров

Table 3

Seasons with low forest fire activity

Номер сезона/ Seasons number	Годы/ Years	Кол-во лесных пожаров/ Number of fires	Площадь гарей, га/ Burnt area, ha	Осадки*, мм/ Precipitation, mm					Температура воздуха*, °C/ Air temperature, °C				
				Месяцы /Months									
				5	6	7	8	9	5	6	7	8	9
16	2015	151	11336	9	26	−26	−24	−14	−1	−2	0	1	−1
17	2005	91	8426	14	−14	28	30	−13	1	1	−1	−2	2
18	2007	93	5244	1	15	22	−4	3	1	−1	−3	1	0
19	2000	43	3883	6	14	−12	−30	−6	0	−1	−1	−1	−2
20	2004	21	1770	−6	−2	−11	1	−8	−2	−3	−1	−2	0
Средние отклонения/Average deviations				5	8	0	−5	−8	0	−1	−1	−1	0
2000–2020		300	295716	21	24	41	41	27	8	17	20	16	7

* Отклонения от среднеемноголетних значений.

* Deviations from average long-term values.

200–220 м. Наиболее распространенными типами поверхностных отложений являются аллювий высоких террас р. Лена, комплекс склоновых образований, современные осадки временных водотоков и ручьев и высокольдистые отложения верхнеплейстоценового возраста, так называемый ледовый комплекс [16].

Рассматриваемая территория находится в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород с фоновыми значениями средних годовых температур $-1,5 \dots -3$ °C [17].

При изучении влияния лесных пожаров большое значение имеют такие характеристики леса, как тип древостоя, количество и состав опада и подстилки, составляющих горючий материал. Лиственница, например, имеет поверхностное расположение корневой системы, что ведет к интенсивному ветровалу после даже низовых пожаров.

В геоботаническом отношении район представляет типичную среднюю тайгу с преобладанием лиственничных брусничных лесов [18]. Коренным типом растительности является лиственничник коренной лимнасово-брусничный. Состав древостоя обычно 10Л, возраст – около 100–150 лет. Сомкнутость крон 0,6. Групповой березовый подрост средней густоты. Подлесок состоит из ивы, ольхи кустарниковой и шиповника иглистого. Травяно-кустарничковый покров (проективное покрытие – около 50 %) в основном составляют брусника, лимнас и осока

черноплодная. Моховый покров развит слабо, степень покрытия обычно меньше 10 %. В виде пятен на моховом покрове встречаются лишайники. Мощность лесной подстилки составляет около 3 см, дерново-почвенный слой – 15 см.

Региональной особенностью лиственничных лесов является их адаптация к засушливому климату и периодическому воздействию огневого фактора. В связи с этим, наряду с понятием пирогитности лиственницы Каяндера (так же как и сосны обыкновенной и лиственницы Гмелина), можно говорить о пирофильности сообществ [19], формируемых этой породой, как об эволюционно обусловленном адаптационном потенциале того или иного типа леса существовать в условиях постоянного воздействия лесных пожаров. Пирофильность брусничных лиственничников выражается в упрощенности вертикальной структуры древостоев (относительная редкостойность, преимущественная одноярусность древостоев, отсутствие подлеска), составом живого напочвенного покрова (преимущественно мономинантный состав, преобладание в травяно-кустарничковом покрове более огнестойких брусники и толокнянки), благоприятной трансформации гидроклиматических условий после пожара (тепловая мелиорация, улучшение условий влагообеспеченности за счет подтаивания мерзлоты) и т. д. [19] Таким образом, лесные пожары являются постоянно действующим экологическим фактором, обеспечивающим само

существование светлехвойной тайги и определяющим состав, структуру и функционирование формирующих ее лесных экосистем [20].

Результаты и обсуждение

Динамика лесных пожаров в Центральной Якутии в 2000–2020 гг.

Средние многолетние количество и площадь лесных пожаров в Центральной Якутии за период 2000–2020 гг. составляют 300 возгораний и около 296 тыс. га в год соответственно. В рассматриваемом ряду лет выделяются три периода высокой пожарной активности (см. рис. 3), как по площади пожаров, так и по их количеству, перемежаемые периодами «затишья» одинаковой продолжительности. Максимальная площадь лесных пожаров в 2002 г. составила более чем 1,7 млн га, а минимальная в 2004 – 1,17 тыс. га. В 2002 г. наибольшее значение за рассматриваемый период принимает и количество лесных пожаров.

С 2004 г. начался период пожарного «затишья», не в последнюю очередь обусловленный обильными осадками летом предыдущего года (см. рис. 1). В последующие годы ландшафты района исследования испытывали сильное переувлажнение [21], и пожарная активность оставалась низкой до 2008 г. Площадь лесных пожаров в этот период примерно в 40 раз меньше, чем средний показатель за весь изучаемый диапазон лет. В 2004 г. лесные пожары охватили территорию площадью всего 1770 га, что является наименьшим значением за весь период исследования. В эти годы с обильными осадками встречаются еще два сезона (2005 и 2007 гг.) с наименьшими площадями выгоревшей территории – 8426 и 5244 га соответственно. Количество пожаров в этот период также является наименьшим и составляет в 2004 г., например, всего 21 случай.

С 2008 по 2012 г. наблюдается второй период повышения пожарной активности по обоим параметрам (см. рис. 3). На этот период приходится два из пяти сезонов с наибольшей пожарной активностью. В 2011 и 2012 гг. площадь лесных пожаров составила около 1,3 млн и 758 тыс. га соответственно. Среднее число лесных пожаров в эти годы составляет 540, что почти в 2 раза больше многолетней величины. В 2011 г. было зафиксировано 902 пожара, что немногим меньше рекордного значения 2002 г. Также в 2010 и 2012 гг. количество пожаров больше 500.

С 2013 по 2016 г. имеет место быть второй период «затишья» с низкими показателями пожарной активности, которые, однако, превышают таковые первого периода. Среднее количество и площадь пожаров в эти годы составляют соответственно около 137 и 32 тыс. га против 58 и 7,5 тыс. га первого периода «затишья». Из этих сезонов 2015 г. входит в пятерку лет с наименьшими площадями пожаров за период исследования.

В конце рассматриваемого ряда лет пожарная активность опять повышается. В 2017–2020 гг. площади пожаров насчитывают несколько сот тысяч га. Количество пожаров в 2020 г. составляет порядка 500. 2017 и 2020 гг. входят в пятерку лет с наибольшей пожарной активностью.

Как видно, в 2000–2020 гг. пожарная активность имеет очень резкие перепады. Например, площадь пожаров по некоторым годам различается примерно в тысячу раз. Периоды «затишья», продолжительностью по 4 года чередуются резким скачком пожарной активности с катастрофическими последствиями. То есть прослеживается цикл продолжительностью 4 года. В конце текущего десятилетия сохраняется тенденция увеличения количества и площади лесных пожаров.

Чтобы выяснить причины таких изменений пожарной активности в районе исследования, мы провели анализ данных по лесным пожарам, сопоставив их с данными по климатическим условиям за рассматриваемый период.

Основные тенденции средних месячных осадков и температур воздуха

Данные по лесным пожарам и климатическим условиям в Центральной Якутии с 2000 по 2020 гг. представлены в табл. 1. Средние многолетние количество и площадь пожаров представлены отдельно по периодам низкой и высокой пожарной активности, а также для всего рассматриваемого диапазона лет.

Как видно, площадь гарей в сезоны с высокой пожарной активностью более чем в 20 раз больше, чем в сезоны с небольшими лесными пожарами, и почти в 2 раза больше, чем среднее многолетнее значение. Большое превышение есть и по количеству пожаров.

В табл. 1 также представлены средние многолетние по тем же периодам количество осадков и температура воздуха по месяцам пожароопасного сезона (май–сентябрь). Количество осадков

во все месяцы, кроме сентября, в сезоны с высокой пожарной активностью меньше, чем в годы с низкой пожарной активностью, причем разница возрастает по ходу сезона от –4 мм в мае до –18 мм в августе. Температура воздуха в периоды высокой пожарной активности выше, чем в сезоны с низкой пожарной активностью в течение трех летних месяцев. Наибольшие превышения в 2 °С наблюдаются для июня и июля. Как видно, в периоды с высокой пожарной активностью в летние месяцы наблюдается сочетание значительного сокращения осадков и повышения температуры воздуха по сравнению с годами с низкой пожарной активностью.

В периоды с более высокой пожарной активностью в диапазоне лет с 1955 по 2009 г. наблюдается сокращение осадков только в июне и августе [13]. Сезоны с большими пожарами, по данным космического мониторинга, в последнее двадцатилетие характеризуются дефицитом осадков во все месяцы кроме сентября.

*Сезоны с высокой активностью
лесных пожаров*

В рассматриваемом периоде были выделены пять сезонов с наибольшими площадями гарей. Для этих пяти сезонов были проанализированы отклонения количества осадков и температуры воздуха от средних многолетних значений (см. табл. 2, в табл. 2 и 3 приведены номера сезонов (годов) периода исследования 2000–2020 гг. по порядку ранжирования по площади гарей, образовавшихся в том или ином пожароопасном сезоне).

Высокая активность лесных пожаров наблюдается при теплой и сухой погоде. В табл. 2 отрицательные отклонения по осадкам и положительные отклонения по температуре воздуха выделены красным цветом. Доля таких отклонений в общей массе показателей преобладает. Средние по всем пяти сезонам отклонения по температуре воздуха принимают положительные значения во все месяцы. В среднем их значение равно 1 °С. Отклонения больше 2 °С встречаются в эти годы в основном в пределах трех первых месяцев пожароопасного сезона.

Средние за пять лет отклонения по осадкам принимают отрицательные значения во все месяцы пожароопасного сезона. Наибольший дефицит осадков характерен для мая и июля. Отрицательные отклонения по осадкам со значением больше –20 мм наблюдаются в эти годы

в пределах летнего периода. Сочетания отрицательных отклонений по осадкам и положительных отклонений по температуре воздуха в пределах рассматриваемых годов встречаются одинаково часто (по три) во все месяцы пожароопасного сезона, кроме августа.

Сезон с наибольшей пожарной активностью, 2002 г., характеризуется дефицитом осадков во все месяцы, кроме июля, близкого по условиям к многолетней норме. Самыми засушливыми были июнь и август. В эти же месяцы наблюдаются положительные отклонения по температуре величиной 2 и 1 °С соответственно (см. табл. 2). И это стечение обстоятельств – дефицита влаги и высокой температуры, вызвало наибольшие нарушения в ландшафтах Центральной Якутии от лесных пожаров.

В 2011 г. пожароопасный сезон начался в условиях засушливого и теплого мая, что, конечно же, способствовало сохранению и перерастанию обычных для этого времени возгораний от сельхозпалов и выездов на природу в крупные лесные пожары. Июньские условия в этот год соответствовали многолетней норме. Осадков, решающим образом повлиявших бы на пожарную ситуацию в регионе, не выпало. Июль был очень жарким и с небольшим дефицитом осадков по сравнению со средним многолетним значением. Следует отметить, что наибольшее положительное отклонение температуры воздуха по всем пяти годам наблюдается в июле 2011 г. В оставшиеся 2 месяца сезона погодные условия смягчились, в августе выпало осадков на 30 мм больше нормы, а сентябрь был холоднее, чем обычно, на 3 °С. Однако, это не помешало лесным пожарам в этот год охватить вторую по величине площадь за период наблюдения. Это говорит о том, что установление высокой пожарной активности не всегда зависит только от климатических условий.

В третьем сезоне из этого списка, в 2012 г., в четырех месяцах из пяти пожароопасного периода, кроме августа, засушливые условия совпадают с потеплением. В среднем по всем пяти годам такие сочетания также характерны для всех месяцев, кроме августа.

В отличие от сезонов с высокой пожарной активностью с 1955 по 2009 г. по данным Департамента по лесным отношениям РС(Я) [13], годы с большими пожарами в 2000–2020 гг. по данным ИСДМ-Рослесхоз характеризуются namно-

го обширными площадями пожаров. Согласно последнему, в 2018 г. сгорело около 300 тыс. га территории и это шестой показатель за рассматриваемый период. Тогда как, согласно наземному и авиационному мониторингу, примерно такая же площадь сгорела в 2002 г., рекордном по пожарной активности. По количеству пожаров данные по обоим источникам сопоставимые. Средние климатические условия по представленным годам наибольшей пожарной активности в обоих случаях примерно одинаковые.

*Сезоны с низкой активностью
лесных пожаров*

Были проанализированы климатические условия пяти сезонов с наименьшими площадями гарей (см. табл. 3). Лесными пожарами в эти годы были охвачены небольшие площади, исчисляемые тысячами гектаров, в отличие от сезонов с высокой пожарной активностью, в которых счет шел на сотни тысяч и миллионы гектаров.

Низкая активность лесных пожаров должна быть при большом количестве осадков и низкой температуре воздуха. В течение трех летних месяцев температура воздуха в эти годы в среднем на 1 градус меньше средних многолетних значений. По осадкам картина не такая однозначная. В среднем за пять сезонов только май и июнь более дождливые, чем обычно. Это могло послужить основным климатическим фактором для формирования условий с низкой активностью лесных пожаров.

Сочетания более обильных осадков с более низкими температурами воздуха по сравнению с условиями всего периода наблюдения с 2000 по 2020 г. характерны в среднем по всем пяти сезонам в июне.

Отрицательные отклонения по температуре воздуха со значением 2° и более наблюдаются во все годы. В 2000 г. на протяжении всего пожароопасного сезона, за исключением мая, температура воздуха была ниже, чем многолетняя норма. В 2004 г., с наименьшим количеством возгораний и площадью пожаров, наблюдается самое значительное понижение температуры воздуха теплого времени в данном ряду лет. В то же время, в эти два года с наименьшей пожарной активностью осадков выпало в среднем меньше нормы. Из этого можно сделать вывод, что в эти годы температура воздуха, а точнее ее низкие значения в течение пожароопасного сезона, имела большую роль, чем количество осадков, в установлении соответствующей пожарной ситу-

ации в регионе. Другими словами, пожарная ситуация не зависела от осадков.

Несколько иную картину мы видим в показателях по трем другим годам. В осадках в пределах летнего сезона встречаются отклонения от многолетней нормы со значением 20 мм и больше. В 2007 г. количество осадков было выше нормы. Только в августе осадки были чуть меньше нормы. Количество осадков в 2005 г. больше многолетней нормы в течение трех месяцев из пяти теплого периода, однако, в эти три месяца показатель отличается большими значениями (см. табл. 3). В то же время, нельзя говорить о похолодании пожароопасного сезона в эти годы. Температура воздуха была меньше нормы только в течение двух месяцев. В данном случае, как видно, сдерживающий эффект количества осадков по отношению к лесным пожарам был определяющим.

Сочетание относительно большего количества осадков и низкой температуры воздуха начала пожароопасного сезона, особенно июня, в 2015 г. не позволило широко распространиться лесным пожарам, несмотря на то что условия последующих месяцев теплого периода этого года благоприятствовали усилению пожарной активности.

Следует также отметить, что в рассматриваемые годы в среднем сентябрь был более засушливым, чем обычно, и с температурами воздуха, близкими к многолетней норме, но это не привело, как можно было бы предположить, к увеличению пожарной активности за счет поддержания позднелетних и возникновения осенних пожаров. Это может говорить о том, что сентябрьские условия в данном случае не имеют большого значения.

Если количество пожаров в сезоны с низкой пожарной активностью, указанные как в табл. 3, так и в нашей предыдущей публикации 2010 г. [13], имеет сопоставимые величины, то площади пожаров в первом случае в десятки раз больше, чем во втором.

Если средние значения температуры воздуха по представленным годам низкой пожарной активности в обоих случаях ниже многолетних значений на 1 °С, то по осадкам картина различается. Сезоны с низкой пожарной активностью в период 1955–2009 гг. характеризовались в целом однозначным профицитом осадков, особенно июня и августа (отклонения от многолетних значений на 20 и 15 мм соответственно). Такого явного преобладания количества осадков в годы

с небольшими пожарами над многолетней нормой в табл. 3 мы не видим.

Опорным исследованием для данной статьи и нашей предыдущей публикации [13] является работа Х. Хайасаки 2008 г. [3], где он рассматривает пожарную активность и климатические условия в Республике Саха (Якутия) в 1955–2005 гг. С его одним из основных выводов о том, что ключевым фактором усиления пожарной активности в нашей республике является тенденция повышения средних температур воздуха мая и июня и уменьшения весенних осадков с 1990-х гг., мы полностью согласны, и это подтверждается нашими обновленными данными. Более того, основной вывод нашей статьи состоит в том, что усиление пожарной активности в Центральной Якутии с начала 2000-х гг. происходит за счет раннелетних пожаров. Это можно видеть в анализе климатических условий сезонов с высокой и низкой пожарной активностью. Например, обильные осадки в мае и июне обусловили низкую пожарную активность пяти сезонов с самыми небольшими площадями выгоревшей территории за период исследования.

Однако, во всем исследовании Х. Хайасаки 2008 г. подчеркивается преобладающее значение количества осадков, тогда как мы приходим к выводу, что в установлении сезонов с низкой пожарной активностью, согласно данным нашего периода исследования 2000–2020 гг., температура воздуха имеет большее значение, чем сумма осадков.

Х. Хайасака и др. в своей статье 2019 г. [4] рассматривают зависимость пожарной активности от движения воздушных масс. Безусловно, пожарная активность сильно зависит от того, какая воздушная масса, теплая или холодная, расположилась в данное время на территории, а также от ветровой деятельности, однако, мы в нашей статье рассматриваем влияние на активность лесных пожаров именно двух климатических параметров, т. е. количества осадков и температуры воздуха.

В.В. Протопопова и Л.П. Габышева [22] разделяют пожароопасный сезон на три периода: весенний, летний и осенний. И.П. Щербаков и др. [12] выделяли раннелетние и позднелетние пожары. Согласно нашим результатам, пожарная активность в районе исследования больше зависит от весенних или раннелетних климатических условий. Другими словами, в последнее время в годы с высокой пожарной активностью

эту высокую пожарную активность обеспечиваят раннелетние пожары.

Л.П. Габышева и А.П. Исаев [23] отмечают не такую плохую корреляцию между количеством осадков пожароопасного сезона и частотой возникновения пожаров в Центральной Якутии. Тогда как, согласно нашему исследованию, количество осадков пожароопасного сезона имеет определяющее значение при установлении сезонов с высокой пожарной активностью. Для сезонов с низкой пожарной активностью роль температуры воздуха возрастает.

Выводы

Анализ данных Министерства охраны природы, природопользования и лесного хозяйства Республики Саха (Якутия) с более чем полувековым периодом отчетливо показывает, что активность лесных пожаров в Центральной Якутии сильно повысилась с 2000-х гг. Средняя площадь ежегодных гарей в 2000–2009 гг. почти в три раза больше, чем до 2000 г. Наблюдаемое в текущем десятилетии повышение средних годовых и летних температур воздуха, а также понижение максимумов летних осадков должно было привести к увеличению числа и площади лесных пожаров в Центральной Якутии. И тому подтверждением служат группы сезонов с феноменально высокой пожарной активностью, которые на протяжении 2000–2020 гг. образуют три пика, разделяемые периодами относительного пожарного спокойствия. Таким образом, в Центральной Якутии периоды с высокой пожарной активностью в 21 веке стали происходить чаще, чем в предыдущем временном отрезке с 1955 г., т. е. промежутки между периодами высокой пожарной активности стали меньше. Эти два разных типа сезонов с высокой и низкой пожарной активностью значительно различаются, как следовало бы ожидать, по метеоусловиям. В периоды пиков намного меньше осадков и выше температура воздуха трех летних месяцев. Большое значение имеют условия мая, июня и июля.

В то же время, анализ метеоусловий сезонов с наибольшей и наименьшей активностью лесных пожаров с 2000 по 2020 г. показал, что крупные лесные пожары образуются на фоне теплой и сухой погоды первых трех месяцев пожароопасного сезона. Низкая же пожарная активность устанавливается в некоторые годы при преобладающей роли низких температур воздуха, а в другие – большого количества осадков. При

этом большое значение имеют условия первых двух месяцев пожароопасного сезона.

Другими словами, прогноз высокой пожарной активности определяется в большей мере осадками, точнее их малым количеством, особенно в начале пожароопасного сезона (первые три месяца). А низкая пожарная активность устанавливается при возросшей роли температуры воздуха.

Список литературы / References

1. Дальбинов А.А., Исаев А.П. Реконструкция лесных пожаров в XX веке (на примере Намского, Хангаласского и Якутского лесхозов). Исаев А.П. (ред.) *Лесные исследования в Якутии: итоги, состояние и перспективы. Т.1: Мерзлотное лесоведение и лесоводство. Лесная экология: Материалы научно-практической конференции. г. Якутск, 23–24 ноября 2006 г.* Якутск: Изд-во ЯГУ; 2006:100–103.

Dalbinov A.A., Isaev A.P. Reconstruction of forest fires in the 20th century (Namsky, Khangalassky and Yakutsky forestries). *Forest research in Yakutia: results, state and prospects. Volume 1: Permafrost forest science and forestry. Forest ecology: Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Yakutsk, November 23–24, 2006.* Yakutsk: YSU Publishing House; 2006:100–103 (In Russ.)

2. Groisman P.Ya., Sherstyukov B.G., Razuvaev V.N., Knight R.W., Enloe J.G., Stroumentova N.S., Whitfield P.H., Førland E., Hannsen-Bauer I., Tuomenvirta H., Aleksandersson H., Mescherskaya A.V., Karl T.R. Potential forest fire danger over Northern Eurasia: changes during the 20th century. *Global and Planetary Change*. 2007;56(3-4):371–386. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.029>

3. Hayasaka H. Climate changes in tropical and boreal forests and their relation with recent large-scale forest fires. *Tropical rain forest and boreal forest disturbance and their affects on global warming: Proceedings of the international workshop, Ulaanbaatar, Mongolia, August 29–30, 2007.* Ulaanbaatar: National University of Mongolia; 2007:77–95.

4. Hayasaka H., Yamazaki K., Naito D. Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests. *Polar Science*. 2019;22:100472. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.07.002>

5. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Stuart Chapin III F., Stackhouse Jr. P.W. Climate-induced boreal forest change: predictions versus current observations. *Global and Planetary Change*. 2007; 56(3-4):274–296. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.028>

6. Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии. *Вопросы лесной пирологии: Сборник научных статей.* Курбатский Н.П., Конев Э.В. (ред.). Красноярск: ИЛиД; 1972:171–231.

Kurbatsky N.P. Terminology of forest pyrology. *Questions of forest pyrology: Proceedings.* Krasnoyarsk: Institute of Forest; 1972:171–230 (In Russ.)

7. Вонский С.М. *Интенсивность огня низовых лесных пожаров и ее практическое значение.* Л.: ЛенНИИЛХ; 1957. 52 с.

Vonsky S.M. *Intensity of ground forest fires and its practical significance.* Leningrad: LenNIILH; 1957. 52 p. (In Russ.)

8. Федоров А.Н., Мачимура Т., Герасимов Е.Ю., Петров М.И. и др. Влияние пожаров на мерзлотные ландшафты в Центральной Якутии. *Наука и образование.* 2008(4):64–67.

Fedorov A.N., Machimura T., Gerasimov E.Yu., Petrov M.I. et al. Influence of fires on permafrost landscapes in Central Yakutia. *Nauka i obrazovanie.* 2008(4):64–67. (In Russ.)

9. Sugimoto A., Naito D., Yanagisawa N., Ichiyana-gi K., Kurita N., Kubota J., Ohata T., Kotake T., Maximov T.C., Fedorov A.N., 2003. Characteristics of soil moisture in permafrost observed in east siberian taiga with stable isotopes of water. *Hydrological Processes*. 2002;17(6):1073–1092. <https://doi.org/10.1002/hyp.1180>

10. Соловьев В.С., Козлов В.И., Муллаяров В.А. *Дистанционный мониторинг лесных пожаров и гроз в Якутии.* Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2009. 108 с.

Soloviev V.S., Kozlov V.I., Mullayarov V.A. *Remote monitoring of forest fires and thunderstorms in Yakutia.* Yakutsk: Publishing House of YSC SB RAS; 2009. 108 p. (In Russ.)

11. Бекетов Н.В. *Региональная организация общества (географические аспекты социально-экономического комплексобразования).* Якутск: Изд-во ЯГУ; 1996. 159 с.

Beketov N.V. *Regional organization of society (geographical aspects of socio-economic complex formation).* Yakutsk: Publishing House of YSU; 1996. 159 p. (In Russ.)

12. Щербаков И.П., Забелин О.Ф., Карпель Б.А. и др. *Лесные пожары в Якутии и их влияние на природу леса.* Новосибирск: Наука; 1979. 226 с.

Shcherbakov I.P., Zabelin O.F., Karpel B.A. et al. *Forest fires in Yakutia and their influence on the nature of the forest.* Novosibirsk: Nauka; 1979. 226 p. (In Russ.)

13. Петров М.И. Влияние метеорологических условий на лесные пожары в Центральной Якутии. Григорьев М.Н., Алексеева О.И. (ред.). *Геокриология – прошлое, настоящее, будущее = The past, present and future of geocryology: Материалы Всероссийского научного молодежного форума с международным участием, посвященного 50-летию Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, 2–16 августа 2010 г.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН; 2010:119–123.

Petrov M.I. Influence of meteorological conditions on forest fires in Central Yakutia. Grigoriev M.N., Alekseeva O.I. (ed.). *The past, present and future of geocryol-*

ogy: *Proceedings of the All-Russian Scientific Youth Forum with International Participation, Dedicated to the 50th Anniversary of the Foundation of the Permafrost Institute. P.I. Melnikov SB RAS, Yakutsk, August 2–16, 2010*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute, SB RAS; 201:119–123. (In Russ.)

14. Федоров А.Н. *Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования*. Якутск: ИМЗ; 1991. 140 с.

Fedorov A.N. *Permafrost landscapes of Yakutia: Classification and Mapping Approach*. Yakutsk: Permafrost Institute; 1991. 140 p. (In Russ.)

15. Гаврилова М.К. *Климат в Центральной Якутии*. Якутск: Якутское кн. изд-во; 1973. 120 с.

Gavrilova M.K. *Climate in Central Yakutia*. Yakutsk: Yakutian Publishing House, 1973. 120 p. (In Russ.)

16. Соловьев П.А. *Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья*. М.: Изд-во АН СССР; 1959. 144 с.

Soloviev P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena-Amga interfluvium*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1959. 144 p. (In Russ.)

17. Иванов М.С. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины*. Новосибирск: Наука; 1984. 125 с.

Ivanov M.S. *Cryogenic structure of the Quaternary deposits of the Lena-Aldan depression*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 125 p. (In Russ.)

18. Уткин А.И. *Леса Центральной Якутии*. М.: Наука; 1965. 208 с.

Utkin A.I. *Forests of Central Yakutia*. Moscow: Nauka; 1965. 208 p. (In Russ.)

19. Исаев А.П. Устойчивость лесов криолитозоны к антропогенным факторам. *Успехи современного естествознания*. 2012;(11-1):41–43.

Isaev A.P. Sustainable forests intrapermafrost to anthropogenic factors. *Advances in current natural sciences*. 2012;(11-1):41–43. (In Russ.)

20. Исаев А.П. *Естественная и антропогенная динамика лиственных лесов криолитозоны (на примере Якутии)*: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Якутск. 2011. 51с.

Isaev A.P. *Natural and anthropogenic dynamics of larch forests in the permafrost zone (on the example of Yakutia)*: Abstr. ... Diss. Dr. Sci., Yakutsk. 2011. (In Russ.). 51 p.

21. Iijima Y., Fedorov A.N., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Maximov T.C., Ohata T. Abrupt increases in soil temperatures following increased precipitation in a permafrost region, Central Lena river basin, Russia. *Permafrost. Periglac. Process*. 2010;21:30–41. <https://doi.org/10.1002/ppp.662>

22. Протопопова В.В., Габышева Л.П. Возникновение лесных пожаров в Центральной Якутии в зависимости от условий погоды. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(4):513–517.

Protopopova V.V., Gabysheva L.P. Occurrence of forest fires in Central Yakutia depending on weather conditions. *Modern problems of science and education*. 2015(4): 513–517. (In Russ.)

23. Gabysheva L.P., Isaev A.P. Forest fires impact on microclimatic and soil conditions in the forests of cryolithic zone (Yakutia, North-Eastern Russia). *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.)*. 2015;6:96–111. <https://doi.org/10.15372/SJFS20150609>

Об авторах

ПЕТРОВ Марат Иванович, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0001-7893-352X>, ResearcherID: HKW-5535-2023, e-mail: pitrofv@yandex.ru

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

About the authors

PETROV, Marat Ivanovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7893-352X>, ResearcherID: HKW-5535-2023, e-mail: pitrofv@yandex.ru

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

Поступила в редакцию / Submitted 21.10.2022

Поступила после рецензирования / Revised 17.03.2023

Принята к публикации / Accepted 05.04.2023

Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия)

Р. Г. Сысолятин✉, М. Н. Железняк

Институт мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉robertseesaw@gmail.com

Аннотация

В статье публикуются результаты геокриологических исследований на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов Алданского щита. Начиная с 1996 г. в ходе экспедиционных исследований получен фактический материал, позволяющий определить температурный режим, мощность и характер распространения многолетнемерзлых пород, а также впервые описать геокриологические условия труднодоступного региона. Режимными и разовыми измерениями установлено, что наиболее низкие температуры (до $-3,4^{\circ}\text{C}$) характерны для маревых ландшафтов, наиболее высокие ($-0,5^{\circ}\text{C}$) для хорошо дренируемых и водораздельных участков. По результатам измерений в глубоких скважинах, обработки информации о процессе проходки глубоких геологоразведочных скважин и анализа данных о теплофизических свойствах горных пород впервые оценена мощность многолетнемерзлой толщи, которая варьирует в диапазоне от 40 до 280 м. Составленные схематические мерзлотно-геологические разрезы и геокриологические карты территории могут использоваться для технико-экономического обоснования при разработке планов промышленного освоения территории.

Ключевые слова: температура горных пород, Токариканский грабен, Гувилгринский грабен, мощность многолетнемерзлой толщи, теплопроводность пород

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (номер проекта АААА-А20-120122290035-5).

Для цитирования: Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токариканского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):261–274. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>

Original article

Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia)

R. G. Sysolyatin✉, M. N. Zheleznyak

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

✉robertseesaw@gmail.com

Abstract

This article presents the results of geocryological studies of the Tokarikan and Guvilgra grabens of the Aldan Shield. Expedition research on the hard-to-rich region since 1996 has allowed us to determine the temperature regime, thickness, and nature of permafrost rock distribution and characterize its geocryological conditions for the first time. We have established that the lowest temperatures (up to -3.4°C) are characteristic of peatmoss bog landscapes, whereas the highest (-0.5°C) are for well-drained and watershed areas. The results of the measurements in deep wells, information on the process of drilling deep exploration wells, and the analysis of data on the thermophysical properties of rocks allowed us to estimate a permafrost thickness capacity that varied in the range of 40–260 m. The presented schematic permafrost and geological cross-sections and geocryological condition maps can be used to plan the industrial development of the territory.

Keywords: ground temperature, Tokarikan graben, Guvilgra graben, permafrost thickness, Rock thermal conductivity

Funding. This study was carried out within the budgeted project of the Melnikov Permafrost Institute: “North-East of Russia thermal field and permafrost. Formation features and dynamics” (number АААА-А20-120122290035-5).

For citation: Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):261–274. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>

Введение

Мезозойская угольная формация Гонамского бассейна представлена Токариканским и Гувилгринским грабенами, а также Ытымджинской впадиной. Последняя до недавнего времени в геокриологическом отношении являлась «белым пятном» и не имела характеристики геокриологических условий, подкрепленной фактическим материалом, а первые имели лишь единичные упоминания в литературе [1,2].

Практически все структуры Алданского щита, выполненные мезозойскими отложениями, обладают потенциалом для промышленного освоения угольных месторождений [3]. В связи с этим понимание особенностей залегания, распространения, мощности и динамики изменений температурного режима многолетнемерзлых пород является важным условием для рационального, безопасного, рентабельного освоения месторождений полезных ископаемых.

Удаленность от основных мест проживания населения, а также труднодоступность исследуемой территории обусловили крайне низкую степень изученности природных условий. В 1960-х годах на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов проводилась геологическая съемка, а в 1986–1999 гг. – детальные геологоразведочные работы по оценке перспективности угледобычи. Однако, специальных работ по оценке геокриологических условий в эти периоды не проводилось, а информация о последних работах не нашла отражение в последней редакции государственной геологической карты [4]. Геокриологическая характеристика этих структур приводилась по аналогии с Чульманской впадиной [5]. Впервые получить информацию о параметрах мерзлой толщи удалось в 1996 и 1999 гг. при проведении сотрудниками ИМЗ СО РАН и ЯГУ мерзлотно-геотермических экспедиционных работ на территории Токариканского и Гувилгринского грабенов. Уже первые полученные данные указали на различие геокриологических условий структур Гонамского бассейна от Чульманской впадины.

На основании анализа опубликованных, фондовых и вновь полученных данных нами выявлены особенности распространения многолетнемерзлых пород, получены фактические дан-

ные о мощности и температуре мерзлой толщи, охарактеризованы теплофизические свойства горных пород центральной части территории Южно-Якутского угольного бассейна.

Материалы и методы исследований

Возможность выполнения геотермических исследований на территории исследуемых грабенов появилась вследствие выполнения ЮЯГРЭ геологоразведочных работ для расширения и уточнения запасов Южно-Якутского угольного бассейна на территории Гонамского угленосного района. Материалы, положенные в основу настоящей публикации, получены в результате инициативных экспедиций сотрудников лаборатории геотермии Института мерзлотоведения СО РАН с 1996 по 2019 г., с использованием следующих полевых и аналитических методов:

1. Геотермические измерения в скважинах с восстановившимся после бурения температурным режимом.
2. Режимные температурные наблюдения в слое годовых теплооборотов и в слое сезонного оттаивания.
3. Анализ материалов стандартного термокалотажа.
4. Обработка информации о глубине вскрытия и установившемся уровне подземных вод, интервалах потери промывочной жидкости в процессе бурения скважин, разбуривания ледяных пробок в скважинах после длительного простоя.
5. Лабораторные определения теплофизических свойств горных пород.
6. Расчет эффективной теплопроводности литологических комплексов.
7. Пространственное моделирование изменения теплового потока и залегания подошвы мерзлых пород.

Широкое применение в рамках данной работы косвенных и аналитических методов обусловлено ограниченным количеством имеющейся информации и значительной площадью (более 4200 км²) исследуемой территории.

Методика проведения геотермических измерений с помощью терморезисторных датчиков широко применяется в различных областях науки, хорошо известна и на данный момент остается основным методом получения информации о

температуре горных пород. Подробно специфика проведения геотермических измерений описана в работе В.Т. Балобаева с соавт. [6]. Точность измерений используемой аппаратуры при соблюдении требований лежит в пределах $\pm 0,05$ °C.

Режимные наблюдения за температурой пород проводились с помощью автоматической измерительной аппаратуры (логгер) фирмы «OnSet Нобо» в слое сезонного оттаивания и в слое годовых теплооборотов. Заявленная производителем точность измерений варьирует в пределах $\pm 0,25$ °C в диапазоне температур от -40 до 100 °C. Преимущество использования логгеров заключается в возможности автономного получения детальной информации о температурном режиме среды.

Расчет *мощности мерзлой толщи* проводился с допущением квазистационарного распределения температур с глубины 30–40 м и ниже. Выражение, описывающее данную зависимость, широко используется и в геотермии [7]:

$$Z = T \frac{\lambda}{q} + h,$$

где Z – расчетная мощность ММТ, м; T – температура на глубине 30–40 м, °C; λ – эффективная теплопроводность пород, Вт/м·°C; q – плотность внутриземного теплового потока Вт/м²; h – подосва годовых колебаний температуры пород, м.

Распределение *теплового потока* во многом определяется рельефом и для территории структур этот параметр рассчитан по выражению

$$q = q_0 \cdot \cos \alpha,$$

где q_0 – исходная величина внутриземного теплового потока для района, Вт/(м·°C); $\cos \alpha$ – косинус угла наклона поверхности [8].

Для определения *эффективной теплопроводности* литологических комплексов использовались эталонные значения теплопроводности для образцов, слагающих разрез, а также процентное соотношение пород в составе каждого литологического комплекса. Расчет проводился по выражению, предложенному Р.И. Гаврильевым [9]:

$$\lambda_{эфф} = \frac{I}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{\lambda_i} \right)}, \quad (1)$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -го отдельного слоя (пачки пород) с учетом их полного влагонасыщения, Вт/(м · К); h_i – мощность i -го слоя, м; I – совокупная мощность слоев стратиграфического комплекса (свита, горизонт), м.

Комплекс *косвенных сведений* о наличии и мощности мерзлых пород на территории грабенов был получен из буровых журналов и отчетов о геологоразведочных работах. Согласно приводимой в буровых журналах и фондовой литературе информации, разбуривание ледяных пробок происходило почти во всех скважинах (ок. 71 скв.), а интервал глубин повторной проходки составил от 25 до 200 м. Информация о *термокаротаже* скважин позволила оценить градиент изменения температур пород и положение границы мерзлых/талых пород [10, 11].

Основным подходом для картирования геокриологических условий (мощности, температуры и сплошности мерзлых пород) стало использование *метода ключевых участков* по полученной мерзлотно-геотермической информации и дешифрированию состава растительности по спутниковым снимкам с привязкой полевых описаний видового состава. Согласно проведенным маршрутным описаниям, видовой состав растительности Токариканского и Гувилгринского грабенов достаточно скуден. Характеристика температурного режима проведена по результатам разовых и режимных измерений температур в скважинах, приуроченных к выделяемым ландшафтам. Подробно *методика пространственного моделирования* на примере Ытымджинской впадины представлена в работе Sysolyatin R. [12].

Краткая характеристика природных условий района исследований

Токариканский и Гувилгринский грабены расположены в центральной части Алданского щита, имеют субширотную ориентированность и схожую геометрию с шириной в осевой части 30–50 км и протяженностью около 80–120 км (рис. 1). Границы структур четко определяются по взбросовым тектоническим нарушениям, оконтуривающим грабены с севера и юга. В их пределах наблюдается пологоувалистый рельеф с уклонами склонов до 10°. Пологовывуклые плоские водоразделы здесь имеют ограниченное распространение и полностью покрыты лесом. Грабены разделяет горный хребет Алданского массива с абсолютными отметками вершин до 1800 м.

По рельефу центральная и восточная части Токариканского грабена напоминают слабохолмистую равнину с отдельными невысокими (50–100 м) округлыми вершинами и пологими, за-

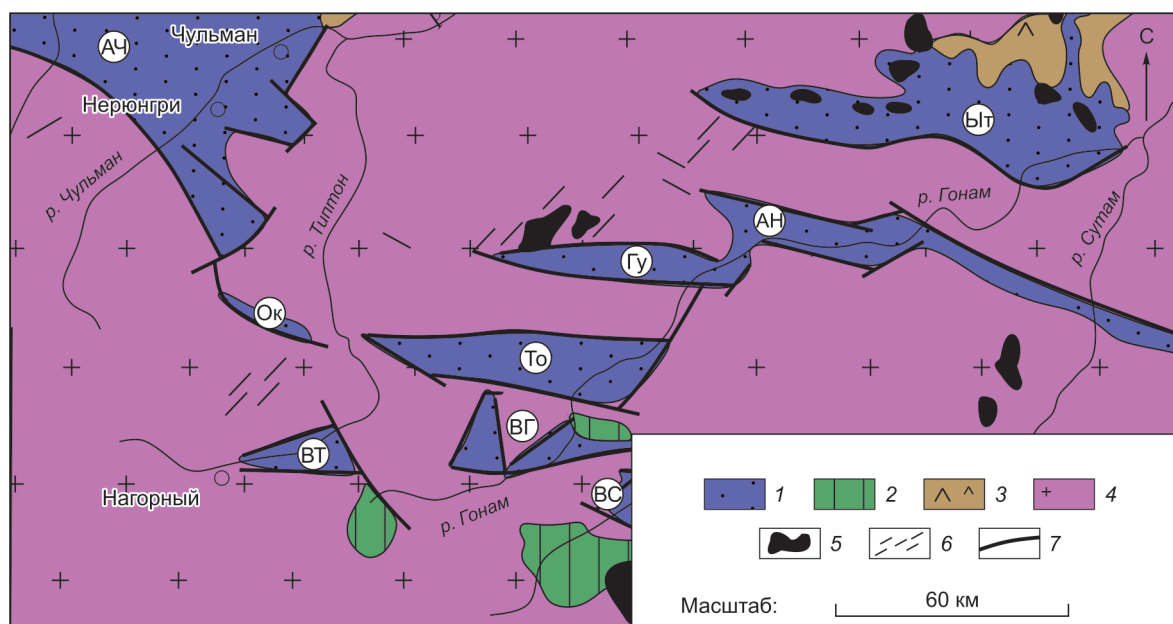


Рис. 1. Схематическая геологическая карта центральной части Алданского щита [13].

1 – геологические структуры, выполненные мезозойскими отложениями; 2 – нижнемеловые эффузивно-туфогенные образования (карауловская свита); 3 – терригенно-карбонатные отложения верхнего протерозоя и нижнего кембрия; 4 – архейские кристаллические породы фундамента; 5 – позднемезозойские интрузии; 6 – позднемезозойские дайки; 7 – разломы. Мезозойские структуры: впадины – Алдано-Чульманская (АЧ), Ытымджинская (ЫТ); грабены – Токарикский (То), Гувилгринский (Гу), Окурданский (Ох), Верхне-Тимптонский (ВТ), Верхне-Гонамский (ВГ), Верхне-Сутамский (ВС), Атугей-Нуямский (АН)

Fig. 1. Schematic geological map of the central part of the Aldan Shield [13].

1 – geological structures made by Mesozoic deposits; 2 – Lower Cretaceous effusive-tufogenic formations (Karaulov Formation); 3 – Upper Proterozoic and Lower Cambrian terrigenous-carbonate deposits; 4 – Archean crystalline basement rocks; 5 – Late Mesozoic intrusions; 6 – Late Mesozoic dikes; 7 – faults.

Mesozoic structures: depressions – Aldan-Chulman (АЧ), Ytymdzhinsky (ЫТ); grabens – Tokarikansky (То), Guvilgrinsky (Гу), Okurdansky (Ох), Upper-Timpton (ВТ), Upper-Gonamsky (ВГ), Upper-Sutamsky (ВС), Atugei-Nuyamsky (АН)

росшими лесом склонами. Основная площадь грабена характеризуется абсолютными отметками 820–870 м с увеличением высот в южном направлении до 900–930 м. Долины рек и ручьев слабо врезаны, плохо выражены, русла сильно меандрируют (рис. 2).

Гувилгринский грабен расположен севернее Токарикского и разделяет среднегорные хребты Гонамского угленосного района (рис. 3). Абсолютные отметки поверхности на большей части территории не превышают 900 м. Рельеф территории холмистый, увалистый с перепадами 20–30 м, поверхность сплошь заболочена, лишь местами покрыта лесом.

На фоне относительно пологого рельефа грабенов выделяются холмистые вершины, сложенные более прочными конгломератами и песчаниками. Локально имеющиеся западины, достигающие 3–4 м глубины, заболочены или заняты озерами.

Встречающиеся мерзлотные формы (булгунихи, полигональные грунты, солифлюкционные террасы и оплывины) свидетельствуют о протекании криогенных экзогенных процессов. Речные долины в пределах грабенов не имеют четких очертаний и сливаются с их холмисто-увалистой поверхностью. Реки имеют неглубокие русла, меандрируя среди болот и старичных озер.

В связи с суровыми климатическими условиями, бедными почвами и наличием многолетней мерзлоты растительный мир района довольно скуден и однообразен. На водораздельных поверхностях наблюдается типичная для севера растительность: карликовая березка, густой кедровый стланник на пологих склонах водоразделов, редкие лиственницы, перемежающиеся с кустарником, сосна средней крупности. Пойменные и первые надпойменные террасы в большинстве случаев характеризуются сильной степенью заболоченности. Резко различающийся фитоценоз

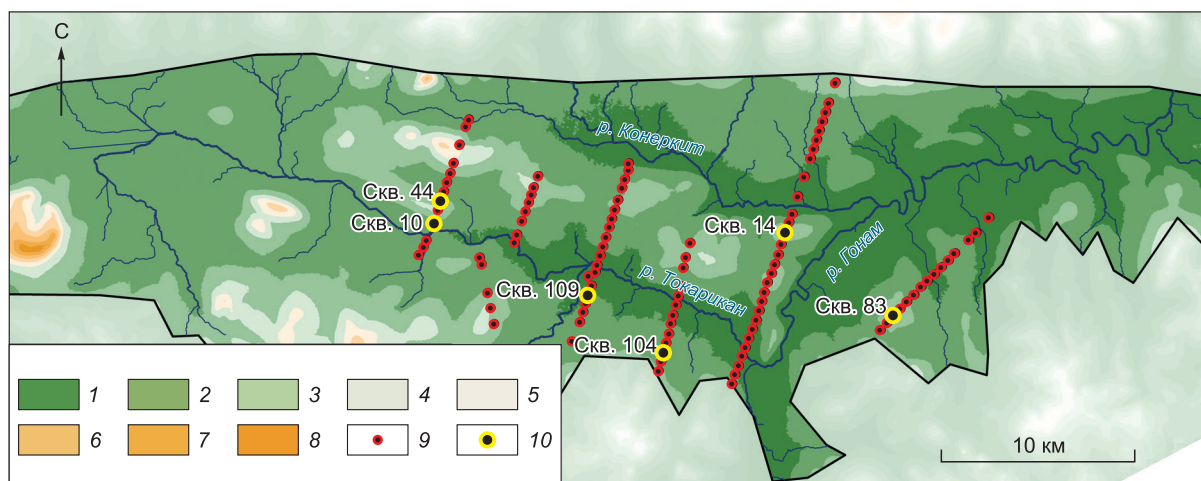


Рис. 2. Орографическая схема Токарикианского грабена, расположение буровых профилей и термометрических скважин. 1–8 – абс. отметки (1 – менее 800 м; 2 – от 800 до 850 м; 3 – от 850 до 900 м; 4 – от 900 до 950 м; 5 – от 950 до 1000 м; 6 – от 1000 до 1050 м; 7 – от 1050 до 1100 м; 8 – более 1100 м), 9 – скважины разведочного бурения, 10 – места проведения геотермических измерений в скважинах

Fig. 2. Tokarikan graben surface topography, boreholes path and point of geothermal measurements. 1–8 – altitude (1 – less than 800 m; 2 – from 800 to 850 m; 3 – from 850 to 900 m; 4 – from 900 to 950 m; 5 – from 950 to 1000 m; 6 – from 1000 to 1050 m; 7 – from 1050 to 1100 m; 8 – up to 1100 m), 9 – geology prospecting boreholes, 10 – location of the boreholes where geothermal measurements were carried out

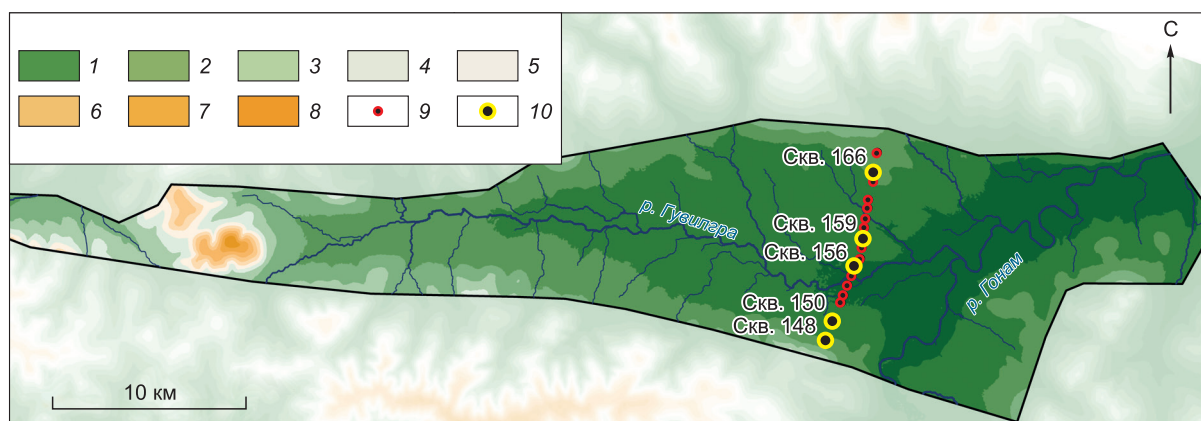


Рис. 3. Орографическая схема Гувилгринской впадины, расположение буровых профилей и термометрических скважин. 1–8 – абс. отметки (1 – менее 750 м; 2 – от 750 до 800 м; 3 – от 800 до 850 м; 4 – от 850 до 900 м; 5 – от 900 до 950 м; 6 – от 950 до 1000 м; 7 – от 1000 до 1100 м; 8 – более 1100 м), 9 – скважины разведочного бурения, 10 – места проведения геотермических измерений в скважинах

Fig. 3. Guvilgra graben surface topography, boreholes path and point of geothermal measurements. 1–8 – altitude (1 – less than 750 m; 2 – from 750 to 800 m; 3 – from 800 to 850 m; 4 – from 850 to 900 m; 5 – from 900 to 950 m; 6 – from 950 to 1000 m; 7 – from 1000 to 1100 m; 8 – up to 1100 m), 9 – geology prospecting boreholes, 10 – location of the boreholes where geothermal measurements were carried out

представлен на пойменных островах-останцах р. Гоним с теплолюбивым видовым составом деревьев (тополь душистый, ива-чозения, ель сибирская) высотой до 30 м.

В геологическом отношении грабены выполнены последовательным переслаиванием юрских песчаников, аргиллитов и алевролитов. Угленос-

ность отдельных свит достигает 8–9 % [13]. Отличительными признаками являются: преимущественно песчанистый состав с большой мощностью пачек и развитием в отложениях горизонтальной и пологоволнистой слоистости; незначительные по мощности, с хорошей выдержанностью простирания глинисто-алевролитовые пачки. Ве-

Таблица 1

**Вещественный состав юрских литологических комплексов (%)
для грабенов Гонамского бассейна и их теплопроводность**

Table 1

**Composition and effective thermal conductivity of Mesozoic bedrock complex
of the Tokarikan and Guvilgra grabens**

Породы	Тектоническая структура и свита							Эталонная теплопроводность пород в мерзлом состоянии, Вт/(м·К)
	Токариканский грабен				Гувилгринский грабен			
	J _{1uh}	J _{2dr}	J _{3kb}	J _{3br}	J _{1uh}	J _{2dr}	J _{3kb}	
Угли	0,3	1,1	2,8	3,2	—	2,2	2,3	0,9—1,1
Аргиллиты	0,4	1,0	0,3	0,4	0,3	0,5	0,7	2,0
Алевролиты мелкозернистые	10,1	24,3	12,9	14,0	6,5	20,0	17,8	2,40
Алевролиты крупнозернистые	10,2	15,6	12,0	16,2	6,5	18,2	13,0	
Песчаники мелкозернистые	25,1	39,8	34,0	41,6	32,3	39,8	26,1	2,95
Песчаники среднезернистые	34,9	17,0	35,0	20,8	42,9	13,2	35,5	2,99
Песчаники крупнозернистые	12,0	1,2	2,8	3,3	8,8	6,1	4,6	3,2
Гравелиты	3,0	—	0,2	0,5	1,2	—	—	н/д
Конгломераты	4,0	—	—	—	1,5	—	—	2,02 (в талом)
Расчетная эффективная кондуктивная теплопроводность свиты, Вт/(м·К)	2,78	2,65	2,67	2,63	2,88	2,62	2,66	

вещественный состав основных свит приведен в табл. 1.

В пределах рассматриваемых структур режимных метеонаблюдений не проводилось. Ближайшие стационарные метеостанции расположены в 100 км на запад (м/с Чульман) и в 230 км на восток (м/с Токо). Для региона характерно:

1. Постепенное увеличение суровости климата в восточном направлении, в основном выражающееся в понижении среднегодовой температуры [2].

2. Широкое развитие зимних орографических инверсий температур приземного воздуха [14].

3. Повышение среднемесячной (до 2,7 °С) и среднегодовой (до 1,6 °С) температуры воздуха за последние 50 лет.

Основные климатические параметры приведены по трем ближайшим метеостанциям (табл. 2).

Температура многолетнемерзлых пород

В пределах исследуемой территории сотрудниками лаборатории геотермии ИМЗ СО РАН из более чем 70 обследованных скважин разовые геотермические измерения удалось провести в 10 скважинах до глубины от 6 до 68 м (рис. 4). Установлено, что температуры пород на глубине годовых теплооборотов (20–30 м) варьируют от

–2,5 до –1,2 °С. На глубинах 15 м они изменяются от –1,7 до –1,2 °С; 10 м – от –2,4 до –1,7; 7 м – от –3,0 до –1,8; 5 м – от –3,4 до –0,3 °С.

Температуры пород на пологих склонах северной экспозиции (см. рис. 4, скважины 109, 148, 150) характеризуются минимальными значениями, а к верхней части склона южной экспозиции (скважины 44, 156, 166) приурочены максимальные значения температур, до –0,5 °С. Надпойменные террасы чаще всего заболочены, температура пород здесь варьирует от –1,8 до –1,4 °С (скважины 10, 156). Мерзлые породы на плоских водоразделах (скважины 83, 14) имеют температуру от –2,1 до –1,1 °С. Максимальная глубина проведения геометрических измерений в выстоявших после бурения скважинах составила 56 м (для Токариканского грабена) и 68 м (для Гувилгринского грабена), где температура соответственно составила –1,1 и –1,4 °С соответственно. Для Гувилгринского грабена величина геотермического градиента по данным термокаротажа варьирует от 1,12 до 2,55 °С/100 м, что подтверждают прямые измерения в скв. 148, где градиент в диапазоне глубин 30–68 м составил 1,6 °С/100 м.

В целом температура пород в Гувилгринском грабене ниже, чем в Токариканском. Это обуслов-

Таблица 2

Некоторые метеорологические параметры по метеостанциям региона за 1971–2020 гг.

Table 2

Climate condition by weather stations (1971–2020)

Параметр		Чульман	Нагорный	Токо
Абс. отметка, м		858	842	825
Элемент рельефа		Плоский водораздел	Северный склон	Надпойменная терраса
Температура воздуха, °С	Средняя годовая	–6,9	–7,0	–10,3
	Абс. минимум (дата)	–53,1 (10.01.1979)	–52,6 (12.01.1994)	–61,1 (21.01.1996)
	Абс. максимум (дата)	33,8 (18.07.2011)	34,5 (26.05.2017)	34,6 (29.07.2001)
Влажность воздуха, %		73	72	75
Средняя скорость ветра, м/с		2,6	2,0	0,7
Облачность общая, ср. балл		7,5	6,5	6,2
Среднее количество осадков за год, мм		581	605	450
Количество дней со снежным покровом		202–247	171–242	186–245
Максимальная высота снежного покрова за год, см		27–121	10–198	32–100
Средняя максимальная высота снежного покрова, см		55	42	60
Плотность снега в течение года, г/см ³		0,12–0,22	0,15–0,25	0,14–0,26
Средняя плотность снега в лесу при наибольшей декадной высоте, г/см ³		0,17	0,19	0,19

лено более интенсивной заболоченностью территории, более северным ее положением и, вероятно, более суровыми климатическими условиями. В силу специфики теплообмена для маревых ландшафтов, когда мох-сфагнум подстилается льдистыми торфяными отложениями, в Гувилгринском грабене формируются наиболее низкие температуры пород, со среднегодовой температурой до $-3,4^{\circ}\text{C}$ в отдельных случаях.

Мощность многолетнемерзлой толщи

Из-за отсутствия на территории исследований геотермических измерений в скважинах до глубины нулевой изотермы применялся комплекс аналитических и косвенных методов определения мощности многолетнемерзлой толщи (ММТ).

Для Токарикского грабена установлено, что мощность ММТ в большей части варьирует от 120 до 210 м (рис. 5). При этом на водоразделах с абсолютными отметками 900–930 м подошва ММТ залегает на глубинах от 120 до 160 м и определяется условиями теплообмена на поверхности и теплофизическими свойствами разреза. В значительно более широком диапазоне (от 60 до 210 м) мощность ММТ отмечается на маре-

вых участках. На склонах мощность ММТ, как правило, не превышает 180–200 м для северных экспозиций, сокращаясь до 70–100 м на дренированных склонах южной экспозиции и низкогорных водоразделах. Талики сквозного типа могут быть развиты под озерами глубиной от 2,0 м и шириной 200 м и более, а также в долинах рек Токарик, Гувилгра, Гонам. Под небольшими мелкими озерами развиты несквозные талики. В обрамлении грабена прогнозируется уменьшение мощности ММТ, обусловленное близостью высокотемпературных водоносных горизонтов в метаморфических, кристаллических образованиях архей-раннепротерозойского фундамента.

Для Гувилгринского грабена мощность ММТ на подавляющей части территории варьирует от 150 до 230–250 м (рис. 6), а в отдельных случаях может достигать 260–280 м. Максимальная глубина промерзания характерна именно для центральной части впадины, где на площади развития мощной толщи (до 2,5 м) биогенных отложений распространены низкотемпературные многолетнемерзлые породы. По направлению к бортам

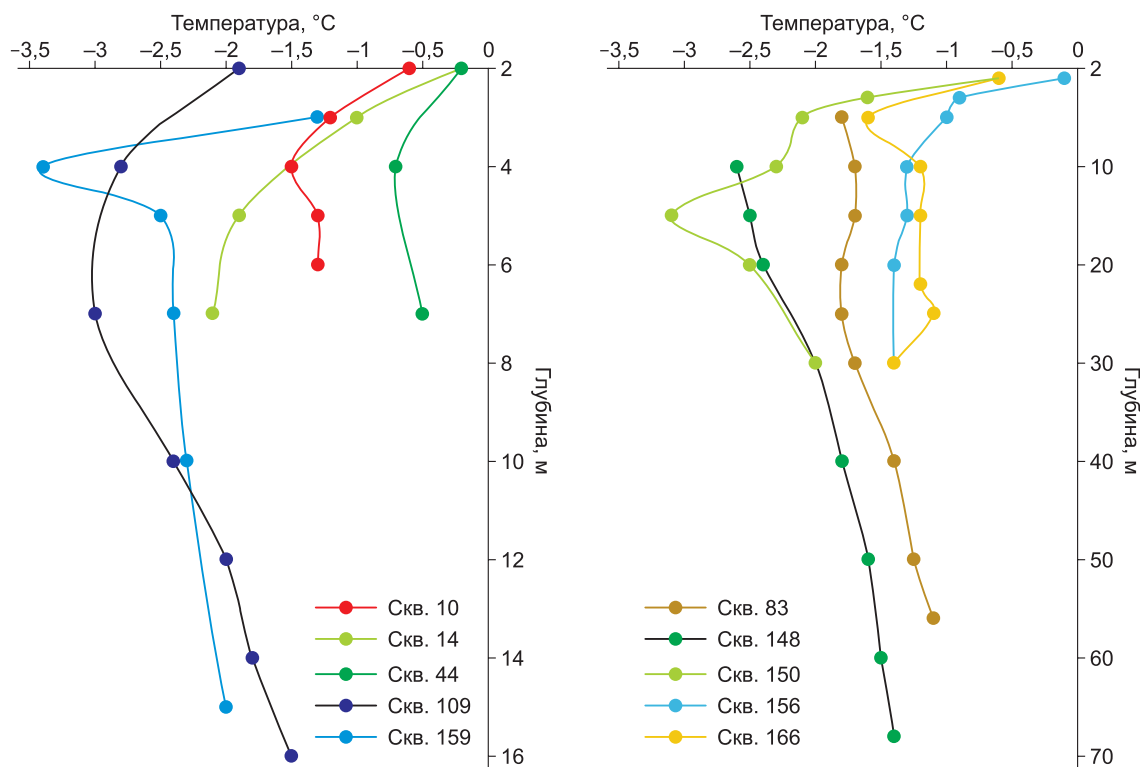


Рис. 4. Температура пород в Токарикском (скв. 10–109) и Гувилгринском (скв. 148–166) грабенах на середину августа. Положение скважин в рельефе приведено в тексте

Fig. 4. Permafrost temperatures in the Tokarikan (BH 10–109) and the Guvigra (BH 148–166) grabens in the middle of August. Site locations are described in the text

впадины мощность ММТ постепенно уменьшается, а температура пород повышается.

Наличие выходящих на поверхность песчано-гравийно-щебенистых отложений в прирусловых зонах, как правило, не закрепленных растительностью в пределах долины р. Гонам, с большой вероятностью свидетельствует о талом состоянии аллювиальной толщи и близком залегании подстилающих коренных пород.

Для Гувилгринского грабена характерен высокий уровень залегания подземных вод. В ходе обследования бурового профиля наблюдались изливающиеся скважины, в зимнее время формирующие небольшие наледы.

Обсуждение результатов

На основе имеющихся данных было выполнено мерзлотно-ландшафтное районирование и пространственное моделирование температуры и мощности ММТ для территории Токарикского и Гувилгринского грабенов. Составлены схематические карты распространения и мощности многолетнемерзлых пород (рис. 7, 8).

Для грабенов Гонамского бассейна характерен сплошной тип распространения ММП с локальным наличием сквозных и несквозных таликов. Формирование геокриологической обстановки в этих межгорных структурах находится под воздействием схожих геолого-структурных, орографических, микроклиматических и гидрогеологических факторов.

Наиболее мягкими геокриологическими условиями, иногда с неглубоким залеганием подошвы ММТ и высокими отрицательными температурами характеризуется Токарикский грабен. Достаточно однообразный в геоморфологическом отношении Гувилгринский грабен не обладает пестротой геокриологических условий. Мощность ММТ здесь колеблется в узких пределах. Различия геокриологических условий между грабенами в первую очередь обусловлены географическим положением, степенью расчлененности рельефа и ареалом развития маревого ландшафта.

Выше было отмечено, что попытки характеристики геокриологических условий территории

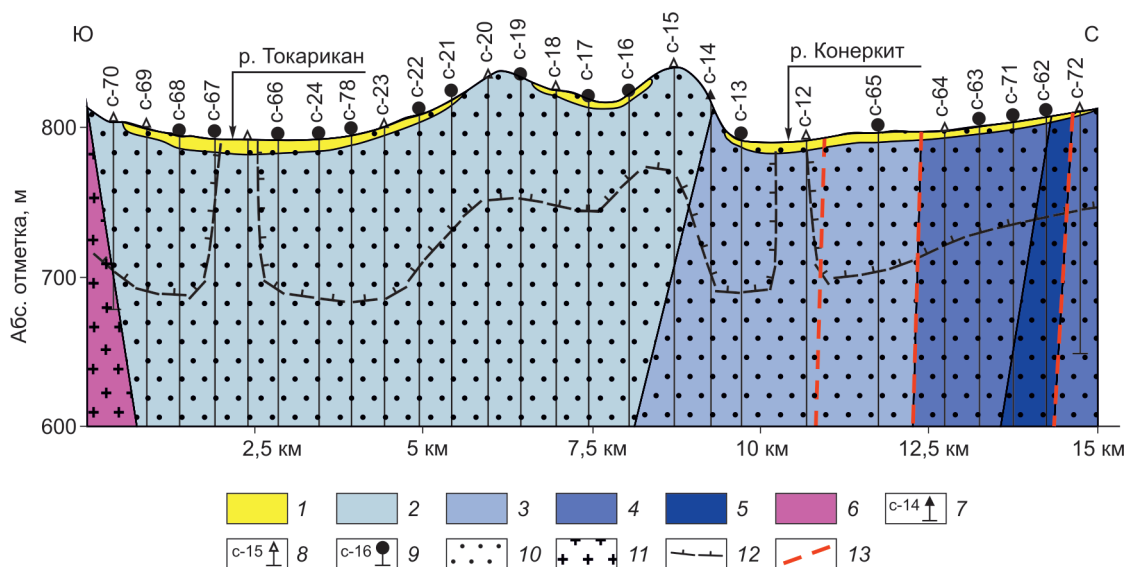


Рис. 5. Мерзлотно-геологический разрез через центральную часть Токарикского грабена.

1 – четвертичные отложения; 2 – беркакитская свита (J_3br); 3 – кабактинская свита (J_3kb); 4 – дурайская свита (J_2dr); 5 – юхтинская свита (J_1uh); 6 – архейские породы; 7 – скважины с геотермическими измерениями; 8 – скважины с термокаротажной информацией; 9 – скважины с информацией об уровне подземных вод или интервале разбуривания ледяных пробок; 10 – осадочные горные породы (песчаники, алевролиты); 11 – кристаллические горные породы; 12 – нижняя граница многолетнемерзлой толщи; 13 – тектонические нарушения

Fig. 5. Permafrost cross-section through central part of the Tokarikan graben.

1 – Quaternary deposits; 2 – berkakit series (J_3br); 3 – kabakta series (J_3kb); 4 – durai series (J_2dr); 5 – yukhta series (J_1uh); 6 – Archean rocks; 7 – measured boreholes; 8 – logging boreholes; 9 – boreholes with ground water level or ice plug interval information; 10 – sediments rocks (sandstones, siltstones); 11 – metamorphic and ingenious rocks; 12 – base of permafrost; 13 – tectonic fault

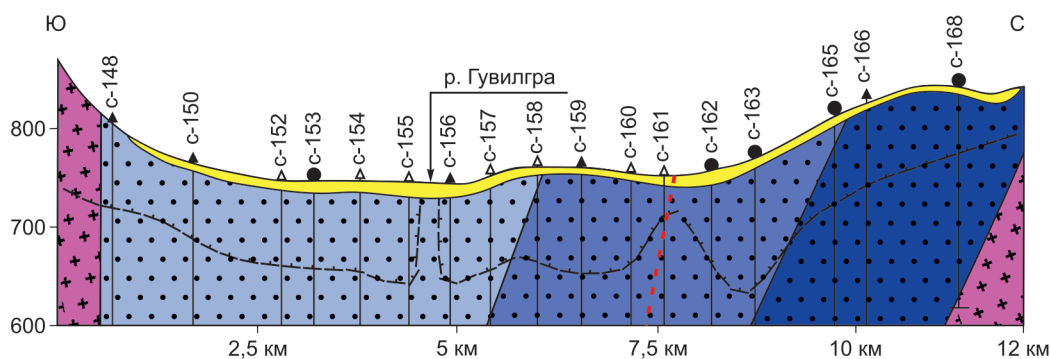


Рис. 6. Мерзлотно-геологический разрез через центральную часть Гувилгринского грабена. Усл. обозн. см. на рис. 5

Fig. 6. Permafrost cross section through central part of the Guvigra graben. See symbols in Fig. 5

структур Гонамского бассейна на основе закономерностей, установленных в Алдано-Чульманской впадине, предпринимались неоднократно [5, 15, 16]. Следует отметить, что до 1996 г. на этот район не имелось фактических данных о параметрах мощности ММТ и температуре горных пород. Появившиеся в 1970-х годах ряд мерзлотных карт [17], охватывающих рассматриваемую территорию, основывались на аналогии геокриологических условий, установленных в

Чульманской впадине. В качестве главных аргументов приводились следующие факты (по С.Ф. Хруцкому) [15]):

1. Общность тектонической позиции. Все структуры развиты параллельно широтному Южно-Якутскому глубинному разлому и сопряжены с ним крупным разломом регионального характера.

2. По морфологии в основном – это широкие асимметричные депрессии, ограниченные

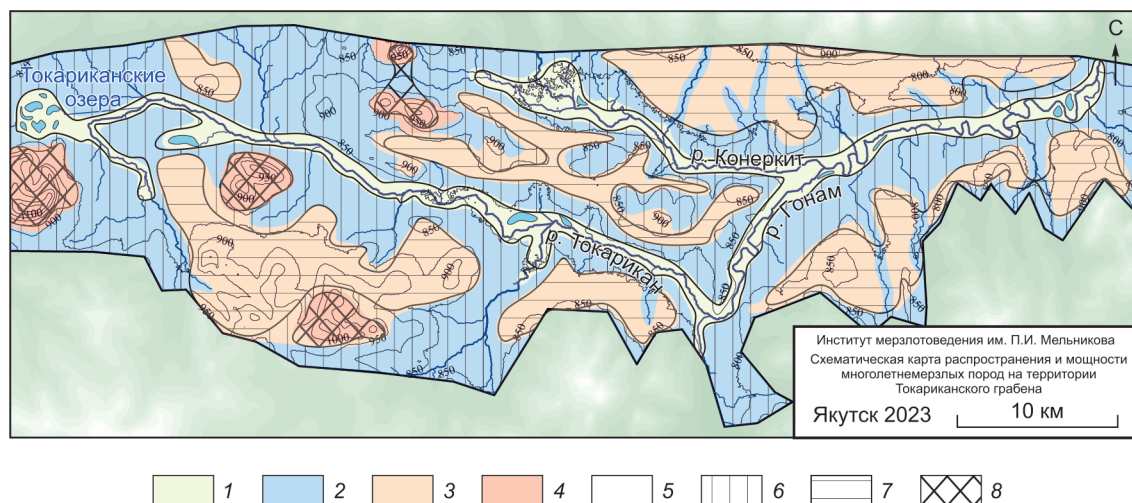


Рис. 7. Схематическая геокриологическая карта Токарикского грабена. Тип местности (1–4): 1 – долинно-западинный; 2 – зандрово-равнинный; 3 – плоскогорный; 4 – горно-привершинный; Распространение и мощность ММП: 5 – сплошное, с наличием сквозных и несквозных таликов, мощность ММП до 100 м; 6 – сплошное, мощность ММП от 50 до 150 м; 7 – сплошное, мощность ММП от 100 до 200 м; 8 – сплошное, мощность ММП более 200 м

Fig. 7. Tokarikan graben permafrost condition. Landscape (1–4): 1 – lowlands; 2 – outwash plains; 3 – flat watershed area; 4 – mountains; Extent and thickness of permafrost: 5 – continuous, with taliks, permafrost thickness less 100 m; 6 – continuous, permafrost thickness from 50 to 150 m; 7 – continuous, permafrost thickness from 100 to 200 m; 8 – continuous, permafrost thickness up to 200 m

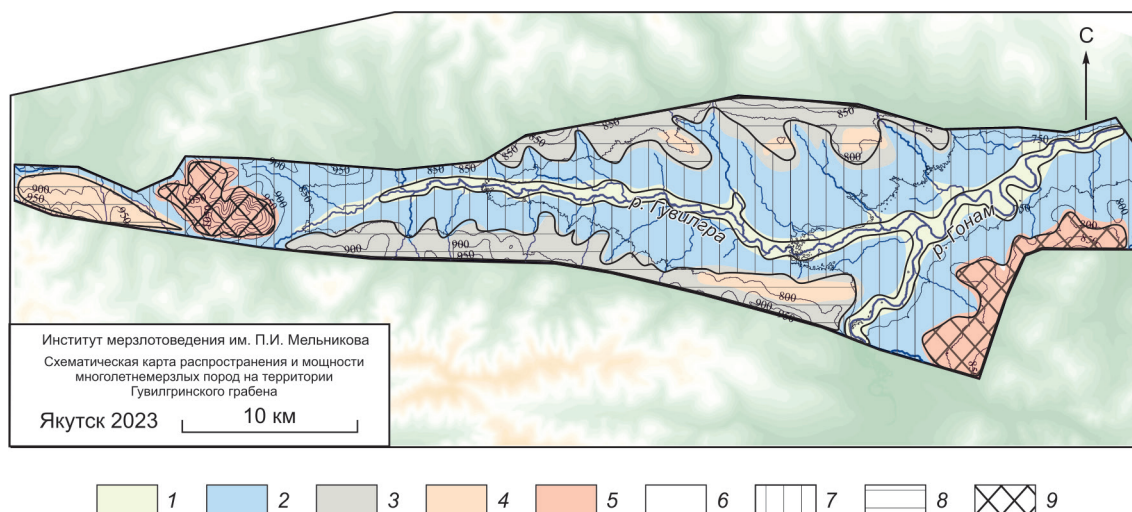


Рис. 8. Схематическая геокриологическая карта Гувилгринского грабена. Тип местности (1–5): 1 – долинно-западинный; 2 – зандрово-равнинный; 3 – горно-склонный; 4 – плоскогорный; 5 – горно-привершинный; Распространение и мощность ММП: 6 – сплошное, с наличием сквозных и несквозных таликов, мощность ММП до 150 м; 7 – сплошное, мощность ММП от 100 до 200 м; 8 – сплошное, мощность ММП от 200 до 250 м; 9 – сплошное, мощность ММП более 250 м

Fig. 8. Guvilgra graben permafrost condition. Landscape (1–5): 1 – lowlands; 2 – outwash plains; 3 – gentle slopes; 4 – flat watershed area; 5 – mountains; Extent and thickness of permafrost: 6 – continuous, with taliks, permafrost thickness less 150 m; 7 – continuous, permafrost thickness from 100 to 200 m; 8 – continuous, permafrost thickness from 200 to 250 m; 9 – continuous, permafrost thickness up to 250 m

с юга крутыми надвигами или взбросами. Каждая структура в достаточной мере переработана современной речной сетью.

3. Структуры выполнены литологически однотипными мезозойскими отложениями, мощность которых возрастает с запада на восток.

4. Приуроченность депрессий к одной климатической зоне. Характер рельефа благоприятствует развитию температурных инверсий – основной причине формирования специфических геокриологических условий Алдано-Чульманской впадины.

Вышеуказанные аргументы действительно во многом отождествляют природные и орографические условия мезозойских структур Алданского щита. Однако, как показали проведенные нами исследования, особенности распространения ММП и параметры ММТ имеют существенные различия.

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что имеющиеся представления о геокриологических условиях Токариканского и Гувилгринского грабенов и ряда других мелких мезозойских структур (см. рис. 1) Алданского бассейна требуют существенной корректировки.

На рис. 9 приведено изменение температуры горных пород с глубиной для наиболее типичного для впадин элемента рельефа – выположенного водораздела. По характеру температурных кривых подтверждается наиболее яркое различие между Алдано-Чульманской впадиной и грабенами Гонимского бассейна – наличие ММП в пределах этих элементов рельефа. Это различие обусловлено главным образом нарастающей суровостью климатических условий в восточном направлении и особенностями снегонакопления (см. табл. 2).

В процессе выполнения исследований нами рассчитаны теплофизические параметры пяти юрских литологических комплексов, формирующих основу мезозойской угольной формации в грабенах. Определение эффективной теплопроводности описывается выражением (1) (см. табл. 1). Итоговые расчетные значения эффективной теплопроводности между различными свитами варьируют от 2,62 до 2,88 Вт/(м · К). Наибольшее содержание пластов углей в составе кабактинской свиты (J_3kb) находит отражение в минимальной эффективной теплопроводности относительно других юрских толщ.

На территории Алданского щита располагается около 20 структур, выполненных породами мезозойского возраста [13]. Детально изучены геокриологические условия Алдано-Чульманской впадины [18, 19], установлены основные особенности распространения ММП в Токинской впадине [1, 20], получены сведения о параметрах

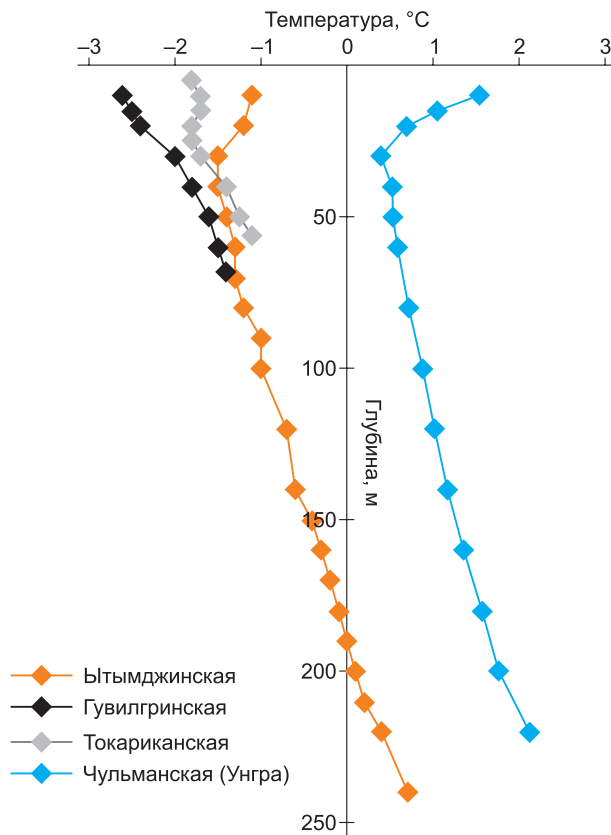


Рис. 9. Температура пород на водораздельных ландшафтах для мезозойских структур Алданского щита

Fig. 9. Temperature profile for watershed sites within mesozoic depression of the Aldan shield

мерзлой толщи Ытымджинской впадины [2, 12]. Таким образом, на текущий момент имеется геокриологическая характеристика наиболее крупных структур мезозойской угольной формации Алданского щита.

На основании анализа полученных сведений о геокриологических условиях нами дана сравнительная характеристика, отражающая основные геокриологические параметры мезозойских структур Алданского щита (табл. 3). Представленные в таблице признаки наглядно отображают своеобразие природных условий на территории мезозойских структур, однако комплекс факторов, формирующих данные условия, требует более подробного изучения и уточнения.

Выводы

1. В отличие от Алдано-Чульманской впадины для грабенов Гонимского бассейна характерен сплошной тип распространения ММП, что вносит изменения в представление региональ-

Таблица 3

Сравнение геокриологических признаков крупнейших мезозойских депрессий Алданского щита

Table 3

Permafrost features comparison of mesozoic depressions of the Aldan shield

Геокриологический признак	Алдано-Чульманская впадина	Структуры Гонамского бассейна	Токинская впадина
Тип промерзания	Прерывистый, местами массивно-островной	Сплошной. Талики распространены локально	Сплошной, талики приурочены к крупным водотокам и флювиогляциальным отложениям
Природный ландшафт	Преобладание пологих, выпуклых водораздельных пространств	Преобладание маревого ландшафта	Сочетание среднегорного и платообразного рельефа
Температура ММП	Преобладают высокотемпературные ММП	Температура пород изменяется от $-3,4$ до $-0,5$ °C	Широкий диапазон температур. Имеют развитие низкотемпературные ММП
Мощность ММТ	До 150 м, редко до 200 м	Преимущественно от 80 до 250 м, возможно до 300 м	Широкий диапазон, от 20 до 260 м
Экзогенные криогенные явления	Имеют повсеместное и очень разнообразное развитие	Развиты локально и в ограниченном количестве. Изучены слабо	Имеют повсеместное и очень разнообразное развитие
Растительность	Богатое разнообразие, от массивов светлохвойных пород до лиственных редин	Фитоценозы типичны и скудны	Широкое разнообразие

ных особенностей формирования геокриологических условий юго-востока Сибирской платформы.

2. Теплофизические свойства основных литологических комплексов Токариканского и Гувилгринского грабенов характеризуются небольшим диапазоном изменений, так, коэффициент эффективной теплопроводности юрских свит варьирует от 2,62 до 2,88 Вт/(м · К), что обусловлено однообразным минеральным составом литологических комплексов.

3. Для Токариканского грабена температура ММП изменяется от $-3,0$ до $-0,5$ °C. Мощность ММТ варьирует от 60 до 210 м, достигая максимума в нижних частях склонов и надпойменных террасах и выклиниваясь на бортах впадины и невысоких локальных водоразделах. Для впадины характерны выходы подземных вод, к которым приурочены обособленные талики.

4. Геокриологические условия Гувилгринского грабена обусловлены широким развитием маревого типа ландшафта. Температура ММП на глубине 15 м колеблется от $-3,1$ до $-1,2$ °C. По-

дошва ММТ залегает в пределах 120–250 м от поверхности, сокращаясь к бортам впадины.

Список литературы / References

1. Железняк М.Н. *Геотемпературное поле и криолитозона Юго-Востока Сибирской платформы*. Новосибирск: Наука; 2005. 227 с.
Zheleznyak M.N. *Geotemperature field and cryolithozone of South-East Siberian Platform*. Novosibirsk: Nauka; 2005. (In Russ.)
2. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Термический режим криолитозоны Ытымджинской впадины Алданского щита. *Криосфера Земли*. 2021;XXV(6):28–40. <https://doi.org/10.15372/KZ20210603>
Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Thermal regime of cryolithozone at Ytymdzha depression, Aldan shield. *Earth's Cryosphere*. 2021;XXV(6):23–33.
3. *Угольная база России. Том VI (Сводный, заключительный). Основные закономерности углеобразования и размещения угленосности на территории России*. Под ред. В.Ф. Череповского. М.: ООО «Геоинформмарк»; 2004. 779 с.
Russia Coal Base. Volume VI. Cherepovsky V.F. (ed.). Moscow: Geoinformmark; 2004. (In Russ.)
4. Радьков А.В. и др. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб*

1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ; 2016. 276 с.

Radkov A.V. et al. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan-Zabaikalskaya series. Sheet O-52 – Tommot*. Explanatory note. St. Petersburg: Cartographic Factory of VSEGEI; 2016. (In Russ.)

5. Инженерная геология СССР. Т.3. Восточная Сибирь. Комаров И.С. (ред.). М.: Изд-во МГУ; 1978. 529 с.

Engineering Geology of the USSR. Volume 3. Eastern Siberia. Komarov I.S. (ed.). Moscow: Moscow State University Press; 1978. (In Russ.)

6. Балобаев В.Т. и др. *Руководство по применению полупроводниковых терморезисторов для геокриологических измерений*. Якутск: ИМЗ СО АН СССР; 1985. 48 с.

Balobaev V.T. et al. *Guidelines for the use of semiconductor thermistors for geocryological measurements*. Yakutsk: Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1985. (In Russ.)

7. Guglielmin M., Balks M. R., Adlam, L. S., Baio F. Permafrost Thermal Regime from Two 30-m Deep Boreholes in Southern Victoria Land, Antarctica. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011;22(2):129–139. <https://doi.org/10.1002/ppp.715>

8. Балобаев В.Т., Левченко А.И. Геотермические особенности и мерзлая зона хр. Сунтар Хаята (на примере Нежданинского месторождения). *Геотеплофизические исследования в Сибири*. Павлов А.В. (ред.). Новосибирск: Наука; 1978:129–142.

Geothermal features and frozen zone Suntar Hayata (on the example of the Nezhdaninsky deposit). *Geoteplophysical research in Siberia*. Pavlov A.V. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1978:129–142. (In Russ.)

9. Гаврильев Р.И. Метод определения теплофизических свойств почв и горных пород в квазистационарном режиме нагрева. *Проблемы гидротермики мерзлых почв*. Саввинов Д.Д. (ред.). Новосибирск: Наука; 1988:66–72.

Gavriliev R.I. Method for determination of thermophysical properties of soils and rocks in quasistationary heating mode. *Hydrothermal problems of frozen soils*. Savvinov D.D. (ed.). Novosibirsk: Nauka; 1988:66–72. (In Russ.)

10. Lachenbruch A.H., Sass J.H., Marshall B.V., Moses T.H. Permafrost, heat flow, and the geothermal regime at Prudhoe Bay, Alaska. *Journal of Geophysical Research*. 1982;87(B11):9301–9316, <https://doi.org/10.1029/JB087iB11p09301>

11. Железняк М.Н. Некоторые аспекты проведения геокриологических исследований при выработке рационального варианта размещения инженерных сооружений и освоении месторождений полезных ископаемых. *Крайний Север: Проблемы экологии*. М.: Ресурс-Инфо; 1999:57–59.

Zheleznyak M.N. Some aspects of geocryological studies in the development of a rational variant of placement of engineering structures and the development of mineral deposits. *The Extreme North: Problems of Ecology*. Moscow: Resource-Info; 1999:57–59 (In Russ.)

12. Sysolyatin R. Characteristics of the Siberian coal basins permafrost: An example of Ytymdja depression. *Science of The Total Environment*. 2022;816:151494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151494>

13. Желинский В.М. *Мезозойская угленосная формация Южной Якутии*. Н.: Наука; 1980. 111 с.

Zhelinsky V.M. *Mesozoic coal formation of South Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1980. (In Russ.)

14. Алексеев В.Р., Философов Г.Н. Орографическая температурная инверсия воздуха в Восточной Сибири и ее роль в формировании многолетнемерзлых горных пород. *Тепловой и водный режим некоторых районов Сибири*. Л.: Наука; 1970:102–107.

Alekseyev V. R., Filosofov G.N. Orographic air temperature inversion in Eastern Siberia and its role in formation of permafrost rocks. *Thermal and water regime of some Siberian regions*. Leningrad: Nauka; 1970:102–107. (In Russ.)

15. Хруцкий С.Ф. К истории формирования многолетнемерзлых пород и подземных льдов в грабенах Типтоно-Гонамского бассейна. *Мерзлотные исследования*. 1968;8:81–89.

Khrutsky S.F. On the history of formation of permafrost and ground ice in the Tipton-Gonam basin grabens. In: Kudryavtsev V.N. (ed.) *Permafrost Investigations*. Moscow: 1968;8:81–89. (In Russ.)

16. *Геокриология СССР. Средняя Сибирь*. Под ред. Э.Д. Ершова М.: Недра; 1989. 413 с.

Geocryology of the USSR. Middle Siberia. Ershov E.D. (ed.). Moscow: Nedra, 1989. (In Russ.)

17. *Байкало-Амурская железнодорожная магистраль: геокриологическая карта*. М.: ГУГК; 1979. 1 к. (2 л.)

Baikal-Amur railway: geocryological map. Moscow: GUGK; 1979. (In Russ.)

18. Белокрылов И.Д., Ефимов А.И. *Многолетнемерзлые породы зоны железорудных и угольных месторождений Южной Якутии*. М.: Издательство АН СССР; 1960. 74 с.

Belokrylov I.D., Efimov A.I. *Permafrost rocks of the zone of iron-ore and coal deposits of South Yakutia*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1960. (In Russ.)

19. *Южная Якутия: Мерзлотно-гидрогеол. и инж.-геол. условия Алданского горнопром. р-на*. Под ред. В. А. Кудрявцева. М.: Издательство МГУ; 1975. 444 с.

Southern Yakutia. Permafrost, hydrogeological, engineering and geological conditions of the Aldan mining industry region. Kudryavtsev V.A. (ed.). Moscow: Moscow University Press; 1975. (In Russ.)

20. Железняк М.Н., Любомиров А.С., Поздняков И.В. Геокриологические условия Токинской впадины. *Материалы Первой Конференции геокриологов России*, г. Москва, 03–05 июня 1996 г. М.: Издательство МГУ; 1996:522–528.

Zheleznyak M.N. et al. Geocryological conditions of the Toka Depression. *Proceedings of the First Conference of Russian Geocryologists*, Moscow, June 3-5, 1996. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1996:522–528. (In Russ.)

Об авторах

СЫСОЛЯТИН Роберт Гамлетович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2633-1919>, ResearcherID: W-9244-2018, Scopus AuthorID: 1085009, e-mail: robertseesaw@gmail.com

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, член-корр. РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus AuthorID: 70158, e-mail: fe1956@mail.ru

About the authors

SYSOLYATIN, Robert Gamletovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2633-1919>, ResearcherID: W-9244-2018, Scopus AuthorID: 1085009, e-mail: robertseesaw@gmail.com

ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolaevich, Corresponding member of the RAS, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Director, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus AuthorID: 70158, e-mail: fe1956@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 22.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 18.04.2023

Принята к публикации / Accepted 27.06.2023

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 581.543:551.583

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-275-282>

Оригинальная статья

Фенологический отклик некоторых видов рода *Allium* на изменения климата в Центральной Якутии

Н. С. Данилова^{1,2,✉}, С. З. Борисова^{2,✉}, Н. Н. Егорова^{1,2},
Д. Н. Андросова¹, С. Н. Андреева¹

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

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

✉nad9.5@mail.ru, borisova_sz@mail.ru

Аннотация

В температурном режиме г. Якутск за 1961–2021 гг. отмечен статистически значимый положительный тренд. Потепление климата привело к незначительным фенологическим смещениям в сезонном развитии видов рода *Allium*, различным по размаху, продолжительности и направленности. В результате проведенного статистического анализа не отмечено существенных различий в фенологическом цикле трех видов – *A. schoenoprasum*, *A. senescens* и *A. ramosum*. В условиях меняющегося климата в течение 54 лет эти виды сохранили стабильность сроков прохождения основных фенологических фаз. Наиболее заметная фенологическая реакция на изменения климата отмечена у *A. prostratum* и *A. splendens*, которые реагируют статистически значимыми смещениями сроков начала цветения (*A. prostratum*, $p = 0,0009$), конца вегетации (*A. splendens*, $p = 0,0137$), продолжительностью префлорального периода (*A. prostratum*, $p = 0,0162$) и периода вегетации (*A. splendens*, $p = 0,0298$). Небольшое смещение сроков наступления основных фенологических фаз у пяти видов рода *Allium* за 54 года дает основание говорить об инерционности фенологического отклика растений на изменения климата.

Ключевые слова: Alliaceae, *Allium*, изменение климата, температура воздуха, сумма осадков, многолетние фенологические наблюдения, фенологическая реакция, Центральная Якутия

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-24-20099).

Благодарности. В работе использованы архивные материалы Якутского ботанического сада Института биологических проблем криолитозоны СО РАН.

Для цитирования: Данилова Н.С., Борисова С.З., Егорова Н.Н., Андросова Д.Н., Андреева С.Н. Фенологический отклик некоторых видов рода *Allium* на изменения климата в Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):275–282. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-275-282>

Original article

Phenological response of some species of the genus *Allium* to climate change in Central Yakutia

N. S. Danilova^{1,2,✉}, S. Z. Borisova^{2,✉}, N. N. Egorova^{1,2}, D. N. Androsova¹, S. N. Andreeva¹

¹Institute for Biological Problems of Cryolithozone,

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

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

✉nad9.5@mail.ru, borisova_sz@mail.ru

Abstract

The temperature regime showed a statistically significant positive trend in Yakutsk during the period 1961–2021. Thus, climate warming in the region has led to minor phenological shifts in the seasonal development of the *Allium*

species, which differ in amplitude, duration, and direction. However, statistical analysis did not show significant differences in the phenological cycles of *A. schoenoprasum*, *A. senescens*, and *A. ramosum*. In a climate that has been changing for 54 years, these species have retained stability in the timing of their main phenological phases. The most noticeable phenological response to climate change was noted in two species – *A. prostratum*, *A. splendens*, that respond with statistically significant shifts in the beginning of flowering period (*A. prostratum*, $p = 0,0009$), the end of vegetative period (*A. splendens*, $p = 0,0137$), duration of prefloral period (*A. prostratum*, $p = 0,0162$) and duration of vegetative period (*A. splendens*, $p = 0,0298$). We conclude that a slight shift in the timing of the main phenological phases in the five species of the genus *Allium* over 54 years suggests the inertia of the phenological response of the plants to climate change.

Keywords: Alliaceae, *Allium*, climate change, air temperature, total precipitation, long-term phenological observations, phenological reaction, Central Yakutia

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant number RSF 22-24-20099.).

Acknowledgements. We used archival materials from the Yakutsk Botanical Garden of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS.

For citation: Danilova N.S., Borisova S.Z., Egorova N.N., Androsova D.N., Andreeva S.N. Phenological response of some species of the genus *Allium* to climate change in Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):275–282. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-275-282>

Введение

Процесс изменения климата в различных частях земного шара имеет свои особенности. Согласно «Докладу об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год» [1], в Северном полушарии эти изменения проявляются наиболее заметно, скорость современного роста осредненной по России среднегодовой температуры за 10 лет составляет 0,49 °C, что более чем в 2,5 раза выше скорости роста глобальной средней температуры.

Одними из наиболее чувствительных индикаторов изменений внешней среды являются растения. Изменения климата оказывают влияние на их фенологическое развитие, происходят сдвиги наступления отдельных фенофаз в сторону опережения или запаздывания обычных сроков [2–6]. В живом мире все процессы обусловлены и связаны друг с другом, и фенологические изменения могут привести к нарушению заведенного порядка вещей. Так, например, может возникнуть ситуация несоответствия событий в сезонном развитии живых организмов, что повлечет за собой нарушение консортивных связей растений и животных [7]. Изменение климата несет с собой достаточно негативные последствия – не все виды могут приспособиться к новым условиям, что приводит к снижению видового разнообразия [8], инвазионным процессам, проникновению чужеродных видов в природные ценозы [9].

Цель работы – анализ фенологической реакции пяти видов рода *Allium* природной флоры Якутии (*A. prostratum*, *A. schoenoprasum*, *A. senescens*, *A. splendens*, *A. ramosum*) на меняющийся климат.

Методы и материалы

Исследования проводились на базе коллекции природной флоры Якутии Ботанического сада ИБПК СО РАН, расположенного на II надпойменной террасе р. Лена, в 7 км к юго-западу от г. Якутск. Климат района резко-континентальный, характеризуется низкими зимними и высокими летними температурами воздуха (годовая амплитуда составляет 102 °C), а также засушливостью [10].

Материалом для анализа климатических показателей служили данные гидрометеостанции г. Якутск за 1961–2021 гг.

Сравнительный анализ метеоусловий фенологических сезонов 1961–2020 гг. проводили по следующим датам: начало оттепели, наступление последнего весеннего и первого осеннего заморозков, устойчивый переход среднесуточных температур воздуха через 0, 5 и 10 °C, продолжительность периодов с температурами выше 0, 5 и 10 °C, сумма температур для каждого фенологического сезона, сумма осадков, гидротермический коэффициент (ГТК) по Селянинову. Даты устойчивого перехода температур воздуха через 0, 5 и 10 °C определены по единой методике агрометеорологических станций и постов [11].

Объектами исследований служили пять видов рода *Allium* – Луки. *A. prostratum* – л. стелющийся, в коллекции с 1966 г., *A. ramosum* – л. ветвистый, с 1974 г., *A. schoenoprasum* – л. скорода, с 1967 г., *A. senescens* – л. стареющий, с 1974 г., *A. splendens* – л. блестящий, с 1967 г. Фенологические наблюдения проводились по методике И.Н. Бейдеман [12] в течение 45–54 лет.

При обработке данных фенологических и метеорологических наблюдений использованы сле-

дующие методы статистического анализа с применением пакетов программ MS Excel и Statistica 8.0: проверка нормальности распределения переменных при помощи критерия Колмогорова–Смирнова с поправкой Лиллиефорса и критерия Шапиро–Уилка, проверка равенства средних двух независимых выборок с помощью t-критерия Стьюдента и критерия U Манна–Уитни, линейный регрессионный анализ, ранговый корреляционный анализ. Для приведенных в таблицах показателей приняты следующие обозначения: M – среднее значение показателя, σ – стандартное отклонение, p – достигнутый уровень значимости. Критический уровень значимости принимался равным 5 %.

Результаты и обсуждение

Температура воздуха является одной из основных характеристик климата. За 60 лет наблюдений с 1961 по 2021 г. среднегодовая темпера-

тура воздуха в г. Якутск существенно менялась (табл. 1). Если в первые 30 лет наблюдений средняя годовая температура воздуха и средняя месячная температура ноября–февраля были близки к норме, то, начиная с 1986–1990 гг. и далее, наметилась тенденция к потеплению, когда среднегодовая температура повысилась на 1,2 °C по сравнению со средними многолетними значениями (см. табл. 1). Как известно, с наступлением 21-го века отмечена пауза в глобальном потеплении [13]. Но эта «приостановка» роста средней глобальной приземной температуры в показателях г. Якутск не проявилась, наоборот, наблюдалось устойчивое ее повышение, среднегодовое значение температуры за 30 лет с 1991 по 2020 г. повысилось по сравнению с предыдущим циклом на 2 °C и составило –7,9 °C. Среднегодовая температура достигла своего максимума –6,9 °C в 2016–2021 гг., превышение над средними многолетними данными в эти годы составило +3,4 °C. При этом

Таблица 1
Средняя месячная и годовая температуры воздуха г. Якутск, °C

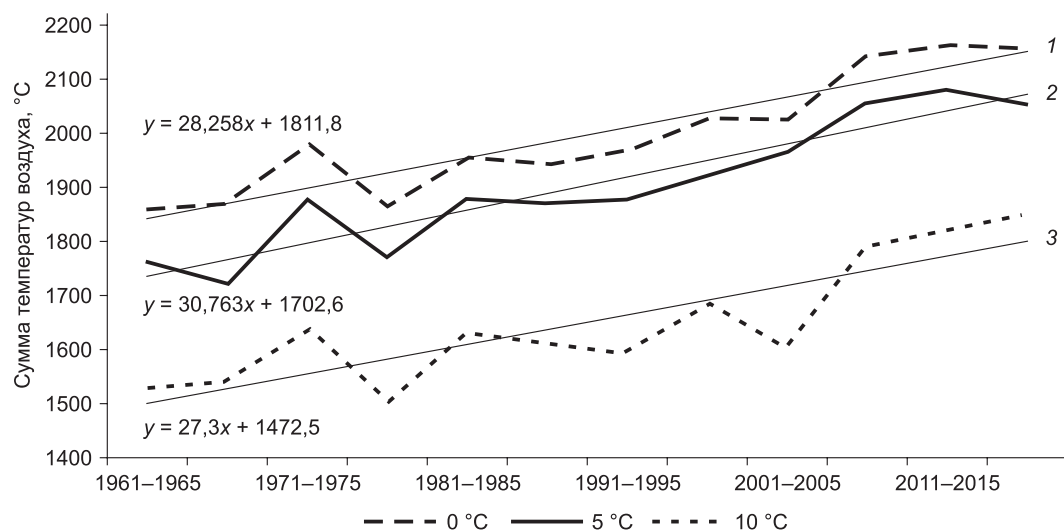
Table 1

Average monthly and annual air temperature in Yakutsk, °C

Период Period	Месяц Month												Год Year
	I	II	II	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1961–1965	–39,4	–34,8	–22,6	–7,9	4,9	14,8	18,9	15,7	5,8	–8,2	–27,9	–39,7	–10,0
1966–1970	–42,4	–38,1	–22,6	–6,1	6,1	15,3	18,8	14,7	5,1	–8,2	–30,4	–40,7	–10,7
1971–1975	–40,9	–37,4	–21,3	–5,9	8,2	15,7	19,1	14,5	6,4	–7,5	–30,1	–38,8	–9,8
1976–1980	–41,1	–36,4	–23,3	–5,3	6,6	15,3	17,8	15,2	4,9	–10,1	–29,7	–38,1	–10,3
1981–1985	–40,0	–35,3	–21,6	–4,9	7,9	15,1	18,9	14,5	6,2	–10,3	–28,8	–38,8	–9,8
1986–1990	–41,8	–33,5	–18,1	–6,2	6,6	16,2	18,9	15,2	5,5	–7,4	–28,3	–36,7	–9,1
1991–1995	–36,9	–32,4	–21,4	–5,8	7,2	15,9	19,0	15,1	6,1	–6,1	–28,0	–37,1	–8,7
1996–2000	–37,0	–32,2	–22,2	–4,4	7,3	17,1	19,9	15,3	5,5	–8,3	–27,5	–38,6	–8,8
2001–2005	–38,6	–34,4	–18,8	–3,9	7,2	16,0	20,4	15,2	6,8	–8,6	–23,8	–37,9	–8,4
2006–2010	–37,1	–34,7	–18,4	–3,8	8,7	17,9	19,7	16,1	6,6	–6,0	–25,8	–36,2	–7,8
2011–2015	–37,3	–32,3	–18,0	–2,9	9,3	17,2	20,5	16,2	5,8	–6,6	–25,9	–34,9	–7,4
2016–2021	–36,4	–31,7	–16,4	–2,1	8,6	18,4	19,9	15,9	7,3	–5,4	–23,9	–37,1	–6,9
1961–1990	–40,9	–35,9	–21,6	–6,1	6,7	15,4	18,7	14,9	5,7	–8,6	–29,2	–38,8	–9,9
1991–2021	–37,2	–32,9	–19,1	–3,8	8,1	17,2	19,9	15,7	6,4	–6,8	–25,8	–37,0	–7,9
1961–2021	–39	–34,4	–20,3	–4,9	7,4	16,3	19,3	15,3	6	–7,7	–27,5	–37,9	–8,9
*Средняя многолетняя	–43,2	–35,9	–22,2	–7,4	5,7	15,4	18,7	14,8	6,2	–7,9	–28,0	–39,8	–10,3
*Long-term													

* По М.Г. Гавриловой [10].

* According to M.G. Gavrilova [10].



Сумма температур воздуха выше 0 (1), +5 (2), +10 °C (3) за 1961–2021 гг. (пятилетние средние значения и их линейный тренд)

The sum of air temperatures above 0 (1), +5 (2), +10 °C (3) for 1961–2021 (5 year averages and their linear trend)

основной вклад в это внесло повышение температур за холодную часть года, степень потепления за зимние месяцы намного превосходит таковую за летние (см. табл. 1).

Поскольку наши исследования связаны с растениями, с их фенологическим развитием, основной интерес для ботанического изучения представляют погодные условия безморозного периода.

В температурном режиме теплой части года за 60 лет наблюдений отмечен статистически значимый положительный тренд. Средняя температура воздуха безморозного периода повысилась на 1,4, вегетационного – 0,9 и летнего сезона – 1,2 °C. Такой же положительный тренд отмечается в изменении суммы температуры воздуха за теплый период и периоды с температурой воздуха выше 5 и 10 °C (см. рисунок).

Средняя сумма осадков, выпавших за теплый период (май–октябрь) с 1961 по 2021 г., существенно не изменилась, отмечено небольшое увеличение среднегодовых значений суммы осадков теплого времени года на 7,1 мм. На этом фоне не выявлено тенденции к повышению гидротермического коэффициента, среднемесячный показатель которого за исследуемые годы варьирует в пределах 0,4–0,8. Положительный эффект небольшого увеличения количества осадков снижается интенсивным повышением температуры воздуха.

Сравнивая два агрометеорологических показателя периодов 1961–1990 и 1991–2021 гг.,

можно отметить более ранние сроки прекращения весенних заморозков ($p = 0,001$) и более поздние сроки наступления осенних заморозков ($p = 0,008$). Увеличилась продолжительность вегетационного периода на 8 дней ($p = 0,001$), что обусловлено, в основном, статистически значимым сдвигом даты его начала на 6 дней в сторону опережения ($p = 0,001$). Так же достоверно раньше в последнее 30-летие отмечается наступление лета – переход среднесуточной температуры через 10 °C ($p = 0,046$). Удлинение вегетационного сезона сопровождается статистически значимым увеличением сумм температур воздуха выше 0 ($p = 0,000$), 5 ($p = 0,000$) и 10 °C ($p = 0,001$) (см. рисунок).

В течение 60 лет почти в одни и те же сроки отмечены начало весны и начало осени, остаются постоянными средняя длительность безморозного периода и продолжительность фенологических сезонов, стабильны сумма осадков, выпадающих за безморозный период, и среднее значение ГТК.

Объекты исследования, виды рода *Allium* – луковичные геофиты *Allium prostratum*, *A. ramosum*, *A. schoenoprasum*, *A. senescens* и *A. splendens*, летнецветущие виды, массовое цветение которых отмечается в первой половине июля. Все виды выращиваются в коллекции Якутского ботанического сада, ежегодно проходят полный цикл фенологического развития с образованием полноценных семян, способны к семенному самовозобновлению. Высокоустойчивы в культуре.

Весеннее отрастание луков отмечается в первой половине мая. Наиболее раннее отрастание наблюдается у *A. prostratum*, последним начинает вегетацию *A. ramosum*. У этих двух видов средние сроки весеннего отрастания в течение двух исследуемых периодов наблюдений не претерпели изменений. У остальных трех видов дата начала вегетации сместилась статистически незначимо в сторону опережения или запаздывания от 1 до 2 дней. При этом изучение взаимосвязей весеннего отрастания видов с агрометеорологическими условиями показало положительную зависимость сроков начала фенологического развития видов от даты последнего заморозка (*A. splendens*, $r_s = 0,65$). Также у всех изученных видов отмечена высокая корреляционная связь даты начала весеннего отрастания с временем перехода среднесуточной температуры через 0 и 5 °C (*A. splendens*, $r_s = 0,62$ и $r_s = 0,54$ соответственно, *A. schoenoprasum*, $r_s = 0,59$ и $r_s = 0,39$ соответственно). Не выявлено взаимосвязей начала весеннего отрастания видов с количеством выпавших осадков (табл. 2).

Даты начала цветения видов изменились неоднозначно. Средние сроки зацветания *A. ramosum* за наблюдаемый период не претерпели никаких изменений, сроки начала цветения *A. senescens* и *A. schoenoprasum* также практически не изменились за наблюдаемый период, о чем говорит статистически незначимое смещение дат на 2 дня в сторону запаздывания. Но два вида – *A. prostratum* и *A. splendens*, средние даты начала цветения которых в период с 1967–1990 гг. были одинаковыми, в последующий период реагируют на изменение климата различным образом. Сроки начала цветения *A. prostratum* статистически значимо сдвинулись на 10 дней в сторону запаздывания ($p = 0,0009$), а зацветание *A. splendens* во втором 30-лети, наоборот, сместились на ранние сроки, опережение составило 7 дней ($p = 0,0340$).

Даты начала цветения всех видов коррелируют на среднем и высоком уровне с датами схода снежного покрова (*A. ramosum*, $r_s = 0,23$; *A. splendens*, $r_s = 0,46$), зацветание лесного вида *A. splendens* и лугового *A. schoenoprasum* коррелируют на среднем уровне со временем перехода среднесуточных температур через 5 °C ($r_s = 0,27$ и $r_s = 0,30$ соответственно). Высокая отрицательная связь с суммами температур выше 5 и 10 °C (от $r_s = -0,58$ до $r_s = -0,67$) характерна для всех пяти видов. Взаимосвязь даты начала цветения с

суммой выпавших осадков – на среднем уровне (*A. schoenoprasum*, $r_s = 0,28$).

Сроки конца вегетации статистически значимо сдвинулись только у *A. splendens*, у остальных четырех видов эта фенологическая фаза также сместилась на более поздние сроки, но эти значения недостоверны. Заметных корреляционных связей даты конца вегетации с метеорологическими условиями не обнаружено.

Неоднозначны изменения в продолжительности префлорального периода у разных видов. У *A. prostratum* и *A. senescens* с изменением климата этот период удлиняется, у *A. schoenoprasum* и *A. splendens* сокращается, у *A. ramosum* он остается стабильным.

Что касается длительности вегетации, то в течение 1990–2020 гг. луки вегетируют продолжительней, чем в предыдущий период, в меньшей степени – *A. schoenoprasum*, в большей – *A. splendens*. Хотя удлинение вегетации статистически достоверно только у одного вида *A. splendens*, это наиболее заметная реакция растений на потепление климата. При этих, большей частью нечастых и небольших усредненных смещениях за большой промежуток времени, даты наступления фенологических фаз растений в разные годы сильно варьируют и тесно связаны с метеорологическими условиями текущих сезонов. Разнонаправленные и неравные смещения сроков наступления основных фенофаз в сторону как опережения, так и запаздывания, обеспечивают стабильность их средних дат, а также продолжительность как префлорального периода, так и вегетации в целом, что свидетельствует об устойчивости ритмологической адаптации вида к условиям Севера.

Выводы

1. Повышение среднегодовых температур воздуха на территории г. Якутск за последние 60 лет – проявление меняющегося климата, которому сопутствует изменение ряда агрометеорологических показателей: более ранние сроки прекращения весенних заморозков ($p = 0,001$) и более поздние сроки наступления осенних заморозков ($p = 0,008$), увеличение продолжительности вегетационного периода на 8 дней ($p = 0,001$), сдвиг в сторону опережения перехода среднесуточной температуры воздуха через 5 °C ($p = 0,001$) и 10 °C ($p = 0,046$). Удлинение вегетационного сезона сопровождается статистически значимым увеличением сумм температур воздуха выше 0 ($p = 0,000$), 5 ($p = 0,000$) и 10 °C ($p = 0,001$).

Таблица 2

Средние сроки феноразвития видов рода *Allium* в периоды 1967–1990 и 1991–2020 гг.

Table 2

Seasonal development of *Allium* species in 1967–1990 and 1991–2020

Вид Species	1967–1990 M±σ	1991–2020 M±σ	U _{эксп}	U _{кр}	p
Начало вегетации Beginning of vegetative period					
<i>Allium prostratum</i>	04.05±8	04.05±4	257	187	0,9030
<i>Allium ramosum</i>	16.05±8	16.05±5	125	79	1,0000
<i>Allium schoenoprasum</i>	6.05±7	7.05±5	268	234	0,3067
<i>Allium senescens</i>	08.05±6	06.05±4	188	156	0,3732
<i>Allium splendens</i>	09.05±9	07.05±4	138	100	0,6066
Начало цветения Beginning of flowering period					
<i>Allium prostratum</i>	04.07±10	14.07±8	134	217	0,0009
<i>Allium ramosum</i>	10.07±7	10.07±4	129	89	0,7704
<i>Allium schoenoprasum</i>	21.06±5	19.06±5	245	234	0,1424
<i>Allium senescens</i>	09.07±8	11.07±6	182	150	0,3929
<i>Allium splendens</i>	04.07±9	28.06±4	89	103	0,0340
Конец вегетации End of vegetative period					
<i>Allium prostratum</i>	23.09±12	29.09±9	206	217	0,0615
<i>Allium ramosum</i>	13.09±23	23.09±16	105	89	0,2571
<i>Allium schoenoprasum</i>	23.08±11	28.08±8	223	207	0,1798
<i>Allium senescens</i>	20.09±19	29.09±9	167	174	0,1643
<i>Allium splendens</i>	15.09±15	27.09±11	81	107	0,0137
Продолжительность префлорального периода, дни Duration of prefloral period, days					
<i>Allium prostratum</i>	62±15	70±9	154	187	0,0162
<i>Allium ramosum</i>	55±10	55±5	117	79	0,7702
<i>Allium schoenoprasum</i>	46±8	42±7	240	234	0,1206
<i>Allium senescens</i>	62±10	66±7	155	150	0,1223
<i>Allium splendens</i>	56±10	51±5	102	93	0,1731
Продолжительность вегетации, дни Duration of vegetative period, days					
<i>Allium prostratum</i>	141±14	148±10	179	187	0,0640
<i>Allium ramosum</i>	120±27	130±17	107	79	0,5228
<i>Allium schoenoprasum</i>	110±14	112±9	260	207	0,5634
<i>Allium senescens</i>	135±19	147±10	151	156	0,0749
<i>Allium splendens</i>	129±22	143±12	81	96	0,0298

Примечание. M±σ – среднее значение показателя и его стандартное отклонение. При $U_{кр} > U_{эксп}$ различия между показателями статистически значимы. Жирным шрифтом обозначены статистически значимые различия, при $p < 0,05$.

Note. M±σ – average value of the indicator and standard deviation. At $U_{кр} > U_{эксп}$ the differences between the indicators are considered statistically significant. Statistical significance is indicated in bold font, $p < 0.05$.

2. Потепление климата привело к незначительным фенологическим смещениям в сезонном развитии растений, различным по размаху, продолжительности и направленности, большей частью статистически незначимым.

3. Не замечено существенных различий в фенологическом цикле *A. schoenoprasum*, *A. senescens* и *A. ramosum*, в условиях меняющегося климата эти виды сохранили стабильность сроков прохождения основных фенологических фаз.

4. Наиболее заметная фенологическая реакция на изменения климата отмечена у двух видов – *A. prostratum*, *A. splendens*, которые реагируют статистически значимыми смещениями сроков начала цветения (*A. prostratum*, $p = 0,0009$), конца вегетации (*A. splendens*, $p = 0,0137$), продолжительностью префлорального периода (*A. prostratum*, $p = 0,0162$) и периода вегетации (*A. splendens*, $p = 0,0298$).

5. Небольшие усредненные смещения (большей частью статистически незначимые) в фенологическом развитии растений за большой промежуток времени сопровождаются высокой изменчивостью дат наступления фенологических фаз растений в разные годы и тесно связаны с метеорологическими условиями текущих сезонов. Разнонаправленные и неравные смещения сроков наступления основных его фенофаз как в сторону опережения, так и запаздывания обеспечивают стабильность их средних дат, а также продолжительность как префлорального периода, так и вегетации в целом, что свидетельствует об устойчивости ритмологической адаптации вида к условиям Севера.

6. Небольшие смещения средних фенодат пяти видов рода *Allium* за 45–54 лет дают основание говорить об инерционности их фенологического отклика на изменения климата.

Список литературы / References

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.; 2022. 104 с. *A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2021*. Moscow; 2022. 104 p. (In Russ.).
2. Root T., Price J., Hall K. et al. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*. 2003;421: 57–60. <https://doi.org/10.1038/nature01333>
3. Clark R.M., Thompson R. Predicting the impact of global warming on the timing of spring flowering. *International Journal of Climatology*. 2010;30(11):1599–1613. <https://doi.org/10.1002/joc.2004>
4. Жмылева А.П., Карпухина Е.А., Жмылев П.Ю. Фенологическая реакция лесных растений на потепле-

ние климата: рано- и поздноцветущие виды. *Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2011;(2):5–15.

Zhmyleva A.P., Karpukhina E.A., Zhmylev P.Yu. Influence of climate warming on flowering time of early and lately flowering forest plants. *RUDN Journal of Ecology and Life safety*. 2011;(2):5–15 (In Russ.).

5. Фомин Э.С., Фомина Т.И. Изменение фенологии многолетних растений в Западной Сибири на фоне глобального потепления климата. *Сибирский экологический журнал*. 2021;28(5):543–556. <https://doi.org/10.15372/SEJ20210504>

Fomin E.S., Fomina T.I. Changes in the phenology of perennial plants in Western Siberia against the background of global climate warming. *Contemporary Problems of Ecology*. 2021;28(5):543–556. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20210504>

6. Rosbakh S., Hartig F., Sandanov D.V., Bukharova E.V., Miller T.K., Primack R.B. Siberian plants shift their phenology in response to climate change. *Global Change Biology*. 2021;27(18):4435–4448. <https://doi.org/10.1111/gcb.15744>

7. Bertin R.I. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change *Journal of the Torrey Botanical Society*. 2008;135(1):126–146. <https://doi.org/10.3159/07-RP-035R.1>

8. Санданов Д.В., Liu Y., Wang Z., Королюк А.Ю. Древесные и травянистые растения Внутренней Азии: видовое богатство и эколого-географические особенности. *Сибирский экологический журнал*. 2020;27(4): 450–462. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200404>

Sandanov D.V., Liu Y., Wang Z., Korolyuk A.Yu. Woody and herbaceous plants of Inner Asia: species richness and ecogeographic patterns. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020;27(4):450–462. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20200404>

9. Шефтель Б.И., Якушов В.Д. Влияние потепления климата на наземные виды средней енисейской тайги. *Сибирский экологический журнал*. 2022;29(1): 1–12. <https://doi.org/10.15372/SEJ20220101>

Sheftel B.I., Yakushov V.D. Influence of climate warming on terrestrial species of the middle Yenisei taiga. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022;29(1):1–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SEJ20220101>

10. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. 1973; Якутск. 119 с.

Gavrilova M.K. *The climate of Central Yakutia*. Yakutsk; 1973. 119 p. (In Russ.)

11. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып.11. Агрометеорологические наблюдения на станциях и постах. Часть 1, кн. 2. Основные агрометеорологические наблюдения. М.; 2000. 284 с.

Instruction to hydrometeorological stations and posts. Issue 11. Agrometeorological observations at stations and posts. Part 1, book 2. Basic agrometeorological observations. Moscow; 2000. 284 p. (In Russ.)

12. Бейдеман И.Н. Изучение фенологии растений. *Полевая геоботаника*. Т. 2. М., Л.; 1960:333–366.

Beidemann I.N. The study of plant phenology. *In: Field Geobotany*. Part 2. Moscow, Leningrad; 1960:333–366 (In Russ.)

13. England M., McGregor S., Spence P. et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nature Climate Change*. 2014;4(2):222–227. <https://doi.org/10.1038/nclimate2106>

Об авторах

ДАНИЛОВА Надежда Софроновна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, ResearcherID: S-8136-2016, Scopus AuthorID: 144580, e-mail: nad9.5@mail.ru

БОРИСОВА Саргылана Захаровна, кандидат биологических наук, доцент, начальник отдела, <https://orcid.org/0000-0003-1562-9816>, ResearcherID: A-4953-2014, Scopus AuthorID: 144581, e-mail: borisova_sz@mail.ru

ЕГОРОВА Нюргюяна Назаровна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6746-7666>, ResearcherID: ADZ-5552-2022, Scopus AuthorID: 726965, e-mail: nurne@mail.ru

АНДРОСОВА Дария Николаевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1521-0556>, ResearcherID: GZK-2378-2022, Scopus AuthorID: 785152, e-mail: darija_androsova@mail.ru

АНДРЕЕВА Сахая Николаевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5003-8037>, ResearcherID: GZG-8254-2022, Scopus AuthorID: 682968, e-mail: Sandren_1601@mail.ru

About the authors

DANILOVA, Nadezhda Sofronofna, Dr. Sci (Biol.), Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, ResearcherID: S-8136-2016, Scopus AuthorID: 144580, e-mail: nad9.5@mail.ru

BORISOVA, Sargylana Zakharovna, Cand. Sci. (Biol.), Assistant Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1562-9816>, ResearcherID: A-4953-2014, Scopus AuthorID: 144581, e-mail: borisova_sz@mail.ru

EGOROVA, Nyurguyana Nazarovna, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6746-7666>, ResearcherID: ADZ-5552-2022, Scopus AuthorID: 726965, e-mail: nurne@mail.ru

ANDROSOVA, Darja Nikolaevna, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1521-0556>, ResearcherID: GZK-2378-2022, Scopus AuthorID: 785152, e-mail: darija_androsova@mail.ru

ANDREEVA, Sakhaya Nikolaevna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5003-8037>, ResearcherID: GZG-8254-2022, Scopus AuthorID: 682968, e-mail: Sandren_1601@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 12.01.2023

Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2023

Принята к публикации / Accepted 30.03.2023

УДК 58.037

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

Оригинальная статья

Выживаемость и прооксидантно-антиоксидантная система проростков семян растений Якутии, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции

М. М. Шашурин[✉], А. Н. Журавская

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

[✉]inwertaza@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены физиологические и биохимические изменения у проростков дикорастущих растений Якутии, выросших из семян, получивших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции. Обзор литературных источников позволяет заключить, что слабые воздействия низко интенсивных полей (нетеплового характера) изучены недостаточно. Исследования проведены на семенах и проростках 14 видов дикорастущих растений Якутии. Критерием оценки воздействия сверхслабого постоянного магнитного поля было образование настоящего листа у проростков (выживаемость). В качестве прооксидантной реакции регистрировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов. Суммарное содержание низкомолекулярных антиоксидантов определялось как параметр неферментативной антиоксидантной системы. Изучена активность фермента антиоксидантного действия – супероксиддисмутазы. Оценка влияния сверхслабого постоянного магнитного поля проводилась с использованием метода коэффициентов. Показано, что выживаемость проростков, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции от 0,2 до 4,0 мТл в течение 24 часов, приводит к активации процессов перекисного окисления липидов и зависит от режима протекания процессов адаптации антиоксидантных систем (суммы низкомолекулярных антиоксидантов и активности супероксиддисмутазы): простой компенсации или гиперкомпенсации. Во втором случае действие сверхслабого постоянного магнитного поля приводит к повышению выживаемости проростков по критерию образования настоящего листа. Работа представляет значимость для специалистов в области магнитобиологии и исследователей антиоксидантных систем растений.

Ключевые слова: семена и проростки растений, прооксиданты, антиоксиданты, влияние сверхслабого постоянного магнитного поля, адаптация, прооксидантно-антиоксидантное равновесие

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья, повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (№ 0297-2021-0025, регистрационный номер ЕГИСУ НИОКТР АААА-А21-121012190035-9).

Для цитирования: Шашурин М.М., Журавская А.Н. Выживаемость и прооксидантно-антиоксидантная система проростков семян растений Якутии, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоянным магнитным полем разной индукции. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):283–292. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

Original article

Survival rates and pro-oxidant-antioxidant systems of germinated Yakutian plant seeds pretreated with super-weak constant magnetic fields of different flux densities

M. M. Shashurin[✉], A. N. Zhuravskaya

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

[✉]inwertaza@mail.ru

Abstract

The aim of this study was to identify physiological and biochemical changes in seedlings of wild plants of Yakutia, grown from seeds, which have received a pre-sowing, super-weak constant magnetic field treatment of different mag-

netic flux densities. Review of literature sources allows us to conclude that the weak effects of low-intensity fields (nonthermal character) have not been studied sufficiently so far. The study was conducted on seeds from 14 different species of wild plants native to Yakutia. The seeds were subjected to different magnetic flux strengths of 0.2–4.0 mT for 24 hours and then were germinated on filter paper. The criterion for evaluating the effect of the super-weak constant magnetic field was the formation of a true leaf in seedlings (survival rate). The intensity of lipid peroxidation processes was recorded as a pro-oxidant reaction. The total content of low molecular weight antioxidants was determined as an example of the non-enzymatic antioxidant system. The activity of an antioxidant enzyme, superoxide dismutase, was determined. The effects of the super-weak constant magnetic fields were evaluated using regression and statistical methods. Based on the working hypothesis is that the formation of the present leaf is dependent on changes in the pro-oxidant-antioxidant equilibrium in the cells of the seedlings as a result of the action on them by the super-weak constant magnetic field as a function of the magnetic flux density. We showed that the survival rate of seedlings grown from the seeds pre-treated by super-weak constant magnetic fields of different magnetic flux density for 24 hours leads to the activation of lipid peroxidation and depends on the adaptation processes of antioxidant systems (the sum of low-molecular antioxidants and superoxide dismutase activity): simple compensation or hyper-compensation. In the second case, the action of super-weak constant magnetic fields leads to an increase in the survival rate of seedlings by the criterion of the formation of the true leaf. The study is of significance for specialists in magneto-biology and researchers of plant antioxidant systems.

Keywords: plant seeds and seedlings, prooxidants, antioxidants, effect of superweak direct magnetic field, adaptation, prooxidant-antioxidant equilibrium

Funding. This study was carried out as part of the project “Physiological and biochemical mechanisms of plant, animal and human adaptation to conditions of the Arctic/Subarctic and the development of biopreparations based on natural northern raw materials increasing the efficiency of the adaptation process and the level of human health in extreme environmental conditions” (number 0297-2021-0025, registration number AAAA-121012190035-9).

For citation: Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Survival rates and pro-oxidant-antioxidant systems of germinated Yakutian plant seeds pretreated with super-weak constant magnetic fields of different flux densities. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):283–292. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-283-292>

Введение

Данная статья является продолжением ранее опубликованной работы [1], в которой исследованию подлежало пять видов растений при фиксированной индукции постоянного магнитного поля (120 мкТл), развертка по времени от 24 до 120 ч. В настоящей работе число исследуемых видов дикоросов увеличено до 14, время действия магнитного поля – 24 часа, индукция магнитного поля варьировалась от 0,2 до 4 мТл.

Все организмы на нашей планете подвергаются непрерывному действию сверхмалых физических полей искусственного и естественного происхождения. К настоящему времени в области исследования биологического действия слабых магнитных полей накоплен огромный экспериментальный материал, свидетельствующий о высокой чувствительности живых систем к их воздействию [2, 3]. В некоторых пределах интенсивности эти воздействия необходимы для поддержания нормальной жизнедеятельности организма. Растения и животные в ходе эволюции выработали механизмы рецепции информации о состоянии окружающей среды посредством взаимодействия с электромагнитным полем Земли. Малые дозы радиации и магнитного поля могут заметно менять физиологические и биохимиче-

ские характеристики живых организмов [3, 4]. Например, рядом исследователей показано, что ответная реакция растительных организмов на действие магнитного поля (электромагнитного или постоянного) зависит от его характеристики (индукции, частотного диапазона, времени экспозиции и т. д.) и от исходного физиологического состояния растений (семян). Причем в зависимости от характеристик этих факторов их совокупность способна оказывать как стимулирующее, так и ингибирующее действие на ряд параметров организмов. Ранее было показано, что сверхслабые магнитные поля способны выступать в качестве мягкого стресс-агента, поэтому их действие на растения может сопровождаться активацией перекисного окисления липидов, обусловленной усилением генерации активных форм кислорода и свободных радикалов, а также, в качестве адаптивной реакции, изменением активности ферментов антиоксидантной защиты [5–8]. В других работах установлено, что магнитное поле и малые дозы радиации не вызывают никаких изменений у некоторых организмов [9]. Публикации по этой тематике отмечаются разнообразием, неоднозначностью, иногда даже противоречивостью полученных данных, не представляющих полной картины исследований в магнитобиоло-

гии как науки, изучающей биологические эффекты магнитных полей. Таким образом, если воздействие на биологические системы электромагнитных полей значительной напряженности (приводящее к тепловым эффектам в биосистемах) исследовано к настоящему времени достаточно полно [3], то слабые воздействия низкоинтенсивных полей (нетеплового характера) пока изучены недостаточно.

Цель данной работы – выявить физиологические и биохимические изменения семенного потомства ряда видов растений Центральной Якутии на разную индукцию сверхслабого постоянного магнитного поля (СПМП).

Материалы и методы

В качестве тест-объектов использовали семена щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus*), клоповника безлепестного (*Lepidium apetalum* Willd.), полыни чернотыльника (*Artemisia vulgaris*), пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare*), иван-чая узколистного (*Chamaenerion angustifolium*), льна многолетнего (*Linum perenne* L.), подорожника большого (*Plantago major*), дескураньи Софьи (*Descurainia sophia*), кровохлебки лекарственной (*Sanguisorba officinalis*), резухи повислой (*Arabis pendula* L.), скерды кровельной (*Crépis tectorum*), полыни якутской (*Artemisia jacutica* Drob.), пастушьей сумки обыкновенной (*Capsella bursa-pastoris*) и прострела желтеющего (*Pulsatilla orientalis-sibirica*), широко распространенных в Центральной Якутии.

Семена проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге ($d = 110$ мм) в климатической камере Binder KMF (Германия) при температуре 25°C , с длиной светового дня 16 ч, при относительной влажности 60 %. Опыт закладывали в четырех повторностях по 50 семян в каждой чашке для каждого варианта. Предпосевную обработку ПМП получили сухие семена при разной величине магнитной индукции: 0,2, 0,6, 1,0, 2,0 и 4,0 мТл, в течение 24 ч. Контроль – семена, не прошедшие предпосевную обработку ПМП. Для создания ПМП использовали катушки Гельмгольца, описанные в работе [7].

Критерием оценки воздействия ПМП была выживаемость (образование настоящего листа) проростков на 21-й день наблюдения (%). Появление настоящего листа у проростков говорит о начале активного функционирования апикальной и корневой меристемы – критических тканей растения, которое позволяет зафиксировать

первичные биохимические изменения метаболизма проростка, возможные отдаленные последствия или его гибель.

В качестве прооксидантной реакции регистрировали интенсивность процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ), определяемую по методике, основанной на реакции между образующимся в этом процессе малоновым диальдегидом (МДА, $\text{мкмоль/г}_{\text{пр}}$) и тиобарбитуровой кислотой [10]. Суммарное содержание низкомолекулярных антиоксидантов ($\Sigma\text{НМАО}$, $\text{мг-экв}_{\text{кверц}}/\text{г}_{\text{пр}}$), в качестве неферментативной антиоксидантной системы, определяли по методике, основанной на окрашивании о-фенантролином восстановленного хлорида железа [11]. Определение активности фермента антиоксидантного действия – супероксиддисмутазы (СОД, КФ 1.15.1.1) в проростках проводили по измерению величины молярного коэффициента экстинкции бисформазановых комплексов [12].

Оценку влияния ПМП на образование настоящего листа (ОНЛ), интенсивность ПОЛ, активность антиоксидантных систем (как совокупность содержания НМАО и активности СОД) проводили с использованием метода коэффициентов, нормируя значения соответствующих характеристик при различных индукциях ПМП к их значениям в отсутствие ПМП.

Соответствующие показатели вычисляли по следующим формулам:

$$k_{\text{ОНЛ}} = \text{ОНЛ}_i / \text{ОНЛ}_0;$$

$k_{\text{ПОЛ}} = (\text{МДА}_i / \text{МДА}_0)$, отражает в нормированных единицах активность процесса перекисного окисления липидов;

$k_{\text{АОЗ}} = (\text{НМАО}_i / \text{НМАО}_0 + \text{СОД}_i / \text{СОД}_0) / 2$, отражает в нормированных к контрольному значению совокупности изменений активность антиоксидантных систем ($\Sigma\text{НМАО} + \text{СОД}$).

Далее, вычисляли коэффициент антиоксидантной защиты:

$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}} = k_{\text{АОЗ}} / k_{\text{ПОЛ}}$, который в нормированных единицах показывает степень адаптации организма к действию ПМП за счет адаптивных изменений активности антиоксидантных систем в ответ на изменения активности прооксидантных систем, т. е. прооксидантно-антиоксидантное равновесие.

Обсуждение результатов по действию на физиологическое состояние проростков растений, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку СПМП, проводили исходя из рабочей гипотезы, заключающейся в том, что выживаемость

мость зависит от изменений прооксидантно-антиоксидантного равновесия в клетках проростков в результате действия на них ПМП разной индукции.

Эксперименты проводили в четырех повторностях. Результаты представлены в виде средней арифметической величины. Абсолютную ошибку рассчитывали из среднеквадратической ошибки с помощью коэффициента Стьюдента при $p = 0,95$ [13]. Значимость различий между средними значениями определяли, используя критерий Ньюмена–Кейлса для множественных сравнений при уровне $p \leq 0.05$. Расчет проводили с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, v.2007.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены выживаемость и характеристики прооксидантно-антиоксидантной системы клеток проростков растений, выросших из семян, получивших предпосевную обработку сверхслабым ПМП разной индукции. Полученные результаты показали, что у 71,4 % исследованных нами видов растений выживаемость проростков статистически достоверно повышается по мере увеличения индукции ПМП, относительно контроля. Например, при индукции 0,2 мТл наблюдалось увеличение количества выживших проростков от 3 % (резуха вислоплодная) до 45 % (лен многолетний). Предпосевная обработка ПМП сухих семян с индукцией 4,0 мТл повысила выживаемость проростков от 10 % (кровохлебка лекарственная) до 80 % (дескуранья Софьи). Ряд проростков растений (резуха вислоплодная, полынь якутская) снизили выживаемость или остались на уровне контроля (пижма обыкновенная, полынь чернотыльник) в результате предпосевной обработки семян сверхслабым ПМП.

Существенный вклад в антиоксидантный фон организма вносят низкомолекулярные антиоксиданты. Исследование изменений антиоксидантного параметра у проростков клоповника безлепестного, льна многолетнего, дескуранья Софьи, кровохлебки лекарственной, скерды кровельной, иван-чая узколистного и прострела желтеющего показало, что в клетках проростков, выросших из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым ПМП (по активности супероксиддисмутазы и содержанию низкомолекулярных антиоксидантов) с индуктивностью от 0,2 до 4,0 мТл, было зафиксировано увеличение суммарного содержания НМАО: минималь-

но – у прострела желтеющего (в 1,78 раза) и максимально – у дескуранья Софьи (в 6,07 раза), на фоне увеличения выживаемости проростков на 23 и 80 % соответственно относительно контроля. Активировалась СОД, особенно в клетках проростков клоповника безлепестного (в 10,0 раз), полыни чернотыльника (в 6,6 раза) и пижмы обыкновенной (в 5,6 раза) (табл. 2).

У 71,4 % проростков исследованных видов растений зафиксирована активация ПОЛ. Максимально – у резухи вислоплодной в 4,67 раза (4,0 мТл) и у полыни чернотыльника – в 3,0 раза при этой же индукции. Ранее рядом авторов было показано, что действие сверх- и низкоинтенсивных факторов среды (запыление, сверхслабые статические магнитные поля, малые дозы ионизирующего излучения и др.) приводит к увеличению суммы низкомолекулярных антиоксидантов, концентрации малонового диальдегида, активности пероксидазы и супероксиддисмутазы в клетках организмов растений [7, 14]. Было предположено, что увеличение суммы НМАО, активности пероксидазы и СОД в клетках вызвано ответной реакцией на повышение интенсивности ПОЛ. Это можно объяснить влиянием магнитного поля на радикальные пары, приводящим к образованию активных форм кислорода и способствующим повышению перекисного окисления липидов, что, в конечном итоге, увеличивает концентрацию малонового альдегида [16, 17]. Анализ значений антиоксидантно/прооксидантных соотношений ($k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$) показал, что значительное количество клеток проростков (71,4 %) адаптировались к действию сверхмалого ПМП за счет увеличения суммарного содержания низкомолекулярных антиоксидантов и благодаря активации СОД в режиме гиперкомпенсации (см. табл. 2). Максимальное значение $k_{\text{АОЗ/ПОЛ}} = 6,65$ – у проростков щиряцы запрокинутой при индукции ПМП 4,0 мТл.

Вместе с тем антиоксидантные системы в клетках проростков ряда растений (подорожник большой, пижма обыкновенная, резуха вислоплодная, полынь якутская, пастушья сумка) адаптировались к действию сверхслабого ПМП на семена при индукции 4,0 мТл в режиме простой компенсации, $k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$ составил 0,66, 1,14, 0,39, 0,63, 0,85 соответственно.

Выводы

Проростки, выросшие из семян, прошедших предпосевную обработку сверхслабым постоян-

Таблица 1

Выживаемость проростков, суммарное содержание антиоксидантов, активность СОД и интенсивность процессов перекисного окисления липидов (по МДА) у проростков при разной индукции воздействия ПМП на семена растений ($p \leq 0,1$; $p \leq 0,01$)

Table 1

Seedling survival, total antioxidant content, SOD activity, and intensity of lipid peroxidation processes (according to MDA) in seedlings at different induction of PMF exposure to plant seeds ($p \leq 0,1$; $p \leq 0,01$)

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Щирица запрокинутая – <i>Amaránthus retrofléxus</i>						
Выживаемость, %	30,0±3,0	27,0±2,7	33,0±3,3	40,0±4,0	45,0±4,5	50,0±5,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	10,8±0,1	10,6±0,1	10,7±0,1	10,0±0,1	28,1±0,3	10,6±0,1
СОД, мкМ/Г · мин.	20,0±0,2	22,0±0,2	26,0±0,2	38,0±0,4	45,0±0,4	156,0±1,5
МДА, мкМ/Г _{проростка}	0,6±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01	0,4±0,01
Клоповник безлепестный – <i>Lepidium apetalum</i> Willd.						
Выживаемость, %	73,0±7,3	72,0±7,2	75,0±7,5	80,0±8,0	82,0±8,2	90,0±9,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	20,5±0,2	20,5±0,2	30,6±0,3	50,5±0,5	56,3±0,6	104,4±1,0
СОД, мкМ/Г · мин.	12,0±0,01	16,0±0,01	15,0±0,01	36,0±0,04	50,0±0,05	120,0±1,2
МДА, мкМ/Г _{проростка}	0,3±0,01	0,3±0,01	0,4±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01
Лен многолетний – <i>Linum perenne</i> L.						
Выживаемость, %	29,0±2,9	42,0±4,2	46,0±4,6	48,0±4,8	52,0±5,2	50,0±5,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	40,4±0,4	40,2±0,4	40,3±0,4	40,5±0,4	80,6±0,8	90,5±0,9
СОД, мкМ/Г · мин.	20,6±0,2	22,8±0,2	30,4±0,3	60,2±0,6	60,8±0,6	60,6±0,6
МДА, мкМ/Г _{проростка}	0,6±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01	0,5±0,01	0,4±0,01	0,5±0,01
Подорожник большой – <i>Plantágo májor</i>						
Выживаемость, %	15,0±1,5	17,0±1,7	16,0±1,6	16,0±1,6	18,0±1,8	18,0±1,8
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	33,2±0,3	33,3±0,3	33,0±0,3	33,2±0,3	33,2±0,3	33,1±0,3
СОД, мкМ/Г · мин.	10,4±0,1	10,4±0,1	12,0±0,1	10,4±0,1	10,2±0,1	10,4±0,1
МДА, мкМ/Г _{проростка}	1,8±0,02	2,0±0,02	1,9±0,02	1,9±0,02	1,9±0,02	2,7±0,03
Дескуранья Софии – <i>Descurainia sophia</i>						
Выживаемость, %	26,0±2,6	24,0±2,4	27,0±2,7	24,0±2,4	42,0±4,2	47,0±4,7
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	42,2±0,4	42,2±0,4	42,3±0,4	44,2±0,4	100,0±1,0	256,3±2,4
СОД, мкМ/Г · мин.	15,8±0,2	16,0±0,2	18,0±0,2	24,0±0,2	30,6±0,3	40,2±0,4
МДА, мкМ/Г _{проростка}	0,3±0,01	0,4±0,01	0,4±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01	0,4±0,01
Пижма обыкновенная – <i>Tanacétum vulgáre</i>						
Выживаемость, %	44,0±4,4	37,8±3,8	42,0±4,2	46,0±4,6	47,0±4,7	40,0±4,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	42,4±0,4	42,7±0,4	42,1±0,4	42,2±0,4	36,2±0,4	52,6±0,5
СОД, мкМ/Г · мин.	10,0±0,1	12,0±0,1	12,0±0,1	34,0±0,3	48,0±0,5	56,0±0,6
МДА, мкМ/Г _{проростка}	15,0±0,1	16,0±0,1	16,0±0,1	28,0±0,3	36,0±0,4	45,0±0,5
Полынь чернотыльник – <i>Artemisia vulgáris</i>						
Выживаемость, %	46,0±4,6	44,8±4,5	49,0±4,9	50,0±5,0	30,0±3,0	25,0±2,5
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /Г _{проростка}	3,7±0,4	3,7±0,4	3,7±0,4	3,7±0,4	3,5±0,4	3,4±0,3
СОД, мкМ/Г · мин.	30,2±0,3	32,0±0,3	34,0±0,3	34,4±0,3	60,8±0,6	124,0±1,2
МДА, мкМ/Г _{проростка}	10,4±0,1	10,4±0,1	10,5±0,1	20,5±0,2	30,5±0,3	40,4±0,4

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Кровохлебка лекарственная – <i>Sanguisorba officinalis</i>						
Выживаемость, %	19,0±1,9	22,0±2,2	24,0±2,4	30,0±3,0	22,0±2,2	22,0±2,2
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	4,9±0,1	5,0±0,1	15,0±0,2	25,0±0,3	17,2±0,2	15,8±0,2
СОД, мкМ/г · мин.	10,2±0,1	12,0±0,1	16,8±0,1	30,4±0,3	24,0±0,2	22,0±0,2
МДА, мкМ/г проростка	0,6±0,01	0,5±0,01	0,6±0,01	0,7±0,01	0,8±0,01	0,6±0,01
Резуха вислоплодная – <i>Arabis pendula</i> L.						
Выживаемость, %	60,0±6,0	62,0±6,2	60,0±6,0	58,0±5,8	54,0±5,4	50,0±5,0
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	275,0±2,7	270,0±2,7	250,0±2,5	300,0±3,0	300,0±3,0	300,0±3,0
СОД, мкМ/г · мин.	20,2±0,2	22,0±0,2	22,0±0,2	22,0±0,2	34,0±0,3	52,0±0,5
МДА, мкМ/г проростка	1,2±0,01	1,4±0,01	1,6±0,01	2,2±0,02	3,4±0,03	5,6±0,06
Скерда кровельная – <i>Crépis tectorum</i>						
Выживаемость, %	80,0±8,0	92,0±9,2	92,0±9,2	94,0±9,4	98,0±9,8	98,0±9,8
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	98,0±1,0	96,0±1,0	98,0±1,0	102,0±1,0	160,0±1,6	180,0±1,8
СОД, мкМ/г · мин.	10,0±0,1	12,0±0,1	14,0±0,1	20,0±0,2	31,8±0,3	40,5±0,4
МДА, мкМ/г проростка	5,4±0,05	5,6±0,05	5,4±0,05	6,0±0,06	6,8±0,07	7,8±0,08
Полынь якутская – <i>Artemisia jacutica</i> Drob.						
Выживаемость, %	56,0±5,6	60,0±6,0	58,0±5,8	52,0±5,2	48,0±4,8	36,0±3,6
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	176,0±1,7	180,0±1,8	180,0±1,8	186,0±1,8	160,0±1,6	158,0±1,6
СОД, мкМ/г · мин.	0,3±0,003	0,3±0,003	0,2±0,002	0,2±0,002	0,3±0,003	0,3±0,003
МДА, мкМ/г проростка	4,8±0,05	4,6±0,05	4,6±0,05	4,8±0,05	5,8±0,06	7,2±0,07
Пастушья сумка – <i>Capsella bursa-pastoris</i>						
Выживаемость, %	38,2±3,8	38,0±3,8	40,0±4,0	46,4±4,6	54,2±5,4	56,0±5,6
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	143,0±1,4	142,6±1,4	142,8±1,4	154,0±1,5	240,0±2,4	266,0±2,7
СОД, мкМ/г · мин.	0,4±0,004	0,3±0,003	0,3±0,003	0,4±0,004	0,3±0,003	0,4±0,004
МДА, мкМ/г проростка	3,8±0,04	4,0±0,04	3,8±0,04	4,8±0,05	5,2±0,05	6,4±0,06
Иван-чай узколистный – <i>Chamaenérion angustifolium</i>						
Выживаемость, %	56,0±5,6	63,8±6,4	66,2±6,6	64,9±6,5	67,8±6,8	66,5±6,7
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	95,0±1,0	95,0±1,0	98,0±1,0	240,0±2,0	300,0±3,0	320,0±3,0
СОД, мкМ/г · мин.	86,0±0,9	86,0±0,9	88,0±0,9	140,0±1,4	180,0±1,8	260,0±2,6
МДА, мкМ/г проростка	1,5±0,02	1,7±0,02	1,5±0,02	1,6±0,02	2,8±0,03	3,6±0,04
Прострел желтеющий – <i>Pulsatilla orientáli-sibirica</i>						
Выживаемость, %	12,0±1,2	14,0±1,4	13,0±1,3	15,0±1,5	16,0±1,6	18,0±1,8
ΣНМАО, мкг-ЭКВ _{кверц} /г проростка	100,0±1,0	98,6±1,0	102,0±1,0	138,0±1,4	180,6±1,8	178,0±1,8
СОД, мкМ/г · мин.	0,2±0,002	0,2±0,002	0,2±0,002	0,2±0,002	0,3±0,003	0,4±0,004
МДА, мкМ/г проростка	2,8±0,03	3,0±0,03	2,9±0,03	3,5±0,03	4,0±0,04	4,2±0,04

ным магнитным полем с индукцией от 0,2 до 4,0 мТл в течение 24 ч, характеризуются повышенным уровнем процессов перекисного окисления липидов. В зависимости от интенсивности антиоксидантных процессов (суммы низкомолекулярных антиоксидантов и активности супероксиддисмутазы), адаптация проростков проходит в режиме простой или гиперкомпенсации. В слу-

чае гиперкомпенсации происходит повышение выживаемости проростков. Эти эффекты могут быть вызваны магнитными свойствами веществ (молекулы воды, ионы железа, кальция и др.), содержащихся в клетках исследуемых организмов, которые реагируют специфично на изменения индукции сверхмалого ПМП, и приводят к появлению каскада биохимических реакций.

Таблица 2

Расчетные значения (коэффициенты) образования настоящего листа, суммарного содержания антиоксидантов, активности СОД и интенсивности перекисного окисления липидов у проростков при разной интенсивности воздействия сверхслабым ПМП на семена растений ($p \leq 0,1$; $p \leq 0,01$)

Table 2

Estimated values (coefficients) of true leaf formation, total content of antioxidants, SOD activity and intensity of lipid peroxidation in seedlings at different intensity of exposure to superweak PMF on plant seeds ($p \leq 0.1$; $p \leq 0.01$)

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Щирица запрокинутая – <i>Amaránthus retrofléxus</i>						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	0,9	1,1	1,33	1,5	1,67
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	0,98	0,99	0,92	2,6	0,98
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,1	1,3	1,9	2,25	7,8
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	0,66	0,66	0,66	0,83	0,66
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	1,57	1,78	2,14	2,92	6,65
Клоповник безлепестный – <i>Lepidium apetalum</i> Willd.						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	0,99	1,03	1,1	1,12	1,23
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	1,0	1,49	2,46	2,75	5,09
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,33	1,25	3,0	4,17	10,0
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	1,0	1,33	1,0	1,0	1,0
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	1,16	1,03	2,73	3,46	5,25
Лен многолетний – <i>Linum perenne</i> L.						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	1,45	1,59	1,65	1,79	1,72
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	0,99	0,99	1,0	1,99	2,24
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,1	1,47	2,98	2,95	2,94
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	0,66	0,83	0,83	0,66	0,83
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	1,58	1,48	1,79	3,74	3,12
Подорожник большой – <i>Plantágo májor</i>						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	1,13	1,07	0,94	1,2	1,2
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,97
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,0	1,15	1,0	0,98	1,0
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	1,1	1,05	1,05	1,05	1,5
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	0,9	1,0	0,95	0,94	0,66
Дескуранья Софьи – <i>Descurainia sophia</i>						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	0,92	1,04	0,92	1,61	1,8
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	1,0	1,0	1,04	2,37	6,07
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,01	1,14	1,52	1,93	2,54
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	1,33	1,33	1,0	1,0	1,33
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	0,75	0,8	1,28	2,15	3,28
Пижма обыкновенная – <i>Tanacétum vulgáre</i>						
$k_{\text{ОНЛ}}$	1,0	0,86	0,95	1,04	1,07	0,9
$k_{\text{НМАО}}$	1,0	1,12	0,99	0,99	0,83	1,24
$k_{\text{СОД}}$	1,0	1,2	1,2	3,4	4,8	5,6
$k_{\text{ПОЛ}}$	1,0	1,07	1,07	1,87	2,4	3,0
$k_{\text{АОЗ/ПОЛ}}$	1,0	1,08	1,02	1,17	1,17	1,14

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Полынь черныбыльник – <i>Artemisia vulgaris</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	0,86	0,95	1,04	1,07	0,9
k _{НМАО}	1,0	1,12	0,99	0,99	0,83	1,24
k _{СОД}	1,0	1,2	1,2	3,4	4,8	6,6
k _{ПОЛ}	1,0	1,07	1,07	1,87	2,4	3,0
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	1,08	1,02	1,17	1,17	1,14
Кровохлебка лекарственная – <i>Sanguisorba officinalis</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	1,16	1,26	1,58	1,16	1,16
k _{НМАО}	1,0	1,02	3,06	5,1	3,51	3,22
k _{СОД}	1,0	1,18	1,64	2,98	2,35	2,16
k _{ПОЛ}	1,0	0,83	1,0	1,17	1,33	1,0
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	1,32	2,35	3,45	2,2	2,69
Резуха вислоплодная – <i>Arabis pendula</i> L.						
k _{ОНЛ}	1,0	1,03	1,0	0,97	0,9	0,83
k _{НМАО}	1,0	0,98	0,91	1,02	1,09	1,09
k _{СОД}	1,0	1,09	1,09	1,09	1,68	2,57
k _{ПОЛ}	1,0	1,17	1,33	1,83	2,83	4,67
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	0,88	0,75	0,58	0,49	0,39
Скерда кровельная – <i>Crépis tectorum</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	1,15	1,15	1,18	1,23	1,23
k _{НМАО}	1,0	0,98	1,0	1,04	1,63	1,84
k _{СОД}	1,0	1,2	1,4	2,0	3,18	4,05
k _{ПОЛ}	1,0	1,04	1,0	1,11	1,26	1,44
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	1,05	1,2	1,37	1,9	2,05
Полынь якутская – <i>Artemisia jacutica</i> Drob.						
k _{ОНЛ}	1,0	1,07	1,04	0,93	0,86	0,64
k _{НМАО}	1,0	1,02	1,02	1,06	0,9	0,9
k _{СОД}	1,0	1,0	0,67	0,67	1,0	1,0
k _{ПОЛ}	1,0	0,96	0,96	1,0	1,21	1,5
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	1,05	0,88	0,87	0,79	0,63
Пастушья сумка – <i>Capsella bursa-pastoris</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	0,99	1,05	1,21	1,42	1,46
k _{НМАО}	1,0	0,99	0,99	1,08	1,68	1,86
k _{СОД}	1,0	0,75	0,75	1,0	0,75	1,0
k _{ПОЛ}	1,0	1,05	1,0	1,26	1,37	1,68
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	0,83	0,87	0,82	0,88	0,85
Иван-чай узколистный – <i>Chamaenérion angustifolium</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	1,18	1,16	1,75	1,21	1,19
k _{НМАО}	1,0	1,0	1,03	2,53	3,16	3,37
k _{СОД}	1,0	1,0	1,02	1,63	2,09	3,02
k _{ПОЛ}	1,0	1,13	1,0	1,07	1,87	2,4
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	0,88	1,03	1,95	1,4	1,33

Критерий Criteria	ПМП, мТл					
	0	0,2	0,6	1,0	2,0	4,0
Прострел желтеющий – <i>Pulsatilla orientali-sibirica</i>						
k _{ОНЛ}	1,0	1,17	1,08	1,25	1,33	1,5
k _{НМАО}	1,0	0,98	1,02	1,38	1,8	1,78
k _{СОД}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	2,0
k _{ПОЛ}	1,0	1,07	1,04	1,25	1,43	1,5
k _{АОЗ/ПОЛ}	1,0	0,93	0,97	0,95	1,15	1,26

Список литературы / References

- Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Prooxidant-antioxidant system of plants grown from seeds treated with a constant magnetic field. *Журнал физиологии и биохимии стресса = Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2023;19(1):43–48. (In Russ.)
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. *Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире*. Киев: Наукова думка; 1992. 187 с.
Temuryants N.A., Vladimirskiy B.M., Tishkin O.G. Microwave electromagnetic signals in the biological world. Kiev: Naukova Dumka; 1992. 187 p. (In Russ.)
- Бинги В.Н. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы. *Успехи физических наук*. 2003;173(3):265–300. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200303b.0265>
Bingi V.N. Physical problems of the action of weak magnetic fields on biological systems. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2003;173(3):265–300. (In Russ.). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200303b.0265>
- Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Голошапов А.Н., Жижина Г.П. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1999;39(1):26–34.
Burlakova E.B., Konradov A.A., Goloshapov A.N., Zhizhina G.P. New aspects of regularity action of low intensity radiation. *Radiation biology. Radioecology*, 1999; 39(1):26–34. (In Russ.)
- Сердюков Ю.А., Новицкий Ю.И. Действие слабого постоянного магнитного поля на активность антиоксидантных ферментов у проростков редиса. *Физиология растений*. 2013;1(60):66–75. <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>
Serdyukov Yu.A., Novitskiy Yu.I. Effect of a weak constant magnetic field on the activity of antioxidant enzymes in radish seedlings. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2013;1(60):66–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0015330313010065>
- Shabrangi A., Majd A., Sheidai M., Nabyouni M., Dorrani D. Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on the antioxidant enzymes activity of C3 and C4 plants. *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Cambridge, USA, 2010; 1083–1087.
- Слепцов И.В., Шашурин М.М., Журавская А.Н. Кратковременное воздействие постоянного магнитного поля на физиологические, морфологические и биохимические характеристики проростков *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* и *Thlaspi arvense*. *Физиология растений*. 2019;1(66):66–72. <https://doi.org/10.1134/S0015330318050159>
Slepcev I.V., Shashurin M.M., Zhuravskaya A.N. Short-term exposure to a constant magnetic field on the physiological, morphological, and biochemical characteristics of *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa*, and *Thlaspi arvense* seedlings. *Plant physiology*. 2019;1(66):66–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330318050159>
- Барышев М.Г., Касьянов Г.И. Воздействие электромагнитных полей на биохимические процессы в семенах растений. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2002;1:21–23.
Baryshev M.G., Kasyanov G.I. Effect of electromagnetic fields on biochemical processes in plant seeds. *Izvestiya vuzov. Pishhevaya tehnologiya*. 2002;1:21–23. (In Russ.)
- Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Шихлярова А.И., Кузьменко Т.С., Барсукова Л.П., Марьяновская Г.Я., Шейко Е.А., Евстратова О.Ф., Жукова Г.В. Магнитные поля, адаптационные реакции и самоорганизация живых систем. *Биофизика*. 1996;1(41):898–905.
Garkavi L.X., Kvakina E.B., Shihlyarova A.I., Kuzmenko T.S., Barsukova L.P., Maryanovskaya G.Ya., Shejko E.A., Evstratova O.F., Zhukova G.V. Magnetic fields, adaptive reactions and self-organization of living systems. *Biophysics*. 1996;1(41):898–905. (In Russ.)
- Ермаков А.И. *Методы биохимического исследования растений*. Л.: Агропромиздат; 1987. 430 с.
Ermakov A.I. *Methods of biochemical research of plants*. Leningrad: Agropromizdat; 1987. 430 p. (In Russ.)
- Лебедева О.В., Угарова Н.Н., Березин И.В. Кинетическое изучение реакции окисления о-дианизидина перекисью водорода в присутствии пероксидазы из хрена. *Биохимия*. 1977;7(42):1372–1379.
Lebedeva O.V., Ugarkova N.N., Berezin I.V. Kinetic study of the oxidation reaction of o-dianisidine with hydrogen peroxide in the presence of horseradish

- peroxidase. *Biochemistry*. 1977;7(42):1372–1379. (In Russ.)
12. Giannopolitis C.N., Ries S.K. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. *Plant Physiology*. 1977;59:309–314.
13. Лакин Г.Ф. *Биометрия*. М.: Высшая школа; 1980. 293 с.
- Lakin G.F. *Biometrics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1980. 293 p. (In Russ.)
14. Prokop'ev I.A., Filippova G.V., Shein A.A., Gabyshev D.V. Impact of urban anthropogenic pollution on seed production, morphological and biochemical characteristics of chamomile, *Matricaria chamomila* L. *Russian journal of ecology*. 2014;1(45):18–23. <https://doi.org/10.1134/S106741361306009X>
15. Sytar O., Kumar A., Latowski D., Kuczynska P., Strzałka K., Prasad M.N.V. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2013;(35):985–999. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-1169-6>
16. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci*. 2002;(7):405–410.
17. Galland P., Pazur A. Magnetoreception in plants. *Journal of Plant Research*. 2005;6(118):371–389. <https://doi.org/10.1007/s10265-005-0246-y>

Об авторах

ШАШУРИН Михаил Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6785-1948>, AuthorID: 157342, e-mail: inwertaza@mail.ru

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, AuthorID: 88427, e-mail: jan43@mail.ru

About the authors

SHASHURIN, Mikhail Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, AuthorID: 157342, <https://orcid.org/0000-0002-6785-1948> e-mail: inwertaza@mail.ru

ZHURAVSKAYA, Alla Nikolaevna, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, AuthorID: 88427, e-mail: jan43@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 14.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.05.2023

Принята к публикации / Accepted 23.05.2023

Флуктуирующая асимметрия листа *Acer negundo* L. как индикатор состояния организма и качества городской среды

Г. В. Чудновская, О. В. Чернакова✉

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,
г. Иркутск, Российская Федерация
✉ chernakova-o@list.ru

Аннотация

Анализируется выполнение *Acer negundo* L. защитной функции. Оцениваются показатели стабильности развития по флуктуирующей асимметрии листьев в зависимости от влияния антропогенных факторов. Материалами послужили данные, полученные с 25 учетных площадок, заложенных на участках, различающихся по степени воздействия автомобильного транспорта, в 2018–2021 годах в г. Иркутск. Величины показателей стабильности развития каждой учетной площадки определяли, как среднее коэффициентов флуктуирующей асимметрии по восьми учетным признакам собранных на них листьев. Их значения указывают на достаточную устойчивость *A. negundo* к антропогенным воздействиям, в частности, выбросам от автомобильного транспорта, в сравнении с другими видами фанерофитов, участвующих в озеленении на урбанизированной территории. Коэффициент средневзвешенных значений данного показателя между площадками с рекреационных зон и вдоль транспортных магистралей составляет 1,33. Коэффициент корреляции между величинами стабильности развития и расстоянием произрастания *A. negundo* от автомобильных дорог составил $r = -0,64 \pm 0,18$, что подтверждает среднюю связь между этими признаками. Стабильность развития деревьев по четырем классам интенсивности движения автомобильного транспорта (высокое, среднее, низкое и отсутствующее), оценена через корреляционное отношение, величина которого $\eta = 0,70$ демонстрирует высокий уровень связи. С целью ограничения внедрения *A. negundo* в местную флору можно рекомендовать постепенно проводить мероприятия по его удалению в парках, скверах, садах и придомовых территориях, с заменой на виды древесной растительности, хорошо приспособленные к произрастанию на данных местообитаниях.

Ключевые слова: *Acer negundo* L., Иркутск, урбанизированная территория, показатель стабильности развития, флуктуирующая асимметрия, влияние автомобильного транспорта, озеленение, эфекофит, листовая пластинка

Финансирование. Исследования выполнены в рамках темы «Мониторинг состояния животного и растительного мира Восточной Сибири» (рег. номер АААА-А17-117120640050-1), подтемы кафедры технологии в охотничьем и лесном хозяйстве Иркутского ГАУ «Совершенствование оценки биологических ресурсов и технологии производства в охотничьем и лесном хозяйстве Восточной Сибири».

Для цитирования: Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Флуктуирующая асимметрия листа *Acer negundo* L. как индикатор состояния организма и качества городской среды. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):293–302. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

Original article

Fluctuating asymmetry of the *Acer negundo* L. leaf: an indicator of its state and the quality of the urban environment

G. V. Chudnovskaya, O. V. Chernakova✉

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk, Russian Federation
✉ chernakova-o@list.ru

Abstract

The purpose of this study was to analyze the protective function of *Acer negundo* L. by assessing the indicators of developmental stability by fluctuating leave asymmetry depending on the value of the influence of anthropogenic factors. The materials were obtained from 25 test sites on areas that differed in the degree of road transport impact in 2018–2021 in Irkutsk. The values of the indicators of the developmental stability of each test site were determined as the average of the coefficients of fluctuating asymmetry, considering the eight characteristics of the leaves collected from them. These values indicate that *A. negundo* is sufficiently resistant to anthropogenic impacts, particularly the effects of emissions from road transport, compared with other types of phanerophytes involved in the landscaping of urbanized areas. The coefficient of weighted average of this indicator between sites in recreational areas and along highways was 1.33. The correlation coefficient between the values of development stability and the distance of growth of *A. negundo* from highways was $r = -0.64 \pm 0.18$, which confirms the average connection between these characteristics. Analysis of variance was used to assess the stability of tree development in four classes of traffic intensity (high, medium, low, and absent), determined through a correlation ratio, the level of which $\eta = 0.70$ demonstrates a high level of connection. To limit the implementation of *A. negundo* in the local flora, it is recommended that measures be gradually implemented to remove it from parks, squares, gardens, and adjacent territories, with the replacement of woody vegetation species that are well adapted to grow in these habitats.

Keywords: *Acer negundo* L., Irkutsk, urbanized territory, indicator of developmental stability, fluctuating asymmetry, motor traffic, city gardening, epecophyte, leaves

Funding. This study was carried out within the framework of the project “Monitoring of the state of the animal and plant world of Eastern Siberia” (reg. number AAAA-A17-117120640050-1), and the subproject of the Department of Technology in Hunting and Forestry, the Irkutsk State Agrarian University “Improving the assessment of biological resources and production technology in hunting and forestry of Eastern Siberia”.

For citation: Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Fluctuating asymmetry of the *Acer negundo* L. leaf : an indicator of its state and the quality of the urban environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):293–302. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-293-302>

Введение

Проблемы оценки качества зеленых насаждений крупных мегаполисов, к которым, несомненно, можно отнести и г. Иркутск, имеют большую актуальность с точки зрения анализа выполнения ими важнейших функций, прежде всего: эстетических, пыле- и газозащитных, санитарно-гигиенических, планировочных и ряда других. Несомненно, подбор древесных пород, способных отвечать соответствующим требованиям, одна из первостепенных задач научных и практических исследований для решения данного вопроса.

Жилая застройка г. Иркутск, созданная в течение более чем трех веков, сформировалась как сочетание строений разных исторических периодов. До конца XIX в. велась квартальная планировка усадебного типа. Далее начали создаваться городские кварталы с каменной периметральной застройкой с замкнутым внутренним пространством. Во второй половине прошлого века были возведены крупные градостроительные элементы – микрорайоны. Во все периоды строительства города в большей или меньшей мере городские улицы, транспортные магистрали и дворы облагораживались парками, скверами и придомовыми посадками различных древесных, кустарниковых и травянистых видов растений. В настоящее

время озелененные территории общего пользования занимают площадь в 384 га, что в среднем составляет 6,4 м² на 1 человека, при норме 10 м², что явно недостаточно [1].

По нашим данным [2], а также опубликованным результатам других исследователей [3–5], в посадках и лесных насаждениях г. Иркутск выявлено 52 вида деревьев и 54 вида кустарников, из которых 70 (66 %) представляют местную флору, адвентивных, интродуцированных и культивируемых – 36 (34 %) [2, 6], т. е. доля чужеродных видов фанерофитов очень значительна.

Одним из видов, широко используемых в качестве объекта для озеленения в г. Иркутск, является завезенный из Северной Америки *Acer negundo* L. – клен ясенелистный. В.В. Чепинога, С.В. Солодянкина, В.П. Иванова оценивают его распространение в Иркутске как наиболее часто встречаемый вид с интенсивным возобновлением [7]. Появление *A. negundo* в сибирских городах относится к концу XIX в. Впервые он был высажен в окрестностях г. Омск в 1896 г. [7] и в последующие годы стал одной из обычных адвентивных древесных пород по всей территории России и стран бывшего СССР. В Иркутской области он был введен в культуру в 1948 г. сотрудниками ботанического сада Иркутского государственного университета [8].

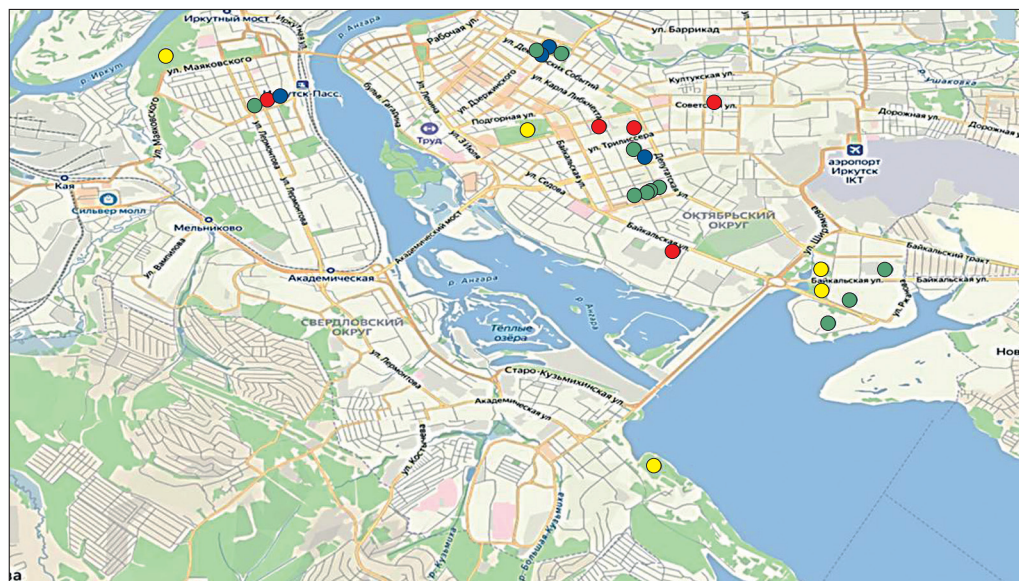
Со второй половины прошлого столетия специалисты стали фиксировать *A. negundo* как *энекофит* в части его вторичного ареала, на нарушенных антропогенных местообитаниях. На территории Иркутской области впервые его обильный самосев был описан в 2004 г. по берегу р. Белая в Усольском районе А.В. Верхожиной и Е.П. Кузнецовой, а его натурализацию в г. Иркутск в 2005 г. отметили В.В. Чепинога, Б. Батбаяр [9]. В связи с этим обстоятельством ряд исследователей ставят вопрос о возможности дальнейшего использования данного растения в зеленых посадках населенных пунктов, так как он представляет серьезную угрозу для существования представителей местной флоры, в том числе и в естественных лесных фитоценозах, по причине его способностей к быстрому росту, обильному плодоношению, высокой доле прорастания семян, раннему наступлению стадии плодоношения и большой устойчивости к неблагоприятным факторам внешней среды [7, 10–12].

При этом быстрое и интенсивное уничтожение *A. negundo* в городских посадках может нанести вред экологической обстановке. По мнению М.В. Костиной, О.И. Ясинской, Н.С. Барабан-

щикова, исключение из зеленого строительства в г. Москва *A. negundo*, который составляет до 40 % от всех деревьев, *нежелательно* [11], но там, где другие виды могут успешно расти, его необходимо полностью истребить. В качестве его замены можно использовать *Acer ginnala* Maxim., *Populus alba* L. и *Padus avium* Mill., которые, по нашим данным, достаточно благополучно произрастают на урбанизированных территориях [13–15].

Исследований по успешности использования *A. negundo* в озеленении г. Иркутск ранее не проводилось, в связи с этим целью нашей работы является анализ с помощью оценки показателей стабильности развития по флуктуирующей асимметрии листьев.

Листовая пластинка является чувствительным индикатором негативного воздействия на растение хозяйственной деятельности человека, которое многократно усиливается в крупных мегаполисах в связи с сосредоточением в них промышленных объектов и напряженной транспортной обстановкой [16]. При этом лист имеет билатеральный тип строения, а зафиксированная у него асимметрия хорошо определяемых признаков мо-



Пробные площадки *Acer negundo* L.:

- в транспортной зоне с интенсивным движением автомобильного транспорта
- в транспортной зоне со средней интенсивностью движения автомобильного транспорта
- в селитебной зоне
- в рекреационной зоне

Рис. 1. Карта-схема г. Иркутск с расположением пробных площадок сбора материала *Acer negundo* L.

Fig. 1. Map-layout of Irkutsk with trial sites for collecting *Acer negundo* L.

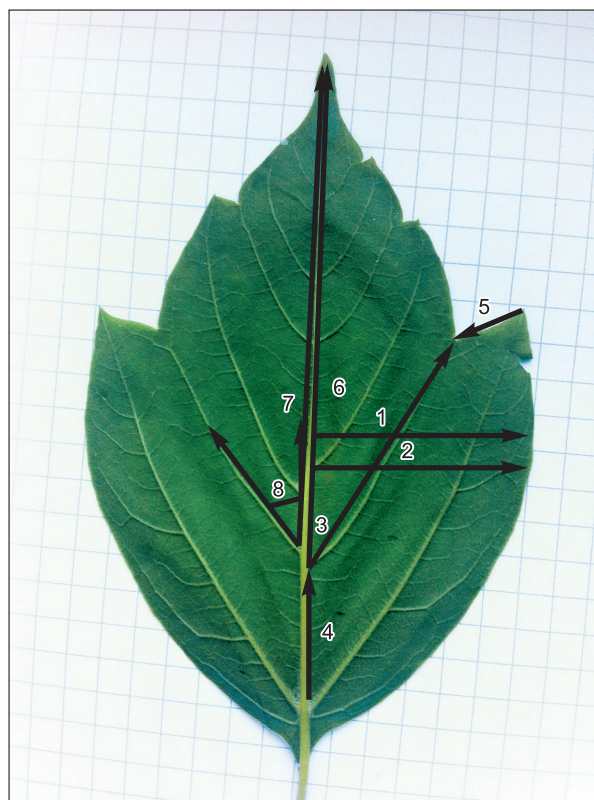


Рис. 2. Промеры верхней листовой пластинки *Acer negundo* L. для оценки флуктуирующей асимметрии.

1 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная на середине ее длины; 2 – ширина половинки листовой пластинки, измеренная от основания третьей жилки второго порядка; 3 – длина второй жилки второго порядка; 4 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 5 – расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка; 6 – расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 7 – расстояние от основания третьей жилки второго порядка до вершины листовой пластинки; 8 – угол между центральной жилкой и второй жилкой второго порядка

Fig. 2. Measurements of the upper leaf blade of *Acer negundo* L. to assess the fluctuating asymmetry.

1 – the width of the half of the leaf blade, measured in the middle of its length; 2 – the width of the half of the leaf blade, measured from the base of the third vein of the second order; 3 – the length of the second vein of the second order; 4 – the distance between the bases of the first and second veins of the second order; 5 – the distance between the ends of the first and second veins of the second order; 6 – the distance from the base of the second vein of the second order to the top of the leaf blade; 7 – the distance from the base of the third vein of the second order to the top of the leaf blade; 8 – the angle between the central vein and the second vein of the second order

жет служить показателем величины изменения и, как следствие, уровня прессинга на растения неблагоприятных факторов среды обитания, а также мерой степени устойчивости конкретного вида на параметры их действия.

Материалы и методика

Объект исследования – *Acer negundo* L. – клен ясенелистный, произрастающий на территориях с различным уровнем антропогенного воздействия.

Материалами исследования послужили данные, полученные с учетных площадок, находившихся на участках, различающихся по степени воздействия автомобильного транспорта, в 2018–2021 годах. Всего было заложено 25 пробных площадей, из них вдоль транспортных магистралей с различной интенсивностью движения автомобильного транспорта – 9, причем располагали их на различной удаленности от дорог; на придомовых территориях – 11 и в рекреационных зонах – 5 (рис. 1).

Данные о напряженности транспортного потока получены из материалов программы комплексного развития транспортной инфраструктуры г. Иркутск [17], а в случае их отсутствия замеры проводили самостоятельно в течение недели в 8:00, 13:00 и 16:00 и находили средние показатели трафика.

Отбор материала производили с использованием методических рекомендаций по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) [18], а также с учетом опыта исследователей, работающих по данному направлению [16, 19–22], в конце вегетации в августе–сентябре. На каждой площадке случайной выборкой собирали по 50 листьев с нижней части кроны деревьев. Измерения осуществляли на верхней непарной листовой пластинке с помощью измерительного циркуля, линейки и транспортира с точностью до 1 мм и 1°. На каждом листе фиксировали по 8 промеров с их левой и правой стороны, хорошо определяемых для клена ясенелистного (рис. 2).

Величину асимметрии листовых пластинок для мерных признаков находили как разницу между ними с левой и правой половинок, поделенную на их сумму.

Для каждой листовой пластинки вычисляли величину флуктуирующей асимметрии всех признаков по формуле

$$\Phi A = \left| \frac{L - R}{L + R} \right|,$$

где ΦA – величина флуктуирующей асимметрии листовой пластинки по признаку; L – признак

левой половинки листовой пластинки; R – признак правой половинки листовой пластинки.

Интегральные показатели стабильности развития (средние по различиям) рассчитывали как среднее арифметическое суммы относительной величины асимметрии по всем признакам у каждой особи, отнесенное к числу используемых признаков [18].

Все полученные данные были обработаны методами вариационной статистики с использованием программы Excel. Коэффициент вариации (C) находили через среднее квадратичное отклонение: результат его деления на корень квадратный из количества измеренных листьев умножали на 100 %. Для подтверждения точности полученных результатов рассчитывали ошибку среднего арифметического (m), а для оценки ее уровня определяли степень достоверности (t) как частное от деления средних значений ФА и величин стабильности развития на найденные для них ошибки.

Для определения значимости снижения стабильности развития по флуктуирующей асимметрии листьев использовали закономерности, заложенные в пятибалльной шкале оценки качества среды по степени нарушения *Betula pendula* Roth, утвержденные в рекомендациях по выполнению оценки среды по состоянию живых существ МПР России [18]. Непосредственно использовать данную шкалу не всегда возможно, так как у разных видов древесных растений уровень величин, характеризующий условно-нормальное качество среды, может значительно отличаться от березы повислой. С использованием данной шкалы были предложены «коэффициенты различия степени развития», которые соответствуют значениям интегральных показателей флуктуирующей асимметрии, приведенным в ней, и позволяют определить величину устойчивости изученного вида к факторам влияния:

- условно нормальный ход развития – до 1,11 (соответствует 0,040–0,044 шкалы);
- высокая устойчивость – 1,12–1,24 (0,045–0,049 шкалы);
- средняя устойчивость – 1,25–1,35 (0,050–0,054 шкалы);
- низкая устойчивость – более 1,35 (>0,054 шкалы).

За коэффициент, равный 1,00, приняты показатели территорий с отсутствием воздействия автомобильного транспорта, то есть рекреационные зоны.

Для определения влияния на величину показателей стабильности развития отдельных экземпляров клена ясенелистного расстояния от дорог с различной интенсивностью движения автомобильного транспорта проведены корреляционный и дисперсионный анализы полученных данных для оценки их уровня и степени достоверности.

Результаты исследования и обсуждение

По результатам исследований наивысшие средние показатели флуктуирующей асимметрии листовых пластинок для большинства деревьев, произрастающих в различных зонах (транспортной, жилой и рекреационной), показал признак, характеризующий расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка, а самый низкий – расстояние от основания второй жилки второго порядка до вершины листовой пластинки, что доказывает возможность сравнения данных маркеров для оценки влияния на жизненное состояние клена ясенелистного качества местообитания.

Наивысшую величину интегрального показателя флуктуирующей асимметрии на большинстве площадок продемонстрировал признак, характеризующий расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка. Проведенные расчеты выявили крайне высокую изменчивость исследованных показателей. Причем у деревьев, произрастающих на придомовых территориях и в рекреационных зонах, меньше всего варьируют признаки 2, 5 и 8. У листьев, собранных с экземпляров, растущих вдоль транспортных магистралей, самый низкий коэффициент изменчивости приходится также на угол между центральной жилкой и второй жилкой второго порядка (показатель 8) и, кроме этого, на ширину половинки листовой пластинки, измеренную на середине ее длины. Сильнее всего на большинстве учетных площадок различались средние расстояния между основаниями первой и второй жилок второго порядка у левой и правой половинок листа.

Полученные результаты демонстрируют, что показатели стабильности развития *A. negundo* на площадках, расположенных на придомовых территориях, вдоль автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения и на значительном удалении от транспортных магистралей, находятся на одном уровне со значениями, определенными для рекреационных участков, которые

Показатели стабильности развития *Acer negundo* L. на учетных площадкахIndicators of *Acer negundo* L. stability development in test sites

Зона произрастания	Номер учетной площадки	Показатели стабильности развития	Коэффициент вариации С, %	Степень достоверности t
Транспортная зона с интенсивным движением автотранспорта	1	0,060±0,00397	46,76	15,11
	2	0,068±0,00603	62,70	11,28
	3	0,073±0,00663	64,26	11,01
	4	0,064±0,00657	72,54	9,74
	5	0,080±0,00606	53,53	13,20
Средний показатель по зоне		0,069±0,00269		
Транспортная зона со средней интенсивностью движения автотранспорта	6	0,069±0,00679	69,57	10,16
	7	0,056±0,00546	68,94	10,26
	8	0,059±0,00526	63,08	11,22
	9	0,058±0,00587	71,51	9,88
Средний показатель по зоне		0,061±0,00297		
Селитебная	10	0,069±0,00502	51,45	13,75
	11	0,054±0,00624	81,74	8,65
	12	0,050±0,00411	58,14	12,17
	13	0,054±0,00458	59,97	11,79
	14	0,050±0,00382	54,05	13,09
	15	0,061±0,00500	56,90	12,20
	16	0,049±0,00516	55,14	9,50
	17	0,051±0,00389	53,87	13,11
	18	0,051±0,00571	79,13	8,93
	19	0,045±0,00347	54,48	12,97
	20	0,051±0,00486	67,35	10,49
Средний показатель по зоне		0,053±0,00142		
Рекреационная	21	0,049±0,00372	53,62	13,17
	22	0,058±0,00552	67,36	10,51
	23	0,050±0,00433	61,28	11,55
	24	0,050±0,00413	58,41	12,11
	25	0,050±0,00376	53,17	13,30
Средний показатель по зоне		0,052±0,00196		

взяты за точку отсчета. Увеличение данного показателя на учетных участках, разбитых в непосредственной близости к магистралям с максимально интенсивным потоком автотранспорта, составляет 32,7 % и по своему уровню близко к данным по другим видам фанерофитов, участвующим в озеленении на урбанизированной территории, например, *Betula pendula* Roth и *Padus avium* Mill., у которых он расценен нами в 1,33 и 1,30 соответственно [15, 23, 24] (см. таблицу). А.В. Боброва и Е.В. Пименова также отмечают большую толерантность данного вида, в сравнении с березой повислой, к загрязнению атмосфер-

ного воздуха при оценке патологий их листьев и содержанию в них фенольных соединений [25].

Коэффициент линейной корреляции между величинами стабильности развития и расстоянием произрастания *A. negundo* от автомобильных дорог составил $r = -0,64 \pm 0,18$, что подтверждает среднюю связь между этими показателями (рис. 3).

При проведении дисперсионного анализа по оценке стабильности развития деревьев от интенсивности движения автомобильного транспорта учетные площадки были разбиты на четыре класса по данному фактору (высокая, средняя, низкая

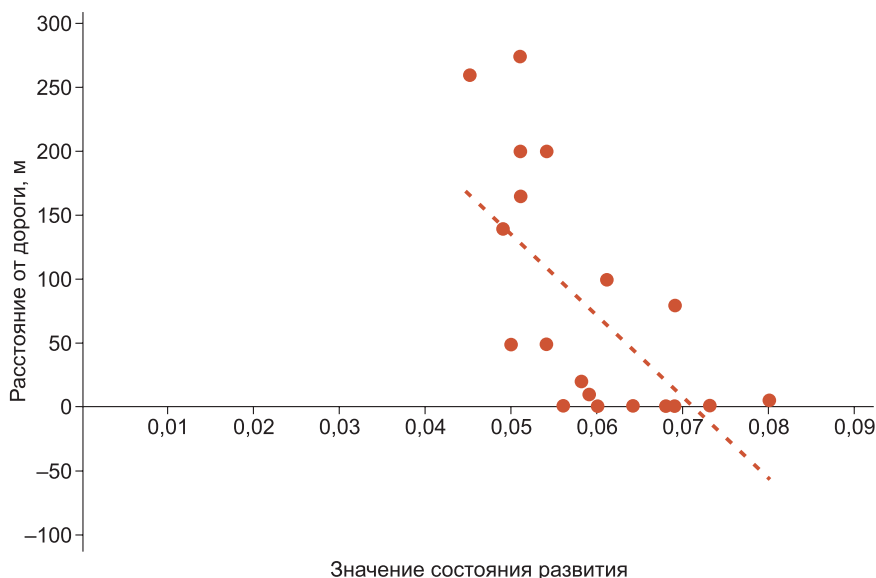


Рис. 3. Линейная корреляция между показателями стабильности развития *Acer negundo* L. и расстоянием до дороги

Fig. 3. Linear correlation between the indicators of *Acer negundo* L. stability development and distance to the road

и отсутствующая). Степень влияния трафика составляет $\eta^2=0,4826$. Значение критерия Фишера – $F = 6,5$ больше табличного. Степень воздействия фактора определяли через корреляционное отношение, величина которого $\eta = 0,70$ по шкале Чеддока демонстрирует высокий уровень связи.

Заключение

Результаты исследований показали, что стабильность развития по флуктуирующей асимметрии листьев указывает на определенную выносливость *A. negundo* к антропогенным воздействиям, в частности, выбросам от автомобильного транспорта. Коэффициент различия степени развития между площадками с рекреационных зон и вдоль транспортных магистралей с высокой интенсивностью движения составляет 1,33. У экземпляров, обследованных в транспортной зоне со средней интенсивностью движения, в сравнении с рекреационными участками, коэффициент – 1,17; в селитебной, в сравнении с рекреационной, 1,02. То есть клен ясенелистный демонстрирует условно-нормальный ход развития в жилой зоне, высокую устойчивость вдоль автомобильных дорог с невысоким потоком автомобильного транспорта и среднюю у дорог с напряженным транспортным потоком. При этом коэффициент линейной корреляции показывает, что на физиологическое состояние клена влияет расстояние от его мест произрастания до дорог.

Несмотря на высокую способность *A. negundo* противостоять негативным факторам среды, выраженную в том числе и в показателях флуктуирующей асимметрии, дальнейшие посадки данного вида не целесообразны в связи с его инвазивностью. С целью ограничения внедрения в местную флору данного вида, можно рекомендовать постепенно проводить мероприятия по его удалению в парках, скверах, садах и придомовых территориях, с заменой на виды древесной растительности, хорошо приспособленные к произрастанию на данных местообитаниях. Уничтожение клена ясенелистного, высаженного на заградительных полосах вдоль автомобильных дорог города, на наш взгляд, может усугубить неблагоприятную экологическую ситуацию, так как в настоящее время в г. Иркутск имеется дефицит зеленых насаждений.

Список литературы / References

1. СП 42.13330.2016. Свод правил. Градостроительство. Планировка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89. Утвержден Приказом Минстроя России от 30.12.2016 № 1034/пр. М.; 2016. 125 с.
SP 42.13330.2016. Set of rules. Urban planning. Planning of urban and rural settlements. Updated version of SNiP 2.07.01-89. Approved by the Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 30, 2016, No. 1034/pr. Moscow; 2016. (In Russ.)
2. Чернакова О.В., Чудновская Г.В. Современное состояние, перспективы и проблемы в озеленении города Иркутска. Вестник ИргСХА. 2018;88:97–107.

Chernakova O.V., Chudnovskaya G.V. The current state, prospects and problems in the landscaping of the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2018;88:97–107. (In Russ.)

3. Виньковская О.П. Флорогенетические основы озеленения г. Иркутска и его окрестностей. *Вестник ИрГСХА*. 2011;3(44):47–58.

Vinkovskaya O.P. Florogenetic bases of landscaping in Irkutsk and its environs. *Vestnik IrGSHA*. 2011;3(44):47–58. (In Russ.)

4. Камалетдинова С.И., Виньковская О.П. Фанерофиты г. Иркутска. *Вестник ИрГСХА*. 2015;68:28–36.

Kamaletdinova S.I., Vinkovskaya O.P. Fanerofity g. Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2015;68:28–36. (In Russ.)

5. Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения). Ред. Л.И. Малышев. Иркутск: Изд-во ИГУ; 2008. 327 с.

Synopsis of the flora of the Irkutsk region (vascular plants). Ed. L.I. Malyshev. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House; 2008. (In Russ.)

6. Хохлова П.Г., Зацепина О.С., Васильева С.Е. К вопросу изучения истории интродукции древесно-кустарниковых растений в Иркутской области. *Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: Материалы научно-практической конференции молодых ученых (Иркутск, 28–29 марта 2019 г.)*. Иркутск; 2019:51–59.

Hohlova P.G., Zacepina O.S., Vasil'eva S.E. On the issue of studying the history of the introduction of trees and shrubs in the Irkutsk region. *Scientific research and development for implementation in the agro-industrial complex: Proceedings of the scientific and practical conference of young scientists (Irkutsk, March 28–29, 2019)*. Irkutsk; 2019:51–59. (In Russ.)

7. Чепинога В.В., Солодянкина С.В., Иванова В.П. Особенности распространения некоторых культивируемых древесных растений в историческом центре города Иркутска (Восточная Сибирь). *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2017;40:102–115. <https://doi.org/10.17223/19988591/40/6>

Chepinoga V.V., Solodjankina S.V., Ivanova V.P. Features of the distribution of some cultivated woody plants in the historical center of the city of Irkutsk (Eastern Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2017;40:102–115. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/40/6>

8. Кузеванов В.Я., Сизых С.В. Ресурсы Ботанического сада Иркутского государственного университета: научные, образовательные и социально-экологические аспекты: справочно-методическое пособие. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета; 2005:101.

Kuzevanov V.Ja., Sizyh S.V. *Resources of the Botanical Garden of the Irkutsk State University: scientific, educational and socio-ecological aspects: reference and methodological guide*. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House; 2005:101. (In Russ.)

9. Чепинога В.В., Верхозина А.В. К флоре эргазиофитов Иркутской области. *Материалы к флоре Байкальской Сибири*. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета. 2007;1:161–172.

Chepinoga V.V., Verhozina A.V. To the flora of ergasiophytes of the Irkutsk region. *Materials for the flora of Baikal Siberia*. Irkutsk: Irkutsk State University Publishing House. 2007;1:161–172. (In Russ.)

10. Калита Г.А., Калита О.Н. Клен ясенелистный (Американский) – современное состояние интродукции. *Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: Материалы VII международной научно-практической конференции (Хабаровск, 04 мая 2018 г.)*. Хабаровск, 2018:70–72.

Kalita G.A., Kalita O. N. Ash-leaved maple (American) – the current state of introduction. *Philosophy of modern nature management in the Amur river basin: Proceedings of the 7th international scientific and practical conference (Khabarovsk, May 04, 2018)*. Khabarovsk, 2018:70–72. (In Russ.)

11. Костина М.В., Ясинская О.И., Барабанщиков Н.С. Разработка научно-обоснованного подхода использования клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) в озеленении Москвы. *Социально-экологические технологии*. 2017;3:51–64.

Kostina M.V., Jasinskaja O.I., Barabanshnikov N.S. Development of a science-based approach to the use of ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) in the landscaping of Moscow. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2017;3:51–64. (In Russ.)

12. Леонтьев Д.Ф., Зверева К.А. Инвазия клена ясенелистного и облепихи по Московскому тракту на участке «Иркутск–Ангарск». *Бюллетень науки и практики = Bulletin of Science and Practice*. 2016;11(12):40–44. <https://doi.org/10.5281/zenodo.166777>

Leontyev D.F., Zvereva K.A. The invasion of ash-leaved maple and sea buckthorn on the Moscow path on site Irkutsk-Angarsk. *Bulletin of Science and Practice*. 2016;11(12):40–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.166777>

13. Чернакова О.В. Оценка стабильности развития *Acer ginnala* Maxim. в г. Иркутске по флуктуирующей асимметрии листьев. *Вестник ИрГСХА*. 2019;95:84–92.

Chernakova O.V. Evaluation of developmental stability of *Acer ginnala* Maxim. in Irkutsk by fluctuating leaf asymmetry. *Vestnik IrGSHA*. 2019;95:84–92. (In Russ.)

14. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Оценка уровня стабильности развития *Populus alba* L. по флуктуирующей асимметрии листьев в г. Иркутске. Современные проблемы охотоведения: *Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием в рамках VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию Иркутского ГАУ «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии (г. Иркутск, 22–26 мая 2019 г.)*. Иркутск; 2019: 218–233.

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Evaluation of the level of developmental stability of *Populus alba* L. by fluctuating leaf asymmetry in Irkutsk. *Modern problems of game management: Proceedings of the national scientific and practical conference with international participation within the framework of the 8th International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Irkutsk State Agrarian University "Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia" (Irkutsk, May 22–26, 2019)*. Irkutsk; 2019:218–233. (In Russ.)

15. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Влияние автомобильного транспорта на флуктуирующую асимметрию листьев представителей рода *Padus*. *Вестник ИРГСХА*. 2019;91:92–100.

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Influence of road transport on fluctuating asymmetry of leaves in representatives of the genus *Padus*. *Vestnik IrGSHA*. 2019; 91:92–100. (In Russ.)

16. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Практика оценки здоровья среды: эффективность применения показателя флуктуирующей асимметрии и других биоиндикационных подходов. *Жизнь Земли*. 2018;40(2):183–198.

Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L. The practice of environmental health assessment: efficiency of fluctuating asymmetry and other bioindication-based approaches. *Zhizn Zemli = Life of the Earth*. 2018;40(2):183–198. (In Russ.)

17. Решение Думы города Иркутска «Об утверждении программы комплексного развития транспортной инфраструктуры города Иркутска на 2016–2025 годы» от 30 сентября 2016 года № 006-20-250396/6. *Официальный портал города Иркутска*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/444821573> (дата обращения 16.11.2019).

Decision of the Duma of the city of Irkutsk "On approval of the program for the integrated development of the transport infrastructure of the city of Irkutsk for 2016–2025" dated September 30, 2016 No. 006-20-250396/6. *Official portal of the city of Irkutsk*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/444821573>. (date of access: 16 November, 2019). (In Russ.)

18. *Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур)*. Распоряжение Росэкологии от 16.10.2003 № 660. М.: Наука; 2003. 24 с.

Guidelines for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures). Decree of Ros ecology dated 16.10.2003 № 660. Moscow: Nauka; 2003. (In Russ.)

19. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Морфогенетический подход к оценке среды: исследование стабильности развития. *Онтогенез*. 2017; 48(6):433–442. <https://doi.org/10.7868/S0475145017060064>

Zakharov V.M., Trofimov I.E. Morphogenetic approach to estimation of health of environment: Study of developmental stability. *Rus. J. Dev. Biol.* 2017;(48):369–378. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1062360417060066>

20. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):115–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002332920020125>

Zaharov V.M., Trofimov I.E. Assessment of biodiversity status: study of developmental stability. *Biology Bulletin*. 2020;(2):115–123. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020125>

21. Захаров В.М., Шадрина Е.Г., Турмухаметова Е.Г., Иванцова Н.В., Солдатова В.Ю., Шарова Н.А., Трофимов И.Е. Оценка состояния растений по стабильности развития в естественных и антропогенных условиях (флуктуирующая асимметрия признаков листа березы повислой *Betula pendula* L.). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2020;(2):191–196. <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>

Zakharov V.M., Shadrina E.G., Turmukhametova N.V., Ivantsova E.N., Shikalova E.A., Soldatova V.Yu., Sharova N.A., Trofimov I.E. Assessment of Plant Status by the Stability of Development in Natural and Anthropogenic Conditions (Fluctuating Asymmetry of Leaf Features of the Silver Birch, *Betula pendula* Roth). *Biology Bulletin*. 2020;(2):191–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002332920020113>

22. Шадрина Е.Г., Луцкан Е.Н. Влияние транспортной нагрузки и атмосферного загрязнения на показатель флуктуирующей асимметрии березы плосколистной и территории Алданского района Республики Саха (Якутия). *Наука и образование*. 2016;1(81):121–126.

Shadrina E.G., Luckan E.N. Influence of traffic load and atmospheric pollution on the index of fluctuating asymmetry of flat-leaved birch and the territory of the Aldan region of the Republic of Sakha (Yakutia). *Nauka i obrazovanie*. 2016;1(81):121–126. (In Russ.)

23. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Использование флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth для оценки экологического состояния территории г. Иркутска. *Вестник ИРГСХА*. 2018; 89:96–104.

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. The use of fluctuating leaf asymmetry of *Betula pendula* Roth to assess the ecological state of the territory of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2018; 89:96–104. (In Russ.)

24. Чудновская Г.В., Чернакова О.В. Показатели стабильности развития *Betula pendula* Roth, участвующей в озеленении г. Иркутска. *Вестник ИРГСХА*. 2020;100:100–111.

Chudnovskaya G.V., Chernakova O.V. Indicators of the developmental stability of *Betula pendula* Roth participating in the landscaping of the city of Irkutsk. *Vestnik IrGSHA*. 2020;100:100–111. (In Russ.)

25. Боброва А.В., Пименова Е.В. Биоиндикация загрязнения воздуха по характеристикам листьев березы повислой и клена ясенелистного. *Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование: Труды шестой международной научно-практической конференции (Москва, 29 ноября–01 декабря 2018 г.)*. М.; 2018:450–455.

Bobrova A.V., Pimenova E.V. Bioindication of air pollution on leaf characteristics of *Betula Pendula* and *Acer Negundo*. *Indication of the state of the environment: theory, practice, education: Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference (Moscow, November 29–December 01, 2018)*. Moscow; 2018: 450–455. (In Russ.)

Об авторах

ЧУДНОВСКАЯ Галина Валерьевна, кандидат биологических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, AuthorID: 475191, e-mail: g.chudnowskaya2011@yandex.ru

ЧЕРНАКОВА Ольга Владимировна, старший преподаватель, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, AuthorID: 1024201, e-mail: chernakova-o@list.ru

About the authors

CHUDNOVSKAYA, Galina Valeryevna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3119-1693>, AuthorID: 475191, e-mail: g.chudnowskaya2011@yandex.ru

CHERNAKOVA, Olga Vladimirovna, Senior Lecturer, <https://doi.org/0000-0002-3283-9703>, AuthorID: 1024201, e-mail: chernakova-o@list.ru

Поступила в редакцию / Submitted 10.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.04.2023

Принята к публикации / Accepted 18.05.2023

Биологические ресурсы

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-303-311>

Оригинальная статья

Индивидуальный участок обитания и суточные перемещения самца бурого медведя (*Ursus arctos*) в условиях средней тайги Якутии по результатам применения спутниковых GPS-ошейников

Н. В. Мамаев✉

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

✉ Mamaev_88@bk.ru

Аннотация

С использованием глобальной системы навигации проведены исследования, позволяющие охарактеризовать ранее недостаточно изученные аспекты использования пространства и перемещения бурого медведя Якутии. Впервые для региона приводятся данные по использованию бурым медведем территории после выхода из берлоги. Применен метод дистанционного исследования с использованием спутникового радиоошейника. За 55 дней было получено 1424 локации и собрана информация по 52 суточным перемещениям. Площадь весенне-летнего участка обитания взрослого самца бурого медведя, рассчитанная методом минимального выпуклого полигона с включением 100 % локаций, составляет 463 км². По методу фиксированного ядра размер участка обитания составляет 354,2 км², в том числе ядерная зона – 33,5 км². В среднем за сутки самец бурого медведя за весь период отслеживания перемещался на 11,8 км (в пределах 0,95–28,5 км). Наибольшие показатели суточного хода отмечались в первой (15,3±1,79 км) и второй (15,5±1,68 км) декадах июня.

Ключевые слова: бурый медведь, участок обитания, спутниковое слежение, пространственное распределение, суточный ход, суточная активность

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР №121020500194-9).

Благодарности. Автор выражает благодарность директору ИБПК СО РАН к.б.н. Охлопкову И.М., главе МО Баппагайского наслега Николаеву Е.А., старшему инспектору Мирнинского комитета охраны природы Сыромятникову Е.Е. за организацию и проведение отлова и мечения спутниковым ошейником бурого медведя, инженеру-исследователю ИБПК СО РАН Кириллину Р.А. за техническое сопровождение проекта.

Для цитирования: Мамаев Н.В. Индивидуальный участок обитания и суточные перемещения самца бурого медведя (*Ursus arctos*) в условиях средней тайги Якутии по результатам применения спутниковых GPS-ошейников. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):303–311. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-303-311>

Original article

Individual home range and daily movements of the male brown bear (*Ursus arctos*) in the middle taiga of Yakutia based on the results of GPS satellite collars

N. V. Mamaev✉

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

✉ Mamaev_88@bk.ru

Abstract

The global navigation system allowed us to study the ecology of the brown bear (*Ursus arctos*) in Yakutia, its space use, and movements. Data on the activity of brown bear in the territory of the region after leaving the den are pre-

sented for the first time. The study period lasted for 55 days, during which we obtained 1424 locations and collected information on 52 daily scale movements of brown bear using a satellite collar. Analysis of the data showed that the area of the spring-summer home range of an adult male brown bear, calculated using the method of the minimum convex polygon with inclusion of 100% locations, was 463 km². According to the fixed core method, the size of the home range area was 354.2 km², including a core area size of 33.5 km². On average, a male brown bear moved 11.8 km per day for the entire tracking period (limit of 0.95–28.5 km). The highest indicators of the daily run by male brown bear were registered in the first (15.3±1.79 km) and second (15.5±1.68 km) ten days in June compared to other months.

Keywords: brown bear, home range, satellite tracking, spatial distribution, diurnal variation, diurnal activity

Funding. This study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project “Populations and communities of animals in aquatic and terrestrial ecosystems of the permafrost zone of the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and stability under natural and anthropogenic impacts” (project number: 0297-2021-0044, registration number: 121020500194-9).

Acknowledgements. The authors are grateful to I.M. Okhlopkov, Director, IBPC SB RAS, E.A. Nikolaev, Head of the Bappagaitsky Nasleg, E.E. Syromyatnikov, Senior Inspector, Mirny Committee for Nature Conservation, for organizing and carrying out trapping and marking with a satellite collar of a brown bear, R.A. Kirillin, Research Engineer, IBPC SB RAS, for technical support of the project.

For citation: Mamaev N.V. Individual home range and daily movements of the male brown bear (*Ursus arctos*) in the middle taiga of Yakutia based on the results of GPS satellite collars. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):303–311. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-303-311>

Введение

Понятие участка обитания в настоящее время является фундаментальным для построения основных современных концепций в исследованиях использования территории дикими животными. Участок обитания животного – это площадь, на которой оно обитает, занимаясь повседневной деятельностью по поиску пищи, спариванию и уходу за детенышами [1]. Знание размеров участков обитания животных требуется для определения площадей территорий, необходимых для существования отдельных особей и их группировок, что важно для сохранения их популяций.

Во всем мире с начала второй половины XX в. успешно применяются методы дистанционного слежения с целью мониторинга популяций животных, изучения пространственной экологии и физиологии [2–4]. Применение GPS-ошейников позволяет получать более точные данные об экологии вида, оптимизировать мониторинг использования пространства изучаемыми животными, так как предоставляет своевременную и актуальную информацию о местонахождении животных. В условиях средней тайги с выраженным рельефом, где нет возможности проводить прямые визуальные наблюдения за животными, дистанционные методы слежения для изучения перемещений и расселения животных являются самыми оптимальными. Кроме того, их применение позволяет минимизировать уровень беспокойства животных со стороны человека [5].

Участки обитания бурого медведя на Северо-Востоке и Дальнем Востоке России, и тем более в Якутии, остаются неизученными в связи с многочисленностью исследований, применяющих методы радиотелеметрии и спутникового слежения за животными. До настоящего времени инструментальные методы, позволяющие достоверно изучать использование медведями территории, применялись только в Приморском крае, на Камчатке и Сахалине, где удалось оценить размеры годовых и сезонных участков обитания самцов и самок бурого медведя, протяженность их суточных и сезонных перемещений [6–14]. Для Якутии данный вопрос рассматривается впервые.

Целью настоящей работы является определение методом дистанционного отслеживания границ участка обитания и размеров суточных перемещений бурого медведя на территории средней тайги Западной Якутии.

Материал и методы

Работа проведена на территории Западной Якутии вблизи пос. Чернышевский Мирнинского района, где 22 мая 2012 г. был помечен взрослый самец (10–13 лет) бурого медведя ошейником российского производства «Пульсар» (ООО «ЭС-ПАС», Россия) с приемником GPS. Отлов медведя проводили с помощью специально изготовленной клетки с установленной внутри приманкой. Для оснащения передатчиком хищника обездвигивали при помощи дистанционного

инъектора Dan-inject (Дания). Для иммобилизации применяли золетил (Zoletil, Virbac, Франция, 50 % тилетамина гидрохлорид и 50 % золазепам гидрохлорид) в рекомендуемых дозах [15].

Всего в период с 22.05.2012 г. по 16.07.2012 г. (55 дней) было передано 1424 локации, в среднем за сутки – 25 локаций. В зависимости от силы сигнала спутникового передатчика, которая зависела от местонахождения зверя, число локаций варьировало от 9 до 49 в сутки. Преждевременное прекращение поступления спутниковых сигналов, возможно, связано с повреждением прибора во время схваток с другими медведями в период гона или в борьбе за территорию. В целом передатчик был рассчитан на функционирование в течение 9 месяцев и более.

Оценка размера участка обитания может быть сложной задачей, потому что, по сути, это включает в себя попытку количественного определения когнитивной карты, которую животное воспринимает на используемой им территории. Кроме того, вопросы оценки участка обитания возникают при рассмотрении вопроса о том, следует ли включать области, которые используются очень мало, или следует учитывать области между крайними точками локаций. Поэтому расчет площади участков обитания помеченного самца бурого медведя производился двумя методами: методом минимального выпуклого полигона (Minimum Convex Polygon, MCP) [16] с включением 100 % локаций, а также методом фиксированного ядра (метод зернела) [17].

Первый метод самый примитивный, включает в себя создание выпуклого многоугольника (т. е. многоугольника без внутренних углов более 180 градусов), охватывающего все точки местоположения животного. Этот метод широко используется, что позволяет получать сравнимые с другими исследованиями результаты. Однако у этого подхода есть много недостатков, в том числе он предполагает, что животные используют всю территорию в пределах участка обитания в равной степени, и тем участкам, которые используются чаще, не придается повышенный вес. В результате локация, используемая только один раз в течение года, может значительно расширить участок обитания, а районы с интенсивным использованием не могут быть дифференцированы. Второй метод – фиксированного ядра наиболее часто используемый, он включает более сложный непараметрический анализ данных участка обитания. Данный метод

использует данные о местоположении для создания так называемого распределения использования территории, которое описывает возможность того, что животное может быть найдено в данном месте, с вероятностью от 95 до 5 % через пятипроцентные интервалы [17]. Применение данного метода позволяет смоделировать структуру участка обитания исследуемой особи с выделением наиболее интенсивно используемых ей частей (ядерные зоны).

Для расчета площади участка обитания методом фиксированного ядра использовали территории, ограниченные 95%-м вероятностным контуром с целью исключения единичных, наиболее удаленных от центра участка обитания заходов медведя [18].

При выделении ядерной зоны учитывается территория, где вероятность нахождения животного равна 50 %. В связи с неоднородным распределением кормовых ресурсов ядерная зона у медведей не является фиксированной и может варьировать. Интенсивность использования территории (положительная корреляция вероятности нахождения животного с размерами ядерной и периферической зон участка обитания) различается между ядром и периферией, но внутри каждой из этих зон остается равномерной [18]. На основании данного подхода в настоящем исследовании применен метод, позволяющий выявить ядерную зону как часть участка обитания с более высокой интенсивностью использования территории [19].

В качестве характеристики суточных перемещений использовали суточное смещение – расстояние между локациями медведя, временной интервал между которыми составлял около суток (22–26 ч). Данные, полученные дистанционным методом телеметрии, неточно показывают пройденное животными расстояние, так как не регистрируют весь пройденный путь, а оценивают дистанцию между двумя точками пеленгации. Суточные смещения меньше фактических расстояний, пройденных животными, тем не менее, полученные данные позволяют оценить интенсивность перемещений медведей и закономерности использования территории животными. За весь период исследований была собрана информация по 52 суточным перемещениям.

Так как построение гистограмм не показало нормального распределения выборок, для сравнения суточных перемещений применен параметрический статистический критерий Ша-

пиро–Уилка ($p < 0,05$). Различия в длине суточных смещений по декадам выявили критерием Крускала–Уоллиса ($p < 0,05$).

Данные по пространственной структуре участка и перемещения животного обрабатывали с помощью программного обеспечения OziExplorer 3.9.5 и модуля Animal Movements V.2 для Arc View 3.2a [20]. Статистический анализ и построение гистограмм проводили с помощью программного обеспечения R (ver. 3.5.2).

Результаты и обсуждение

Участок обитания. Анализ данных, полученных от спутникового ошейника, показал, что площадь весенне-летнего участка обитания взрослого самца бурого медведя, рассчитанная методом минимального выпуклого полигона с включением 100 % локаций, составляет 463 км² (рис. 1). По методу фиксированного ядра размер летнего участка обитания (область попадания 95 % локаций) составляет 354,2 км². Ядерная зона (область попадания 50 %) состоит из трех равноудаленных друг от друга полигонов и составляет 33,5 км² (рис. 2).

Наличие трех отдаленных друг от друга ядерных зон на участке обитания якутского медведя объясняется, вероятно, разной привлекательностью отдельных местообитаний на занимаемой им территории, где распределение кормов и их

урожайность неравномерны. Нужно отметить, что, по результатам спутникового прослеживания и ранее описанным литературным данным, медведи Западной Якутии в основном держатся по долинам малых рек, где их привлекают рано вегетирующая травянистая растительность, почки и листья кустарников, а на южных склонах речных долин – вытаявшие из-под снега ягоды брусники прошлогоднего урожая, также муравьи-древоточцы [21].

В летний период пойменные угодья также являются для бурого медведя основными. Здесь он кормится травянистой растительностью, а в конце лета – ягодами смородины и малины. В этот период медведи часто посещают широкие надпойменные террасы и долины мелких ручьев в поисках голубики [22].

Размер участка обитания самца бурого медведя Западной Якутии оказался несколько больше, чем у медведей Европы, острова Кадьяк, Японии и других регионов Дальнего Востока. Большие размеры годовых участков обитания наблюдаются у медведей заповедника Сихотэ-Алинь (от 891,34 км² до 1559,19 км²), северной провинции Канады, Вайоминга и севера Аляски, где средние значения составляют 872–948 км². Подобные размеры участков не являются для самцов бурого медведя предельными. Так, в Канаде средние площади участков составляют более 6000 км² (табл. 2).

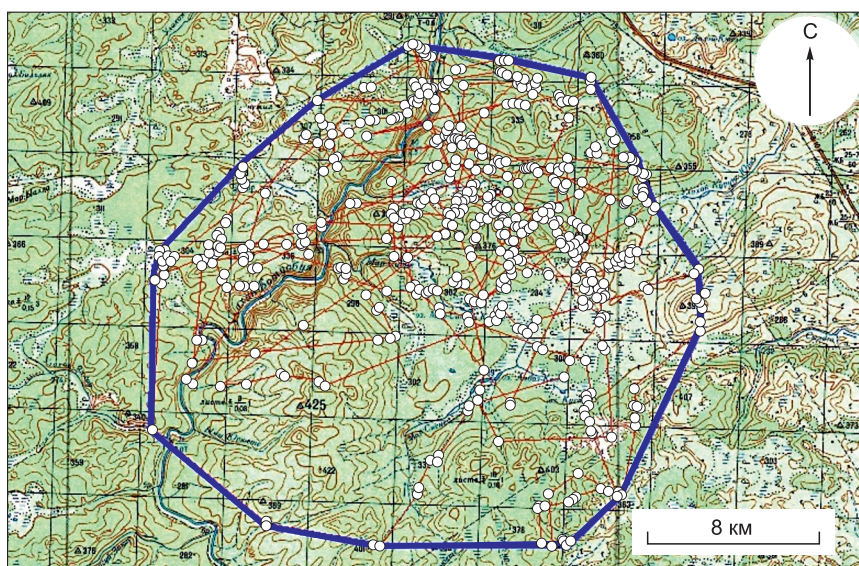


Рис. 1. Траектория перемещения и индивидуальный участок обитания самца медведя, полученный методом минимального выпуклого полигона с учетом 100 % локаций (май–июль 2012 г., масштаб 1:200000, [https://nakarte.me./](https://nakarte.me/))

Fig. 1. The trajectory of movement and the male bear's home range were obtained using the minimum convex polygon method, taking into account 100 % of the locations (May–July 2012, scale 1:200000, <https://nakarte.me./>)

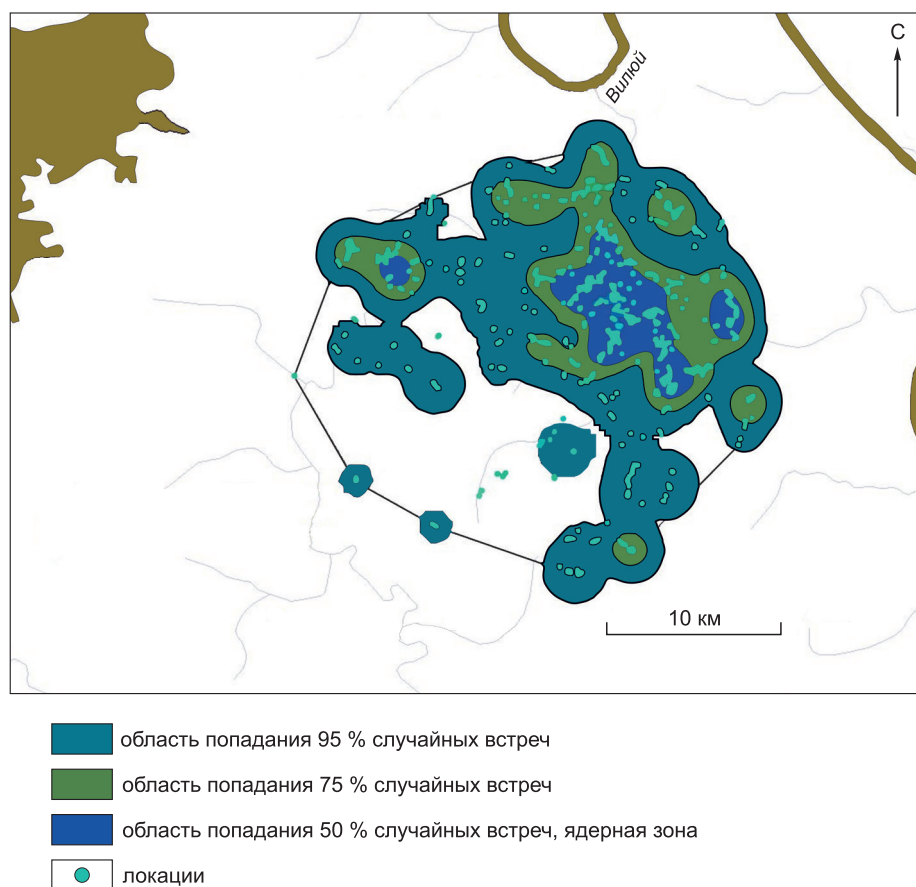


Рис. 2. Весенне-летний участок обитания самца бурого медведя и ядерная зона, полученные методом фиксированного ядра (с 22 мая по 16 июля)

Fig. 2. The spring-summer home range of the male brown bear and the core area were obtained using the fixed kernel method (May 22 to July 16)

Таблица 1

**Сравнительная характеристика размеров участков обитания бурых медведей
в различных географических регионах**

Table 1

Comparative characteristics of brown bear home range sizes in different geographic regions

Регион	Средний размер участка обитания, км ²	Размер ядерной зоны, км ²	Источник
Республика Саха (Якутия), Западная Якутия	354,2	33,5	Наши данные
Приморский край, заповедник Сихотэ-Алинь	891,34	144,70	[9]
Северная Канада, Вайоминг и северная Аляска	872–948	—	[23–26]
Северо-запад Канады	6685,0	—	[27]
Болгария, центральный Балканский национальный парк	190,1	—	[34]
Приморский край, Камчатка и Сахалин	27,6	—	[28]
Япония	28,1–59,0	—	[29, 30]
Северо-запад Северной Америки, остров Кадьяк	24,4	—	[31]
остров Адмиралтейский	115,0	—	[32]

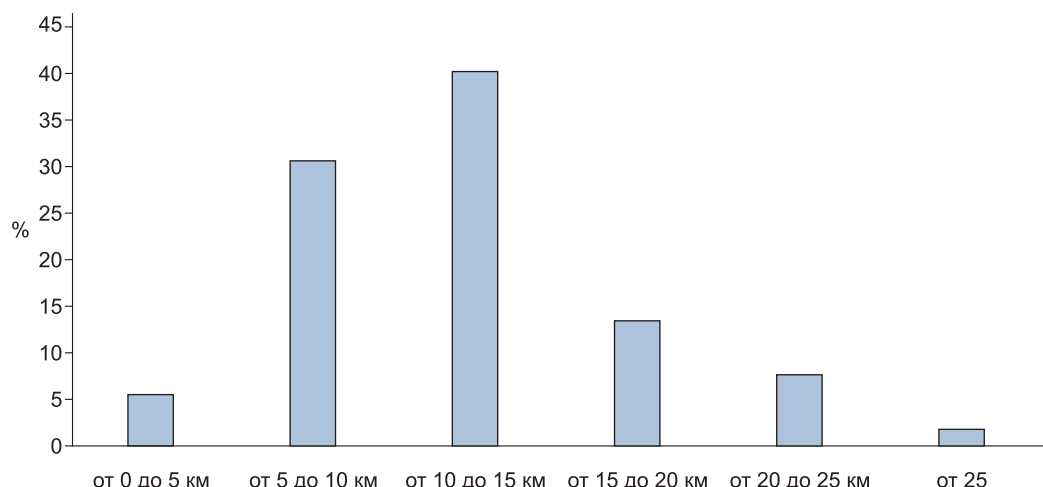


Рис. 3. Распределение суточных перемещений самца бурого медведя Западной Якутии по категориям протяженности

Fig. 3. Distribution of daily movements of male brown bear in Western Yakutia according to length category

Относительно небольшие размеры участков обитания медведей на Камчатке, Сахалине, в Северной Америке и Японии могут объясняться тем, что в этих регионах корма медведей имеются в изобилии и сконцентрированы, особенно во время нереста лососей [10]. Известно наличие обратной связи между размерами годовых участков медведей и продуктивностью угодий [27].

Среднесуточный ход. Среднее значение протяженности суточного хода самца бурого медведя за весь период отслеживания составило 11,8 км ($n = 52$), при разбросе значений от 0,95 до 28,5 км. За сутки медведь чаще всего перемещался на дистанцию от 10 до 15 км, доля таких перемещений составила 40,4 % (рис. 3). Выявлены достоверные различия между декадами в длине суточных смещений ($p < 0,05$), они были больше в 1 и 2 декаде июня по сравнению с другими месяцами (табл. 1). В первой декаде июня

суточный ход составил $15,3 \pm 1,79$ км ($N = 10$), при разбросе значений от 6,2 до 24,4 км, во второй декаде июня – $15,5 \pm 1,68$ км ($N = 10$), при разбросе значений от 9 до 28,5 км.

Среднесуточные перемещения самца бурого медведя Западной Якутии оказались несколько выше (см. табл. 2), чем у медведей Камчатки и Приморья. Например, на Камчатке у самца бурого медведя среднесуточное смещение составило всего 3,4 км [11, 12]. В заповеднике Сихотэ-Алинь среднее значение суточного хода для взрослых самцов составило $3,13 \pm 3,19$ км при разбросе значений от 0 до 19,22 км. Молодой самец за сутки смещался на расстояние от 0,07 до 5,94 км, в среднем на $2,12 \pm 1,57$ км [13].

В районе исследования в первой и во второй декадах июня у медведя отмечается наибольший суточный ход, а также значительные выходы за пределы ядерной зоны. Указанный период приходится на время гона медведей и, возможно, меченый самец совершал переходы в поисках самки для спаривания. Относительно дальние перемещения самцов в сезон размножения отмечены многими исследователями [11, 21, 33–36,]. Также дальние перемещения могут быть связаны со скудностью кормовой базы хищника в этот период наблюдений, т. е. с дефицитом кормов на начальном этапе лета. Например, по свидетельству Юдина [37], бурые медведи на юге Дальнего Востока в голодные периоды в течение суток могут совершать переходы более чем на 50 км. Кроме того, многие исследователи указывают значительные переходы бурых медведей к местам нажировки [38–42].

Таблица 2

Среднесуточный ход бурого медведя по декадам

Table 2

Average daily movement of brown bear for decades

Месяцы по декадам	Средний суточный ход, км	Максимальное значение, км
Май III декада	$10,3 \pm 2,97$	22,6
Июнь I декада	$15,3 \pm 1,79$	24,6
Июнь II декада	$15,5 \pm 1,68$	28,5
Июнь III декада	$9,5 \pm 1,08$	13,6
Июль I декада	$8,3 \pm 0,83$	12,7
Июль II декада	$11,2 \pm 1,26$	13,7

Заключение

Впервые в Якутии с помощью глобальной системы навигации получены точные достоверные данные, позволяющие охарактеризовать ранее недостаточно изученные аспекты использования пространства и перемещения бурого медведя.

Установлено, что средний размер весенне-летнего участка обитания с включением 95 % локаций составил 354,2 км², тогда как размер ядерной зоны по 50 % локаций – около 33,5 км². В пределах ядерной зоны выявлено три участка, наиболее часто посещаемых медведем. По предварительным данным, участок обитания самца бурого медведя на западе Якутии отличается меньшим размером по сравнению с другими регионами Дальнего Востока, где ранее проводили исследования с помощью радиотелеметрии.

Наибольшие показатели длины суточного хода наблюдаются в 1 и 2 декадах июня, что, возможно, связано с гонным поведением и дефицитом кормов в этот период.

Полученные данные позволяют в будущем оценить плотность и численность населения медведей по размерам индивидуальных участков обитания в регионе.

Список литературы / References

1. Burt W.H. Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *Journal of Mammalogy*. 1943; 24(3):346–352. <https://doi.org/10.2307/1374834>
2. Mech L.D. Telemetry as a technique in the study of predation. *The Journal of Wildlife Management*. 1967; 31(3):492–496. <https://doi.org/10.2307/3798129>
3. Павлов Д.С., Поддубный А.Г. Биотелеметрия рыб. Методическое руководство. М.: Гидропроект, 1993. 83 с.
4. Pavlov D.S., Poddubnyi A.G. *Biotelemetry of fish. Methodical guide*. Moscow: Gidroproekt, 1993. 83 p. (In Russ.)
5. Mech D.L., Barber S.M. *A critique of wildlife radio tracking and its use in national parks*. A report to the U.S. National Park Service; 2002. 80 p.
6. Creel S.C., Creel N.M., Monfort S.L. Radiocollaring and stress hormones in African wild dogs. *Conservation biology*. 1997;11:544–548. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1997.95476.x>
7. Серёдкин И.В., Пачковский Дж. Отлов, иммобилизация и мечение бурого медведя на Камчатке. Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей. Материалы 7-й международной научной конференции, посвященной 25-летию организации Камчатского отделения Института биологии моря. Петропавловск-Камчатский, Камчатпресс. 2006; 203–206.

Seryodkin I.V., Paczkowski J. Capture, immobilization and marking of brown bears in Kamchatka. *Conservation of Biodiversity of Kamchatka and Coastal Waters. Materials of the 7th international scientific conference dedicated to the 25th anniversary of the organization of the Kamchatka branch of the Institute of Marine Biology*. Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatpress. 2006;203–206. (In Russ.)

7. Seryodkin I.V., Zaitsev V.A., Petrunenko Y.K. Pulsar satellite radio beacon application experience in the telemetry of brown bear (*Ursus arctos* L.). *Achievements in the Life Sciences*. 2014;8(1):43–46. <https://doi.org/10.1016/j.als.2014.11.003>

8. Серёдкин И.В., Пачковский Д., Борисов М.Ю., Петруненко Ю.К. Участки обитания бурого медведя на полуострове Камчатка и острове Сахалин. *Сибирский экологический журнал*. 2017;6(2017):680–695.

Seryodkin I.V., Paczkowski J., Borisov M.Y., Petrunenko Y.K. Home range of brown bears on the Kamchatka Peninsula and Sakhalin Island. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017;10(6):599–611.

9. Серёдкин И.В., Костыря А.В., Гудрич Д.М., Петруненко Ю.К. Использование пространства бурыми медведями (*Ursus arctos*) на Сихотэ-Алине. *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2019;12(4):366–384. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0308>

Seryodkin I.V., Kostyrya A.V., Goodrich D.M., Petrunenko Yu.K. Space use by brown bears (*Ursus arctos*) in the Sikhote-Alin. *Journal of the Siberian Federal University. Biology*. 2019;12(4):366–384. (In Russ.). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0308>

10. Серёдкин И.В., Ликок В.Б., Пачковский Д., Петруненко Ю.К. Сезонные участки обитания и перемещения бурых медведей *Ursus arctos* в бассейне Курильского озера (Южная Камчатка). *Вестник Северо-Восточного научного центра*. 2019;3:80–90. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-80-90>

Seryodkin I.V., Likok V.B., Pachkovsky D., Petrunenko Yu.K. Seasonal habitats and movements of brown bears *Ursus arctos* in the basin of the Kuril Lake (South Kamchatka). *Bulletin of the North-Eastern Scientific Center*. 2019;3:80–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2019-3-80-90>

11. Серёдкин И.В. Сезонные перемещения бурых медведей на полуострове Камчатка и острове Сахалин. *Труды Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН*. 2020;3(15): 61–74.

Seryodkin I.V. Seasonal movements of brown bears in the Kamchatka Peninsula and Sakhalin Island. *Proceedings of T.I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS*. 2020;3(15):61–74. (In Russ.)

12. Серёдкин И.В. Суточные перемещения бурых медведей (*Ursus arctos*) на Камчатке и Сахалине. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2020;49:107–127. <https://doi.org/10.17223/19988591/49/6>

- Seryodkin I.V. Daily movements of brown bears (*Ursus arctos*) in Kamchatka and Sakhalin. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;49:107–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988591/49/6>
13. Середкин И.В. Суточные перемещения бурых медведей (*Ursus arctos*) на среднем Сихотэ-Алине. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2020;(9):39–44. <https://doi.org/10.37882/2223–2966.2020.09.34>
- Seryodkin I.V. Daily movements of brown bears (*Ursus arctos*) in the middle Sikhote-Alin. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2020;(9):39–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.37882/2223–2966.2020.09.34>
14. Середкин И.В. Сезонные перемещения бурых медведей на Сихотэ-Алине. *Тихоокеанская география*. 2021;1(5):78–86. <https://doi.org/10.35735/tig.2021.5.1.008>
- Seryodkin I.V. Seasonal movements of brown bears in Sikhote-Alin. *Pacific geography*. 2021;1(5):78–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.35735/tig.2021.5.1.008>
15. Kreeger T.J. *Handbook of wildlife chemical immobilization*. Wyoming: International Wildlife Veterinary Services, Inc.; 1996.
16. Hayne D.W. Calculation of size of home range. *Journal of Mammalogy*. 1949;30:1–18.
17. Worton B.J. Kernel methods for estimating the utilization distribution in home-range studies. *Ecology*. 1989;70(1):164–168.
18. Powell R.A. Animal home ranges and territories and home range estimators. *Research Techniques in Animal Ecology: controversies and consequences*. L. Boitani and T.K. Fuller, editors. New York: Columbia University Press; 2000:65–111.
19. Wilson R.R., Hooten M.B., Strobel B.N., Shvik J.A. Accounting for individuals, uncertainty, and multi-scale clustering in core area estimation. *Journal of Wildlife Management*. 2010;74(6):1343–1352. <https://doi.org/10.2193/2009-438>
20. Hooge P.N., Eichenlaub B. Animal movement extension to ArcView version 2.0. U.S. Geological Survey. Alaska Science Center-Biological Science Office. Anchorage, USA; 2000.
21. Мордосов И.И. Бурый медведь. Якутия. *Медведи: бурый медведь, белый медведь, гималайский медведь*. М.: Наука; 1993:301–318.
- Mordosov I.I. Brown bear. Yakutia. *Bears: brown bear, polar bear, Asian black bear*. Moscow: Nauka; 1993:301–318. (In Russ.)
22. Тавровский В.А., Егоров О.В., Кривошеев В.Г., Попов М.В., Лабутин Ю.В. *Млекопитающие Якутии*. М.: Наука; 1971. 660 с.
- Tavrovsky V.A., Egorov O.V., Krivosheev V.G., Popov M.V., Labutin Yu.V. *Mammals of Yakutia*. Moscow: Nauka; 1971. 660 p. (In Russ.)
23. Russell R.H., Nolan J.W., Woody N.G., Anderson G. *A study of the grizzly bear (Ursus arctos L.) in Jasper National Park, 1975–1978*. Final report of the Canadian Wildlife Service; Edmonton; 1979.
24. Blanchard B.M., Knight R.R. Movements of Yellowstone grizzly bears. *Biological Conservation*. 1991;58(1):41–67. [https://doi.org/10.1016/0006-3207\(91\)90044-A](https://doi.org/10.1016/0006-3207(91)90044-A)
25. Reynolds H.V. *North Slope grizzly bear studies*. State of Alaska, Department of Fish and Game, Division of Game, 1980.
26. Collins G.H., Kovach S.D., Hinkes M.T. Home range and movements of female brown bears in southwestern Alaska. *Ursus*. 2005;16(2):181–189.
27. McLoughlin P.D., Case R.L., Gau R.J., Ferguson S.H., Messier F. Annual and seasonal movement patterns of barren-ground grizzly bears in central Northwest Territories. *Ursus*. 1999;11:79–86.
28. Seryodkin I.V., Paczkowski J., Borisov M.Y., Petrunenko Y.K. Home range of brown bears on the Kamchatka Peninsula and Sakhalin Island. *Contemporary Problems of Ecology*. 2017;10(6):599–611. <https://doi.org/10.1134/S1995425517060129>
29. Mano T. Home range and habitat use of brown bears in the southwestern Oshima Peninsula, Hokkaido. *International Conference on Bear Research and Management*. 1994;9:319–325.
30. Sato Y., Kobayashi Y., Urata T., Takatsuki S. Home range and habitat use of female brown bear (*Ursus arctos*) in Urahoro, eastern Hokkaido, Japan. *Mammal Study*. 2008;33:99–109.
31. Berns V.D., Atwell G.C., Boone D.L. Brown bear movements and habitat use at Karluk Lake, Kodiak Island. *International Conference on Bear Research and Management*. 1980;4:293–296.
32. Schoen J.W., Lentfer J.W., Beier L. Differential distribution of brown bears on Admiralty Island, Southeast Alaska: a preliminary assessment. *International Conference on Bear Research and Management*. 1986;6:1–5.
33. Clevenger A.P., Purroy F.J., Pelton M.R. Movement and activity patterns of a European brown bear in the Cantabrian Mountains, Spain. *International Conference on Bear Research and Management*. 1990;8:205–211.
34. Pop I.M., Bereczky L., Chiriac S., Iosif R., Nita A., Popescu V.D., Rozyłowicz L. Movement ecology of brown bears (*Ursus arctos*) in the Romanian Eastern Carpathians. *Nature Conservation*. 2018;26:15–31.
35. Ревенко И.А. Бурый медведь. Камчатка. *Медведи: бурый медведь, белый медведь, гималайский медведь*. М.: Наука; 1993:380–403.
- Revenko I.A. Brown bear. Kamchatka. *Bears: brown bear, polar bear, Asiatic black bear*. Moscow: Nauka; 1993:380–403. (In Russ.)
36. Середкин И.В., Костыря А.В., Гудрич Д.М. Суточные и сезонные перемещения бурого медведя

на Сихотэ-Алине. *Вестник Тверского государственного университета. Серия "Биология и экология"*. 2014;4:233–240.

Seryodkin I.V., Kostyria A.V., Goodrich J.M. Daily and seasonal movements of brown bear in the Sikhote-Alin. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Biologiya i Ekologiya"*. 2014;4:233–240. (In Russ.)

37. Юдин В.Г. Бурый медведь. Юг Дальнего Востока. *Медведи: бурый медведь, белый медведь, гималайский медведь*. М.: Наука; 1993:348–380.

Yudin V.G. Brown bear. South of the Far East. *Bears: brown bear, polar bear, Asiatic black bear*. Moscow: Nauka; 1993:348–380. (In Russ.)

38. Завацкий Б.П. Бурый медведь. Средняя Сибирь. *Медведи: бурый медведь, белый медведь, гималайский медведь*. М.: Наука; 1993:294–275.

Zavatsky B.P. Brown bear. Central Siberia. *Bears: brown bear, polar bear, Asian black bear*. Moscow: Nauka; 1993:294–275. (In Russ.)

39. Жиряков В.А., Грачёв Ю.А. Бурый медведь. Центральная Азия и Казахстан. *Медведи: бурый мед-*

ведь, белый медведь, гималайский медведь. М.: Наука; 1993:170–206.

Zhiryakov V.A., Grachev Yu.A. Brown bear. Central Asia and Kazakhstan. *Bears: brown bear, polar bear, Asian black bear*. Moscow: Nauka; 1993:170–206. (In Russ.)

40. Юдин В.Г. Бурый медведь. Сахалин и Курильские острова. *Медведи: бурый медведь, белый медведь, гималайский медведь*. М.: Наука; 1993:403–419.

Yudin V.G. Brown bear. Sakhalin and the Kuril Islands. *Bears: brown bear, polar bear, Asian black bear*. Moscow: Nauka; 1993:403–419. (In Russ.)

41. Cozzi G., Chynoweth M., Kusak J., Çoban E., Çoban A., Ozgul A., Şekercioğlu Ç.H. Anthropogenic food resources foster the coexistence of distinct life history strategies: Year-round sedentary and migratory brown bears. *Journal of Zoology*. 2016;300:142–150.

42. Завацкий Б.П. Сроки залегания медведя в берлоги и их типы в енисейской тайге. *Экология медведей*. Новосибирск: Наука; 1987:84–91.

Zavatsky B.P. Dates of occurrence of the bear in lairs and their types in the Yenisei taiga. *Ecology of bears*. Novosibirsk: Science; 1987:84–91. (In Russ.)

Об авторе

МАМАЕВ Николай Викторович, младший научный сотрудник, <https://doi.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, ScopusID: 57191052875, e-mail: Mamaev_88@bk.ru

About the author

MAMAIEV, Nikolai Viktorovich, Junior Researcher, <https://doi.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, ScopusID: 57191052875, e-mail: Mamaev_88@bk.ru

Поступила в редакцию / Submitted 23.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 17.05.2023

Принята к публикации / Accepted 30.05.2023

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-312-322>

Оригинальная статья

Распространение и численность полевого (*Passer montanus*) и домового (*Passer domesticus*) воробьев в Магаданской области

Ю. А. Слепцов✉

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, г. Магадан, Российская Федерация

✉slep-u@yandex.ru

Аннотация

В последние десятилетия во многих местах обширного ареала воробьев были отмечены случаи сокращения их численности. В пределах Северо-Востока Азии сведения по распространению и численности воробьев отрывочны и фрагментарны. В настоящее время на территории Магаданской области в поселках и городах выявлены только моновидовые поселения воробьев с регистрациями залетов воробьев другого вида. Поселки побережья Тауйской губы, г. Магадан и его окрестности, а также г. Сусуман, поселки Верхний Сеймчан и Омсукчан населены только полевыми воробьями. В поселках Эвенск, Сеймчан и Усть-Омчуг гнездятся только домовые воробьи. Численность полевых воробьев в центральной части г. Магадан площадью 9,6 км² оценивается в 2750 особей. Плотность зимнего населения в различных типах городской застройки, по данным площадных учетов, варьирует от 200 до 384 особей/км². В результате проведенных исследований зафиксированы современное распространение и численность полевого и домового воробьев в населенных пунктах Магаданской области, а также предложены вероятные сценарии их расселения в регионе.

Ключевые слова: полевой воробей, домовый воробей, распространение, плотность населения, численность, Магаданская область

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию ИБПС ДВО РАН (AAAA-A17-117122790002-8).

Благодарности. Автор искренне благодарит сотрудников ИБПС ДВО РАН, а также жителей Магаданской области за предоставленные сведения и помощь в проведении работ.

Для цитирования: Слепцов Ю.А. Распространение и численность полевого (*Passer montanus*) и домового (*Passer domesticus*) воробьев в Магаданской области. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):312–322. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-312-322>

Original article

Number and distribution of tree (*Passer montanus*) and house (*Passer domesticus*) sparrows in the Magadan Region

Yu. A. Sleptsov✉

Institute of Biological Problems of the North,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation

✉slep-u@yandex.ru

Abstract

In recent decades, a reduction in the number of sparrows has been observed throughout their wide distribution range. However, information on the distribution and abundance of sparrows in Northeast Asia is scarce. Monospecific sparrow populations have been identified in various settlements and towns in the Magadan Region, although there are occasional records of other sparrow species. Among monospecific populations, only tree sparrows breed settlements on the Taui Bay coast, in Magadan, Susuman, Verkhny Seimchan, and Omsukchan, whereas only house sparrows breed in Evensk, Seimchan, and Ust-Omchug. The tree sparrow population in Magadan was estimated to be 2750 individuals over an area of 9.6 km². Their population density in winter, estimated by plot counts, varied between 200 and 384 individuals/km² in

parts of Magadan with different housing types. We conclude by discussing the ways in which tree and house sparrows may spread across the area.

Keywords: tree sparrow, house sparrow, distribution, density, population number, Magadan Region

Funding. This study was carried out within the state assignment to the Institute of Biological Problems of the North FEB RAS (number AAAA-A17-117122790002-8).

Acknowledgements. The author sincerely thanks the staff of the Institute of Biological Problems of the North FEB RAS and the residents of the Magadan Region for providing information and assistance in carrying out this work.

For citation: Sleptsov Yu.A. Number and distribution of tree (*Passer montanus*) and house (*Passer domesticus*) sparrows in the Magadan Region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):312–322. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-312-322>

Введение

Полевой (*Passer montanus*) и домовый (*Passer domesticus*) воробьи являются широко распространенными, местами многочисленными синантропными видами, неразрывно связанными с человеком. Их ареал охватывает Евразию, Северную и Южную Америку, Южную Африку и Австралию, они обитают в Новой Зеландии, на Бермудских и Гавайских островах и о. Куба. На большей части ареала, в местах давнего проникновения воробьев в европейские страны и в центральной части России, эти два вида обитают совместно. В центре больших городов проживает домовый воробей, а периферийные места и окраины занимает полевой [1–3; и др.]. Полевые воробьи, помимо этого, обычны в населенных пунктах сельской местности, где домовых воробьев, как правило, нет. При этом они занимают также естественные биотопы с заселением дупел деревьев, кроме того, чаще селятся в искусственных дуплянках (синичниках), чем домовые воробьи [4]. Успешно сосуществовать двум близким видам позволяют способность быстро занимать свободные биотопы и наличие сезонного биотопического перераспределения у полевого воробья при большей оседлости у домового [5]. По результатам работ, проведенных на северо-востоке Испании, при совместном обитании домовые воробьи оказывают влияние на размещение мест гнездования полевых воробьев: чем больше размножающихся пар домового воробья, тем ниже от земли устраивают гнезда полевые, что менее оптимально ввиду опасности разорения хищниками [3]. При совместном обитании домовые воробьи чаще кормятся на открытых участках, а полевые – на заросших травой территориях, при этом домовый воробей чаще поедает крупных и подвижных беспозвоночных, а также семена с более твердой оболочкой и более крупные объекты антропогенного происхождения, чем полевой [1].

В крупных городах Сибири и Якутии (Новосибирск, Иркутск, Омск, Байкальск, Якутск) из-

вестно совместное существование обоих видов воробьев с преобладанием домового [2]. В Приморье и Хабаровском крае (Владивосток, Уссурийск, Хабаровск) доминирует полевой воробей при немногочисленности домового [6–8].

На Дальнем Востоке России встречается три подвида полевого воробья. Нижнее Приамурье и Приморье населены формой *Passer montanus dybowskii*. Островной подвид *Passer montanus saturatus* обитает на Сахалине и Курильских островах. А воробьи, распространенные в центральной Сибири и Забайкалье к востоку до Амурской области, причисляются к расе *Passer montanus margaretae*. В Южной Якутии и Верхоянье обитает самый крупный подвид – *Passer montanus stegmanni* [9]. Подвидовая принадлежность магаданских воробьев не определена, она требует отлова птиц и сравнения с эталонными образцами. Возможно, что проведение генетических работ и установление подвидовой принадлежности в будущем смогут дать ответы на вопросы распространения полевого воробья. Домовый воробей во всех населенных пунктах Дальнего Востока представлен единственным подвидом *Passer domesticus domesticus* [9].

Численность определенного вида воробьев зависит от времени заселения им территории. К примеру, в Польше больше домового воробья, так как он раньше там появился [10]. Подобная картина прослеживается на Камчатке, где история расселения воробьев изучена наиболее подробно. Полевой воробей в Петропавловск-Камчатский был случайно завезен в трюме теплохода из Находки в 1979 г., откуда самостоятельно распространился по большей части полуострова. Домовый воробей был целенаправленно завезен в 1981 г. в г. Елизово из Москвы в количестве 24 особей. Половина птиц перезимовала и в дальнейшем загнездилась, сейчас этот город является местом обитания двух видов. В 1983 г. домовый воробей был также завезен в пос. Телички, откуда он распространился по северной ча-

сти Камчатки, образовав на месте соприкосновения с полевым воробьем второй центр совместного обитания в пос. Оссора. В настоящее время расселение полевого воробья на север Камчатки, а домового на юг полуострова затруднено ввиду занятости территорий [11, 12]. Большую часть о. Сахалин занимает полевой воробей, за исключением г. Оха, где он обитает вместе с домовым воробьем [13]. На Чукотке в 90-х гг. XX в. в большинстве городов и поселков (Анадырь, Певек, Билибино, Омолон, Марково и др.) появился и ныне встречается только домовый воробей. Единственным населенным пунктом Чукотского автономного округа, где живет полевой воробей (но не встречен домовый), является пос. Провидения [14] (П.С. Ктиторов, устное сообщение). В Магаданской области полевой воробей был впервые отмечен в пос. Сокол в 1969 г., откуда он затем самостоятельно проник в Магадан [15]. На общедоступном Интернет-ресурсе имеются также сведения о завозе воробьев (без указания вида) в Магадан в 1965 г. морским путем из Владивостока [16]. Первое упоминание о домовом воробье относится к 1970 г. – в пос. Сокол местными жителями встречено несколько пар этого вида [17]. К концу 90-х годов прошлого века было известно единственное место обитания домового воробья в пос. Талон (в 150 км к западу от Магадана) [15].

Таким образом, распространение воробьев на северо-востоке страны имеет неравномерный характер, что связано со временем проникновения определенного вида. Магаданская область, имеющая ограниченные сведения о воробьях и

недавнюю историю заселения, в этом плане представляет большой интерес. Поэтому главными вопросами, требующими решения, в ходе наших работ стали: выявление современной картины распространения полевого и домового воробьев на территории Магаданской области с особым вниманием к районам совместного обитания видов; получение данных, которые позволяют проследить и охарактеризовать особенности распространения воробьев; проведение работ по оценке численности и выявлению мест сосредоточения воробьев в небольших населенных пунктах области и в г. Магадан.

Материал и методика

Оценка численности воробьев проведена методом абсолютного учета в поселках Эвенск (2020 г.), Сеймчан (2016–2022 гг.), Дукча, Снежный, Уптар и Сокол (2021 г.). 17–18 февраля 2022 г. в г. Магадан нами проведены учеты полевого воробья методом картирования [18]. В центральной части города в произвольном порядке было выбрано пять участков 250×250 м с различными биотопами. На выделенных территориях проводили однократный сплошной учет всех встреченных птиц. Площадь центральной части города составила 9,6 км², за исключением частного сектора, ввиду сложностей выполнения исследований из-за ограждений, и территорий промышленных застроек, не населенных воробьями. Кроме этого, в период с 2020 по 2022 г. были использованы сведения местных жителей поселков Ола, Клепка, Армань, Талон, Балаганное, Омсукчан, Дебин, Усть-Омчуг и г. Сусуман о населении и численности воробьев.

В течение зимних сезонов 2020–2021 и 2021–2022 гг. пешими маршрутами в г. Магадан определяли места расположения кормушек с регулярной подкормкой.

На основе полученных данных проведен сравнительный анализ с соседними регионами.

Результаты

Распространение воробьев в Магаданской области

Полевой воробей (рис. 1) населяет все прилегающие к городу поселки на Охотском побережье (Ола, Клепка, Армань, Талон, Дукча, Снежный и др.), а также некоторые населенные пункты в континентальных районах области (пос. Верхний Сеймчан, пос. Омсукчан, г. Сусуман) (рис. 2).



Рис. 1. Полевой воробей, Магадан, 04.10.2020 г. (Фотография: Ю.А. Слепцов)

Fig. 1. Tree Sparrow, Magadan, 04.10.2020. (Photo: Yu.A. Sleptsov)



Рис. 2. Поселения полевого и домового воробьев, а также единичные встречи полевого и домового воробьев в населенных пунктах Магаданской области

Fig. 2. Settlements of Tree and House Sparrows, and occasional cases of Tree and House Sparrows in the Magadan Region

Известен случай залета двух полевых воробьев на о. Талан [19]. Удаленность острова от ближайшего населенного пункта, где они обитают, – пос. Балаганное составляет 37 км.

Поселения домового воробья (рис. 3, 4) обнаружены в поселках Эвенск, Сеймчан, Усть-Омчуг (опрос местных жителей) и Дебин (О.Н. Вохмина, устное сообщение). Единичные особи отмечены в Магадане (Е.А. Дубинин, устное сообщение), поселках Талон (Н.Е. Докучаев, устное сообщение) и Ола [20] (рис. 2). Самая высокая численность домового воробья отмечена в Эвенске. По сведениям местных жителей, воробьи были

завезены кораблями в 1960–1970 гг. предположительно с Камчатки. В Сеймчане в 2016 г. нами отмечено резкое падение численности домового воробья: весной там обитало более 200 особей, а осенью того же года насчитано всего около 30 птиц. В 2022 г. численность продолжает оставаться стабильно низкой и составляет всего 15–20 особей. В 2019 г. в этом поселке местными жителями зарегистрирован полевой воробей, но в последующем его повторно не встречали. Скорее всего, был отмечен залет из пос. Верхний Сеймчан, где этот вид обитает. Расстояние между населенными пунктами – 25 км.



Рис. 3. Самец домового воробья, Эвенск, 18.05.2020 г. (Фотография: Ю.А. Слепцов)

Fig. 3. Male House Sparrow, Evensk, 18.05.2020. (Photo: Yu.A. Sleptsov)



Рис. 4. Самка домового воробья, Эвенск, 15.05.2020 г. (Фотография: Ю.А. Слепцов)

Fig. 4. Female House Sparrow, Evensk, 15.05.2020. (Photo: Yu.A. Sleptsov)

Численность воробьев в Магаданской области

Численность воробьев в колымских поселках варьирует от 50 до 300 особей (в среднем 150–200) (табл. 1).

В центральной части г. Магадан площадью 9,6 км², не включающей районы частной одноэтажной застройки, были выявлены следующие основные типы местообитаний полевого воробья:

1) редкая застройка в основном 5-этажными блочными балконными домами новой планировки с одиночными 9-этажными строениями и учреждениями на открытом пустырном пространстве. Такой тип характерен для окраин центра города на границе с частным сектором. Общая площадь – 2,6 км², с плотностью 224 особей/км². Численность воробьев – 582,4 особей;

2) плотная застройка 2- и 4-этажными зданиями старой сталинской планировки с 5-этажными кирпичными строениями («хрущевки») по периметру кварталов. Характерна для центра города, во дворах главных улиц (Ленина, Гагарина, Пушкина, Парковая и др.). Общая площадь таких биотопов – 0,98 км², плотность 200 особей/км², численность воробьев – 196 особей;

3) парки и скверы с прилегающей жилой территорией с 5-этажными строениями и невысокими 2–3-этажными административными зданиями (школы, детские сады). Расположены в центре и на окраинах города, общая их площадь – 0,84 км², плотность 384 особей/км², численность воробьев – 322,5 особей;

4) плотная застройка 5-этажными домами новой планировки. Наиболее распространенный

тип биотопов, характерный для центральной и периферийной частей города. Общая площадь территорий – 3,09 км², плотность 360 особей/км², численность воробьев – 1112,4 особей;

5) редкая застройка 5-этажными кирпичными и блочными зданиями с 2–3-этажными административными зданиями. Характерна для микрорайонов, удаленных от центра. Площадь территорий – 2,09 км², плотность 264 особей/км², численность воробьев – 551,7 особей.

Таким образом, общая численность полевого воробья в г. Магадан на площади 9,6 км² оценивается в 2750 особей, при средней плотности 286,5 особей/км². Плотность в центре города – 314 особей/км², на его окраинах – 308 особей/км² (табл. 2).

Воробьи являются синантропными видами, и их существование напрямую зависит от человека, особенно в зимний период. Люди подкармливают птиц различными семенами. В Магадане кормушки расположены в основном в дворовых территориях и инициированы самими жителями. Чаще всего они представляют собой пластиковые 5-литровые емкости с вырезанными входами в боковых частях, закрепленные на деревьях. Реже осуществляется подкормка на окнах и балконах. Часть прикормочных территорий располагается при административных учреждениях (детские сады, школы, организации, осуществляющие деятельность по охране природы). Как правило, кормушки в таких местах представляют собой деревянные конструкции с площадкой и крышей, расположенные на деревьях или различного рода опорах. Существуют также места, обычно возле

торговых центров, где птиц прикармливают, высыпая корм непосредственно на землю. Все места привлечения птиц в городе были установлены и нанесены на карту (рис. 5). Воробьи охотно посещают кормушки, за исключением сильных ветреных дней, предпочитая проводить это время в укрытиях. В среднем на кормушке в одном квартале собирается до 50 птиц. Максимальное количество птиц, учтенных на одной кормушке, достигало 150 особей. Вероятно, что эти большие группировки образуются на территориях, где находится несколько кормушек с нерегулярными подкормками.

Обсуждение

Распространение

Считая временем появления воробьев в Магаданской области 1970-е гг. XX в., за более чем 50-летнюю историю сложилась следующая ситуация. И домовый, и полевой воробьи обитают на территории области на побережье с более мягкой зимой и в континентальных районах области, где отмечаются отрицательные температуры (ниже -50°C). В поселках на побережье Охотского моря (Ола, Армань, Талон, Балаганное, Дукча, Снежный, Сокол и др.) преобладает полевой воробей. Небольшое расстояние между населенными пунктами позволило ему самостоятельно расселиться из пос. Сокол, куда он, предположительно, был завезен самолетами. В континентальные районы области (г. Сусуман и пос. Омсукчан) полевой воробей проник, предположительно, посредством наземного грузового транспорта, перевозящего корма для крупного рогатого скота.

Таблица 1

Распространение и численность воробьев в Магаданской области

Table 1

Distribution and number of sparrows in the Magadan Region

Населенный пункт	Количество учтенных особей	
	Домовый воробей	Полевой воробей
г. Магадан ●	единичные особи	2750
пос. Ола ○	единичные особи	100–120
пос. Клепка ○	—	200
пос. Армань ○	—	100–120
пос. Талон ○	единичные особи	*
пос. Балаганное ○	—	250
пос. Дукча ●	—	100
пос. Снежный ●	—	100
пос. Сокол ●	—	>200
пос. Усть-Омчуг ○	100	—
г. Сусуман ○	—	*
пос. Дебин ○	50	—
пос. Омсукчан ○	—	200
пос. Сеймчан ●	↓200→20	единичные особи
пос. Верхний Сеймчан ●	—	150
пос. Эвенск ●	300	—

* — нет данных

○ — опросные сведения

● — наши данные

Таблица 2

Плотность населения воробьев (особей/км²) в г. Магадан в сравнении с другими городами северо-востока России

Table 2

Sparrow density (individual/km²) in Magadan in comparison with other cities of the north-east of Russia

Город	Полевой воробей		Домовый воробей		Даты учетов
	Центр	Окраины	Центр	Окраины	
Якутск ¹	8	36	425	169	конец июня 2008
Магадан ²	314	308			февраль 2022
Елизово ³	38,1	211,3	347,5	27,4	февраль 2015
Хабаровск ⁴	509,5		1,1		1997–2010
Уссурийск ⁵	1476	69,4			лето 2002–2005

¹ — [21]; ² — наши данные; ³ — [28]; ⁴ — [8]; ⁵ — [7].



Рис. 5. Центральная часть г. Магадан (ограничена красной линией) с учетными площадками (желтые квадраты) и местами расположения основных кормушек для птиц (желтые точки)

Fig. 5. The central part of Magadan (bounded by a red line) with registration sites (yellow squares) and locations of the main bird feeders (yellow dots)

Единичные регистрации домового воробья в поселках Талон, Ола и г. Магадан следует считать залетами. Скорее всего, птицы периодически завозятся кораблями из более южных регионов (Приморье, Сахалин, Камчатка), но без последующего закрепления на территории ввиду острых конкурентных отношений со стороны полевого воробья. Подобные события развивались на Камчатке, и закрепление домового воробья на территории возможно только при низкой численности полевого [12]. В континентальные районы области (Сеймчан, Дебин, Усть-Омчуг) домовый воробей мог попасть речными судами по р. Колыма из Якутии. Ближайшее место, где он обитает в Республике Саха (Якутия), – пос. Зырянка (А.Н. Секов, устное сообщение), расстояние по реке до пос. Сеймчан составляет около 500 км. Следовательно, на побережье Охотского моря в окрестностях Магадана раньше появился полевой воробей, а в континентальных районах области – домовый. Таким образом, можно сказать, что расселение птиц по территории области шло как в северном направлении (кораблями по

морю и наземным транспортом), так и в южном (речными судами по Колыме и самостоятельно из пос. Сокол в Магадан и окрестные поселки).

Совместного обитания полевого и домового воробьев в населенных пунктах Магаданской области нами не выявлено. На северо-востоке России совместное существование двух видов воробьев известно на Камчатке в г. Елизаветинское и пос. Оссора [12, 21], на Сахалине в г. Оха [13], в г. Хабаровск [8], а также в г. Якутск [22]. А моно-видовые поселения существуют с преобладанием полевого воробья в Магаданской области и домового воробья на Чукотке [14].

В 60–90-е гг. XX в. важным элементом выживания полевых воробьев в сельских населенных пунктах европейской части России в зимний период являлись животноводческие фермы [23], которые обеспечивали корм и кров. В настоящее же время воробьи сильно зависят от прикормки зимой и доступности мест выброса пищевых отходов. Общая экономическая ситуация в Магаданской области сложилась так, что упадок сельского хозяйства в 90-х гг. XX в. привел к ликвида-

ции больших совхозов и организации фермерских хозяйств, которым не требуется завоза кормов больших объемов для обеспечения животноводства. По всей видимости, вместе с этим прекратился приток, главным образом, полевого воробья из Магадана в колымские поселки. Отток населения из континентальных районов и нерентабельность поселков вынужденно закрыли часть населенных пунктов, и, соответственно, воробьи в этих местах исчезли (Стрелка, Мякит, Атка и т. д.).

Время массового расселения домового воробья на Камчатке в середине 80-х гг. XX в. [12] исключает версию его завоза в пос. Эвенск в 1970-х гг. с полуострова, как это утверждают местные жители. По нашему мнению, завоз этого вида произошел позднее, либо сначала туда был завезен полевой воробей.

Численность

Расчет плотности полевого воробья методом линейных маршрутных учетов [24] в Магадане в зимний период оказался не применим, поскольку в учетную полосу попадали большие скопления птиц (например, возле кормушек), которые завышали итоговые показатели. Но многолетние данные линейных маршрутных учетов можно использовать для отслеживания динамики численности популяции воробьев. По результатам последних 2 лет в г. Магадан она остается стабильной, что, по всей видимости, обеспечивается климатическими условиями – более теплыми зимами на побережье, наличием базовой подкормки и условиями обитания, которые обеспечивают укрытие зимой. Учеты воробьев на кормушках занижают результаты, поскольку существуют альтернативные места концентрации птиц (места выбросов пищевых отходов, тепло-трассы и чердачные помещения, где воробьи пережидают непогоду).

В г. Магадан полевой воробей достигает наивысшей плотности в 384 особи/км² на территориях с парками и скверами с прилегающими 5- и 2–3-этажными строениями. Этот тип биотопа обеспечивает ночлег и гнездовые участки в чердачных помещениях, межпанельных швах, под подоконниками и в вентиляционных отверстиях 5-этажных строений, а также корм при административных учреждениях и укрытие в скверах и парках. В целом же распределение по городу (в центре и по окраинам) имеет равномерный характер и сходно с таковым в г. Владивосток [6].

Преобладание полевого воробья наблюдается также в г. Хабаровск и г. Уссурийск (см. табл. 2).

Численность воробьев в населенных пунктах подвержена колебаниям, и по ее динамике можно судить о состоянии городской среды. В разные периоды конца XX–начала XXI вв. в разных городах мира численность воробьев претерпевала значительные колебания. В период с 70-х по 90-е гг. XX в. в Великобритании отмечено двукратное сокращение численности домового воробья. Подобное было зарегистрировано в городских районах и сельской местности по всей северо-западной Европе [25–27]. В итоге, домовый воробей был внесен международной организацией Birdlife International в список европейских видов птиц, вызывающих опасения по сохранению. Рост благосостояния населения требовал, в том числе, и увеличения автомобильных парковочных мест, что вело к уничтожению зеленой растительности. Ремонт зданий и использование современных строительных материалов лишает домовых воробьев гнездовых. В итоге районы с низким социально-экономическим статусом могут предоставить воробьям больше возможностей для гнездования [28]. Несомненно, что зимний период является самым сложным в жизни воробьев. Малоснежные и морозные зимы вызывают как гибель естественную – от холода [14] (личные наблюдения), так и от хищных птиц (прежде всего ястребов), которые вслед за дикими мелкими воробьиными птицами и дятлами перекачывают из лесной зоны в город, вследствие чего численность воробьев в течение зимы сокращается в некоторых населенных пунктах практически вдвое [29].

Причину падения численности домовых воробьев в городах европейской части России связывают также с применением химикатов, покосом газонов и сжиганием травы. В зимнее время – это противогололедные средства и омыватели стекол автомобилей, в теплый сезон – результат отравления спорыша гербицидами, которыми в Уфе травят землю, чтобы не росли одуванчики, и, во все сезоны, выхлопные газы автомобилей [30].

В Магаданской области в настоящее время только в пос. Сеймчан выявлено сокращение численности воробьев. Скорее всего, это связано с действием комплекса факторов. Благоустройство поселка, которое подразумевает покос травы с газонов, ведет к уничтожению кормовой базы. Повсеместная вырубка шиповника лишает ме-

стообитаний в послегнездовое время выводков, а однородность и открытость рельефа увеличивает шансы гибели от хищников. Снос ветхих строений лишает гнездовых мест домового воробья. Кроме этого, в поселке выявлена высокая численность обыкновенной пустельги [31]. Неоднократно мы наблюдали охоту пустельги на воробьев, и имеются свидетельства местных жителей об успешных охотах. Кроме прямой добычи хищники могут влиять на численность жертвы посредством нелетального эффекта страха [32]. Мы находили гнезда воробьев в чердачных помещениях в домах, где гнездилась пустельга. Соколы используют крыши зданий для присады, вызывая при этом стресс у воробьев. Резкое сокращение численности домового воробья в пос. Сеймчан до минимальной, случай регистрации залета полевого воробья и небольшое расстояние в 25 км до пос. Верхний Сеймчан позволяют предположить в ближайшем будущем закрепление полевого воробья в пос. Сеймчан и полное исчезновение там домового. Минимальное количество воробьев, необходимое для закрепления и дальнейшего размножения на территории, – около 20 особей [11, 14]. При оптимальных условиях за 3 года популяция полевого воробья вырастает с 50 до 200 особей [14]. Вполне возможно, что количество в 20 особей одного вида воробьев является минимальным и критичным для вторжения и последующего закрепления на территории воробьев другого вида, поскольку они являются колониальными птицами.

Необходимым условием для успешной зимовки воробьев в Магадане являются кормовые ресурсы. В последнее время старые металлические мусорные баки во многих местах города были заменены на современные закрывающиеся пластиковые контейнеры. Самостоятельно добывать пропитание в таких районах воробьям стало затруднительно, поэтому особую актуальность приобретает подкормка на кормушках. В связи с этим попытки запрета кормления птиц в Магадане со стороны местных властей [33] вызывают опасение за благополучие воробьев в зимний период.

Выводы

1. В результате проведенных исследований зафиксированы современное распространение и численность полевого и домового воробьев в населенных пунктах Магаданской области.

2. В настоящее время в Магаданской области не выявлено населенных пунктов, где совместно

обитают и полевой, и домовый воробей. Известны лишь случаи залетов домовых воробьев в поселения полевых и наоборот.

3. Относительно равномерное распределение полевого воробья в г. Магадан по различным типам биотопов, скорее всего, обусловлено отсутствием домового воробья и, следовательно, конкуренции за пищевые и гнездовые ресурсы.

4. Популяции воробьев в Магадане и колымских поселках можно назвать полными и стабильными, за исключением ситуации, сложившейся в пос. Сеймчан.

5. Резкое сокращение численности домового воробья в пос. Сеймчан – событие локальное, вызванное рядом факторов, которые не связаны с всеобщей тенденцией понижения численности по ареалу.

Список литературы / References

1. Барановский А.В. Механизмы экологической сегрегации домового *Passer domesticus* и полевого *P. montanus* воробьев. *Русский орнитологический журнал*. 2003;12(241):1207–1218.

Baranovsky A.V. The mechanisms of ecological segregation of the house *Passer domesticus* and the tree *P. montanus* sparrows. *The Russian Journal of Ornithology*. 2003;12(241):1207–1218. (In Russ.)

2. *Птицы городов России*. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2010. 513 с.

Birds of the Cities in Russia. Moscow: KMK; 2010. 513 p. (In Russ.)

3. Cordero P.J., Rodrigues-Teijeiro J.D. Spatial segregation and interaction between house sparrow and tree sparrow (*Passer* spp.) in relation to nest site. *Ekologia Polska*. 1990;(38):443–452.

4. Матюхин А.В., Иваницкий В.В., Данилин Е.В. Сезонные аспекты и постоянство населения полевых воробьев в лесопарке г. Москвы. *Русский орнитологический журнал*. 2020;29(1885):614–615.

Matyukhin A.V., Ivanitsky V.V., Danilin E.V. Seasonal aspects and constancy of the tree sparrow *Passer montanus* population in the Kuskovo forest park (Moscow). *The Russian Journal of Ornithology*. 2020;29(1885):614–615 (In Russ.)

5. Иовченко Н.П., Носков Г.А. Биотопическое распределение и динамика численности полевого (*Passer montanus* L.) и домового (*P. domesticus* L.) воробьев в Ленинградской области. *Вид и его продуктивность в ареале*. М.: Наука; 1983:36–47.

Iovchenko N.P., Noskov G.A. Biotopic distribution and population dynamics of the tree *Passer montanus* and the house *P. domesticus* sparrows in the Leningrad region. Species and its Productivity in the Distribution Area. Moscow: Nauka; 1983:36–47. (In Russ.)

6. Назаров Ю.Н. *Птицы города Владивостока и его окрестностей*. Владивосток: Издательство Дальневосточного университета; 2004. 276 с.

- Nazarov Yu.N. *Birds of the Vladivostok and Surrounding Area*. Vladivostok: Far East State University; 2004. 276 p. (In Russ.)
7. Глущенко Ю.Н., Липатова Н.Н., Мартыненко А.Б. *Птицы города Уссурийска: фауна и динамика населения*. Владивосток; 2006. 264 с.
- Gluschenko Yu.N., Lipatova N.N., Martynenko A.B. *Birds of the Ussuriisk: Fauna and Birds Population*. Vladivostok; 2006. 264 p. (In Russ.)
8. Маннанов И.А., Тагирова В.Т. Фауна и население птиц берегов Амура в Хабаровске. *Русский орнитологический журнал*. 2021;30(2056):1674–1680.
- Mannanov I.A., Tagirova V.T. Fauna and population of birds on the Amur banks in Khabarovsk. *The Russian Journal of Ornithology*. 2021;30(2056):1674–1680. (In Russ.)
9. Нечаев В.А., Гамова Т.В. *Птицы Дальнего Востока России*. Владивосток: Дальнаука; 2009. 564 с.
- Nechaev V.A., Gamova T.V. *Birds of Russian Far East*. Vladivostok: Dal'nauka; 2009. 564 p. (In Russ.)
10. Skorka P., Sierpowska K., Haidt A., Myczko Ł., Ekner-Grzyb A., Rosin Z., Tryjanowski P. Habitat preferences of two sparrow species are modified by abundances of other birds in an urban environment. *Current Zoology*. 2016;62(4):357–368. <https://doi.org/10.1093/cz/zow069>
11. Лобков Е.Г. *Гнездящиеся птицы Камчатки*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР; 1986. 304 с.
- Lobkov E.G. *The Nesting Birds of Kamchatka*. Vladivostok: USSR Academy of Sciences Far Eastern Branch; 1986. 304 p. (In Russ.)
12. Лобков Е.Г. Новые материалы по распространению домового *Passer domesticus* и полевого *Passer montanus* воробьев на севере Камчатского края. *Биология и охрана птиц Камчатки*. 2010;(9):70–73.
- Lobkov E.G. The new materials for the distribution of the house *Passer domesticus* and tree *Passer montanus* sparrows in the northern Kamchatka region. *The biology and conservation of the birds of Kamchatka*. 2010;(9):70–73. (In Russ.)
13. Нечаев В.А. *Птицы острова Сахалин*. Владивосток: ДВО АН СССР; 1991. 748 с.
- Nechaev V.A. *Birds of Sakhalin Islands*. Vladivostok: USSR Academy of Sciences Far Eastern Branch; 1991. 748 p. (In Russ.)
14. Косяк А.В., Загребин И.А. Полевой воробей – синантропный вид населенных пунктов Чукотки. *Русский орнитологический журнал*. 2019;28(1750):1423–1426.
- Kosyak A.V., Zagrebin I.A. The Eurasian tree sparrow *Passer montanus* – synanthropic species in settlements of Eastern Chukotka. *The Russian Journal of Ornithology*. 2019;28(1750):1423–1426. (In Russ.)
15. *Позвоночные животные Северо-востока России*. Владивосток: Дальнаука; 1996. 308 с.
- Vertebrate animals of North-East Russia*. Vladivostok: Dal'nauka; 1996. 308 p. (In Russ.)
16. Воробьи и Магадан. *Моя родина – Магадан*. Электронный ресурс. URL: <https://www.kolymastory.ru/glavnaya/istoriya-magadana/vorobi-i-magadan/> (Дата обращения: 12.12.2022)
- Sparrows and Magadan. *My homeland is Magadan*. Internet resource. URL: <https://www.kolymastory.ru/glavnaya/istoriya-magadana/vorobi-i-magadan/> (Accessed: 12.12.2022). (In Russ.)
17. Леонович В.В. Новые данные по распространению птиц в Магаданской области. *Орнитология*. 1981;(16):154–155.
- Leonovich V.V. New data on the distribution of birds in the Magadan region. *Ornithology*. 1981;(16):154–155. (In Russ.)
18. Романов В.В., Мальцев И.В. *Методы исследований экологии наземных позвоночных животных: количественные учеты*. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та; 2005. 79 с.
- Romanov V.V., Maltsev I.V. *Methods of Environmental Studies of Terrestrial Vertebrates: Quantitative Records*. Vladimir: Publishing House of Vladimir State University; 2005. 79 p. (In Russ.)
19. Кондратьев А.Я., Зубакин В.А., Голубова Е.Ю., Кондратьева Л.Ф., Харитонов С.П., Китайский А.С. Фауна наземных позвоночных животных острова Талан. *Прибрежные экосистемы северного Охотоморья. Остров Талан*. Магадан: ДВО РАН; 1992:72–108.
- Kondratyev A.Ya., Zubakin V.A., Golubova E.Yu., Kondratyeva L.F., Kharitonov S.P., Kitaysky A.S. The fauna of mammals and birds of Talan Island. *Costal ecosystems in the northern part of the Sea of Okhotsk. Talan island*. Magadan: FEB RAS; 1992:72–108. (In Russ.)
20. Дорогой И.В. Авифаунистические находки на юге Магаданской области. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2010;(4):37–44.
- Dorogoy I.V. Avifauna findings in the Southern Areas of Magadan region. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2010;(4):37–44. (In Russ.)
21. Лобков Е.Г. Становление и динамика популяции интродуцированных на Камчатке полевого *Passer montanus* и домового *Passer domesticus* воробьев. *Биология и охрана птиц Камчатки*. 2002;(4):93–99.
- Lobkov E. G. The making and dynamic of the introduced Tree Sparrow *Passer montanus* and House Sparrow *Passer domesticus* populations in Kamchatka. *The biology and conservation of the birds of Kamchatka*. 2002;(4):93–99. (In Russ.)
22. Ларионов А.Г., Гермогенов Н.И., Егоров Н.Н., Исаев А.П. Птицы г. Якутска и его окрестностей. *Прикладные экологические проблемы г. Якутска*. Новосибирск: Наука; 2017:145–152.
- Larionov A.G., Germogenov N.I., Egorov N.N., Isaev A.P. Birds of the Yakutsk and surrounding area. *Prikladnye ekologicheskie problemy Yakutsk*. Novosibirsk: Nauka; 2017:145–152. (In Russ.)
23. Иваницкий В.В., Матюхин А.В. К изучению коллективных ночевок и структуры популяций домашних воробьев (*Passer domesticus*) в сельской местности. *Биологические науки*. 1990(12):50–56.

- Ivanitsky V.V., Matyukhin A.V. The study of communal roost and population structure of the house sparrow *Passer domesticus* in rural habitats. *Biological sciences*. 1990(12):50–56. (In Russ.)
24. Равкин Ю.С. К методике учета птиц в лесных ландшафтах. *Природа очагов клещевого энцефалита на Алтае*. Новосибирск: Наука; 1967:66–75.
- Ravkin Yu.S. For the method of birds survey in forest landscapes. *The nature of the centers of tick-borne encephalitis in the Altai Mountains*. Novosibirsk: Nauka; 1967:66–75. (In Russ.)
25. Prowse A. The urban decline of the house sparrow. *British Birds*. 2002;(95):143–146.
26. Heij K. *Passer domesticus*: achteruitgang, vermoedelijke oorzaken en opvoer. *Het Vogeljaar*. 2006;(54):195–207.
27. Mulsow R. The birdlife of Hamburg. *Hamburger Avifauna Beitrage. Special Edition IOC*. Hamburg; 2006. 45–76.
28. Shaw L., Chamberlain D., Evans M. The house sparrow *Passer domesticus* in urban areas: reviewing a possible link between post-decline distribution and human socioeconomic status. *Journal of Ornithology*. 2008;(149):293–299. <https://doi.org/10.1007/s10336-008-0285-y>
29. Лобков Е.Г., Рождественский О.Ю., Курякова О.П. О возможных причинах сокращения численности воробьев в населенных пунктах юга Камчатки в конце зимы 2016 г. *Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей*. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс; 2016:89–93.
- Lobkov E.G., Rozhdestvesky O.Yu., Kuryakova O.P. Possible reasons for decrease in the number of the tree *Passer montanus* and house *P. domesticus* sparrows in the settlements of the south of Kamchatka at the end of winter 2016. *Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress; 2016:89–93. (In Russ.)
30. Валуев В.А. Возможные причины снижения численности птиц в городских условиях (на примере г. Уфы). *Башкирский орнитологический вестник*. 2010;(8):9–12.
- Valuev V.A. Vozmozhnye prichiny snizheniya chislenosti ptic v gorodskih usloviyah (na primere g. Ufy). *Bashkirskij ornitologicheskij vestnik*. 2010;(8):9–12. (In Russ.)
31. Слепцов Ю.А. Новые сведения о гнездовых поселениях обыкновенной пустельги *Falco tinnunculus* в антропогенном ландшафте верховьев Колымы. *Русский орнитологический журнал*. 2017;26(1526):4801–4803.
- Sleptsov Yu. A. New information about breeding of the common kestrel *Falco tinnunculus* in the anthropogenic landscape of the upper Kolyma. *The Russian Journal of Ornithology*. 2017;26(1526):4801–4803. (In Russ.)
32. Lima S. Nonlethal effects in the ecology of predator – prey interactions. *Bio Science*. 1998;(48):25–34.
33. В Магадане ввели штраф за кормление голубей. Информационное агентство ТАСС. Электронный ресурс. Дата публикации 09.07.2019. URL: <https://tass.ru/obschestvo/6644126/> (Дата обращения: 15.12.2022)
- A fine was introduced for feeding pigeons in Magadan. News agencies TASS. Interner resource. Date of publication 09.07.2019. URL: <https://tass.ru/obschestvo/6644126/> (Accessed: 15.12.2022). (In Russ.)

Об авторе

СЛЕПЦОВ Юрий Александрович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0006-9051-5682>, e-mail: slep-u@yandex.ru

About the author

SLEPTSOV, Yurii Alexandrovich, Researcher, <https://orcid.org/0009-0006-9051-5682>, e-mail: slep-u@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.01.2022

Поступила после рецензирования / Revised 03.02.2023

Принята к публикации / Accepted 30.03.2023

Водная флора высокогорных озер юго-восточной части хребта Черского в пределах бассейна верхнего течения р. Колыма

О. А. Мочалова✉, Е. А. Андриянова, М. Г. Хорева✉

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, г. Магадан, Российская Федерация

✉mochalova@inbox.ru, mkhoreva@ibpn.ru

Аннотация

В юго-восточной части хребта Черского в пределах бассейна верхнего течения р. Колыма между 63–64° с.ш. и 147–148,5° в.д. на высотах около 800–1200 м над уровнем моря находятся несколько межгорных впадин с множеством различных озер, для которых характерна разнообразная флора водных сосудистых растений. Флора представлена 48 видами и 3 гибридами, наибольшим разнообразием характеризуются семейства Potamogetonaceae (13 видов и 1 гибрид) и Ranunculaceae (7 видов). Впервые в Магаданской области выявлен *Stuckenia subretusa*, это самое южное местонахождение вида, встречающегося в основном в дельтовых системах крупных рек в арктических районах. В условиях ультраконтинентального климата со среднегодовой температурой воздуха –13,1 °С широко распространены *Arctophila fulva*, *Eleocharis acicularis*, *Hippuris vulgaris*, *Potamogeton alpinus*, *Ranunculus gmelinii*, *R. reptans*, *Sparganium hyperboreum*. Водные растения произрастают как в крупных, так и в мелких водоемах и водотоках, наиболее разнообразный видовой состав обнаружен на равнинном междуречье в небольших озерах на высотах 750–850 м н.у.м., где произрастает большинство редких видов, известных из 1–3 местонахождений в бассейне Колымы. На больших высотах самый разнообразный видовой состав отмечен в мелких озерах, расположенных рядом с крупными озерами. Во флоре горных озер преобладают облигатно-водные растения (80 %, 41 таксон, из которых 30 гидрофитов и 11 гидрогигрофитов) и только 20 % (10 видов) представлены растениями избыточно увлажненных береговых местообитаний. Среди гидрофитов, представленных 30 таксонами, на высотах до 1050 м н.у.м произрастают 11 видов, а до 950 м – 19. Выявлены 4 вида, охраняемых на региональном уровне: *Stuckenia pectinata* включен в Красную книгу Магаданской области, а *Isoetes asiatica*, *Nuphar pumila*, *Subularia aquatica* включены в Красные книги и Магаданской области, и Республики Саха (Якутия).

Ключевые слова: водные сосудистые растения, флористические находки, Магаданская область, Республика Саха (Якутия), горные озера, высотные пределы распространения

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Русского Географического общества (гранты номер 07/2018, 15/2021), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты номер 19-04-01090-а, номер 19-05-00133-а) и по плановой теме НИР (номер АААА-А17-117122590002-0).

Благодарности. Выражаем искреннюю благодарность за помощь в сборе материалов коллегам из ИБПС ДВО РАН А.В. Андрееву, К.В. Регель и Е.А. Хаменковой, а также А.А. Боброву (ИБВВ РАН) за помощь с определением сложных таксонов и консультации при написании статьи.

Для цитирования: Мочалова О.А., Андриянова Е.А., Хорева М.Г. Водная флора высокогорных озер юго-восточной части хребта Черского в пределах бассейна верхнего течения р. Колыма. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):323–336. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-323-336>

Original article

Aquatic flora of the high-mountain lakes in the southeastern part of the Chersky Ridge within the basin of the upper Kolyma River

О. А. Mochalova✉, Е. А. Andrianova, М. Г. Khoreva✉

Institute of Biological Problems of the North,
Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Magadan, Russian Federation

✉mochalova@inbox.ru, mkhoreva@ibpn.ru

Abstract

We investigated several intermountain depressions in lakes with diverse flora of aquatic vascular plants in the southeastern part of the Chersky Range. The study area was located between 63–64° N and 147–148.5° E, at approximately 800–1200 m a.s.l. We identified 48 species and three hybrids. Among them, the families Potamogetonaceae (13 species and 1 hybrid) and Ranunculaceae (7 species) were characterized by the greatest diversity. For the first time, *Stuckenia subretusa* was found in the Magadan Region, which is the southernmost locality for this species. In an ultracontinental climate with an average annual air temperature of –13.1 °C, *Arctophila fulva*, *Eleocharis acicularis*, *Hippuris vulgaris*, *Potamogeton alpinus*, *Ranunculus gmelinii*, *R. reptans* and *Sparganium hyperboreum* are widespread. The species composition of aquatic plants is most diverse in small lakes at altitudes of 750–850 m a.s.l. in the plain interfluvium, where the rarest species in the Kolyma River Basin are found. At altitudes above 850 m a.s.l. the most diverse species were found in the smallest lakes located near the large lakes. Obligate aquatic plants (80 %; 41 taxa; 30 hydrophytes and 11 hydrohydrophytes) dominated the flora of the mountain lakes. Only 20 % (10 species) of the flora were represented by plants of excessively moist coastal habitats. Among the 30 hydrophyte taxa 11 species grew up to 1050 m a.s.l. and 19 species grew at 950 m a.s.l. We identified four species that were protected at the regional level. *Stuckenia pectinata* is included in the Red Book of the Magadan Region, and *Isoetes asiatica*, *Nuphar pumila* and *Subularia aquatica* are included in the Red Books of the Magadan Region and the Republic of Sakha (Yakutia).

Keywords: aquatic vascular plants, floristic records, Magadan Region, Republic of Sakha (Yakutia), mountain lakes, altitudinal limits of distribution

Funding. This study was supported by the Russian Geographical Society (grants number 15/2021, 07/2018), the Russian Foundation for Basic Research (projects number 19-04-01090-a, 19-05-00133-a), and within the framework of the state assignment (number AAAA-A17-117122590002 -0).

Acknowledgements. We would like to express our sincere gratitude to our colleagues from the IBPN FEB RAS to A.V. Andreev, K.V. Regel and E.A. Khamenkova for their assistance in collecting materials, and A.A. Bobrov from IBIW RAS for help with the identification of problem taxa and advice in writing the article.

For citation: Mochalova O.A., Andrianova E.A., Khoreva M.G. Aquatic flora of the high-mountain lakes in the southeastern part of the Chersky Ridge within the basin of the upper Kolyma River. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):323–336. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-323-336>

Введение

Хребет Черского – обширная горная система на Северо-Востоке Азии (СВА), лежащая между низовьями Яны на севере и верховьями Колымы на юге, протяженностью более 1500 км, с высотами, до 3000 м, хребтами, межгорными плато и впадинами на высотах 800–1200 м над уровнем моря (н.у.м.). Климат территории – один из самых суровых на планете из-за удаленности от морей, близости Полярного круга, а большие высоты способствуют общему выхолаживанию воздуха. Юго-восточная оконечность хребта расположена в пределах Магаданской области, центральная и северная – в Республике Саха (Якутия).

Исследования по выявлению видового состава и особенностей распределения водных растений, произрастающих в столь экстремальных природно-климатических условиях, немногочисленны, еще меньше работ, где рассматриваются флоры водоемов в высокогорьях Севера [1–6]. Некоторые сведения о водных сосудистых растениях хребта Черского приводятся в двух статьях [7, 8], а также в региональных «Флорах» [9–11].

Цель работы – выявить состав и проанализировать закономерности распространения водных

сосудистых растений в межгорных впадинах юго-восточной оконечности хребта Черского, в условиях ультраконтинентального климата на высоте около 1000 м н.у.м.

Изученность флоры региона. Флора и растительность юго-восточной части хребта Черского мало исследована. Ранее ботанические обследования проводились в горах и в долине р. Малый-Сиен [7] и на оз. Дарпир [8]. Для окрестностей оз. Дарпир, где отмечено более 300 видов и указаны многие редкие на СВА кальцефильные растения, из водных растений приведены только 3 вида (*Equisetum fluviatile*, *Sparganium hyperboreum*, *Epilobium palustre*) [8]. Для более крупной территории между поселками Сусуман и Буркандья указаны лишь 13 обычных по всей области видов: *Equisetum fluviatile*, *Sparganium hyperboreum*, *Alopecurus aequalis*, *Arctophila fulva*, *Carex vesicata*, *Thacla natans*, *Caltha palustris*, *Ranunculus gmelinii*, *Comarum palustre*, *Hippuris vulgaris*, *Menyanthes trifoliata*, *Utricularia macrorhiza*, *Tephrosia palustris* [7]. Позднее в низовьях р. Малый-Сиен О.А. Мочаловой и А.А. Бобровым выявлены редкие в регионе *Isoetes asiatica*, *Potamogeton friesii*, *P. obtusi-*

folius, *Subularia aquatica* [12], а также *Nuphar pumila*, *Stuckenia pectinata* (как *Potamogeton pectinatus* L.) [13], однако общий список водной флоры водоемов для долины Малый-Сиена не опубликован.

Материалы и методы исследования

Район исследования – Дарпирская и другие межгорные впадины – находится в системе хребта Черского между 63–64° с.ш. и 147–148,5° в.д. на высотах около 800–1200 м н.у.м. В Дарпирской впадине лежат два крупных озера тектонического происхождения – Момонтай и Дарпир, а также множество более мелких озер. В срединной части впадину пересекает долина р. Омудевка (левый приток р. Ясачная), а с юга ее замыкают хребты Чёрге и Охандя. Омудевское среднегорье в окрестностях оз. Дарпир сложено известняками палеозойского возраста, а хребты Охандя и Чёрге – преимущественно раннемеловыми гранитоидами. На южных предгорьях хребтов Чёрге и Охандя расположено еще одно крупное озеро – Малый, из которого вытекает р. Малый-Сиен. В понижениях в окрестностях этих озер преобладают ледниковые отложения различного состава. В низовьях р. Малый-Сиен, в междуречье ее с р. Берелех находится небольшая равнина с моренными и термокарстовыми озерами. Вся эта территория относится к бассейну Колымы, большей частью располагаясь на водоразделе ее крупных левых притоков Берелех и Омудевка. Протяженность района исследований около 100 км с севера на юг и от 15 до 30 км с запада на восток. Большая часть территории входит в состав кластера «Омудевский» созданного в декабре 2022 г. национального парка «Черский».

Климат в районе исследований ультраконтинентальный с крайне холодными, малоснежными зимами и сухим, довольно теплым летом. По данным метеостанции на оз. Дарпир (1941–1994 гг.), годовая температура воздуха равна –13,1 °С, при абсолютном минимуме –61 °С и средней января –38,4 °С. Температурный максимум – +35 °С отмечен в июле при среднем значении этого месяца +12,6 °С. Переход среднесуточной температуры через ноль наблюдается в середине мая и середине сентября. На период положительных температур приходится не более трети года. Годовая сумма осадков составляет 264 мм, из которых около ¾ выпадет в виде дождя и мороси [14]. Снежный покров ложится

в конце сентября, к апрелю его глубина доходит до 60–65 см, распределение неравномерное. В зимний период на многих реках разрастаются мощные наледи. Высотное положение (800–1100 м) смягчает климатические контрасты, делая зиму менее холодной и более многоснежной, а лето более коротким и менее сухим. Весь район исследования расположен в зоне повсеместного распространения многолетней мерзлоты.

Водные объекты. В районе работ расположено три озера тектонического происхождения, которые по размерной классификации [15] относятся к средним озерам (площадью 10–100 км²). Самое крупное оз. Малый площадью 23,4 км² расположено на высоте 950 м н.у.м., его протяженность около 11 км, максимальная глубина – 65 м [16]. Самое высокогорное – оз. Момонтай (15,8 км²) находится на отметке 1048 м н.у.м., а оз. Дарпир – 14,9 км², 820 м н.у.м. – сопоставимо по размерам с хорошо известным в Магаданской области оз. Джека Лондона (14,4 км², 802 м н.у.м.). В районе исследований расположено нескольких малых (площадью 1–10 км²) озер [15]: Уи, Урультун, Малый Дарпир, Тобондя и др., и множество очень малых озер и озерков (площадь 0,001–1 км²) ледникового, моренного или термокарстового происхождения. Большинство средних и малых озер имеет каменистое дно и узкие каменистые пляжи. Мелкие озера разнообразны по ландшафтному положению, размерам, грунтам, по их берегам нередко заболоченные приозерные понижения с многочисленными торфянистыми мочажинами. Опубликованная гидрологическая информация по этим озерам нами не найдена.

Методы. Исследования флоры проводились в 2018, 2020, 2021 гг. в составе комплексных экспедиций Института биологических проблем Севера (ИБПС) ДВО РАН, организованных с целью проектирования национального парка «Черский» и изучения биоразнообразия его территории. Флора окрестностей оз. Момонтай изучалась нами 28.07–9.08.2018 г., в это же время коллегами (А.В. Андреевым, Е.А. Хаменковой) были собраны водные растения на оз. Дарпир. На оз. Малый и его окрестностях флористические исследования проводились 21.07–1.08.2020 г., на оз. Уи – 21.06–28.06.2021 г., в окрестностях озер Момонтай и Урультун – 11.08–28.08.2021 г.

Изучение флоры национального парка «Черский» проводилось маршрутным методом. Водные объекты обследовались с особым внима-

нием – для них составлялись списки водных сосудистых растений, к которым мы относили таксоны, закономерно встречающиеся в водной среде, т. е. собственно водные и прибрежно-водные виды. В части водоемов с помощью портативного многопараметрового анализатора Hanna HI 98129 измерялись температура, общая минерализация, pH, визуально оценивались режим обводнения и грунты. Кроме того, учтены данные кратковременных полевых исследований О.А. Мочаловой и А.А. Боброва 24–26.08.2012 на правом берегу нижнего течения р. Малый-Сиен, которые опубликованы лишь частично [12].

Все водоемы были разделены на группы по их размерам. Изученные средние и малые озера рассматриваются в работе отдельно, флора мелких озер и озерков в их окрестностях (в водосборе более крупных озер) объединена в общий список. Высота озер н.у.м. определена по топографическим картам и цифровой топографической модели (SRTM, www.usgs.gov). Виды растений, объем которых в настоящий момент до конца не понятен, приняты в широком смысле. Гербарные материалы хранятся в гербариях ИБПС ДВО РАН (MAG), ИБВВ РАН (IBIW). Типы ареалов (широтные и долготные группы) даны по «Конспекту флоры Чукотской тундры» [17]. Для выявления максимальных высот произрастания на территории Магаданской области ряда видов, в первую очередь редких, использованы собственные данные и база данных по гербарной коллекции MAG. Образцы из коллекции частично оцифрованы и размещены на сайтах ИБПС (<https://herbarium.ibpn.ru>) и МГУ (<https://plant.depo.msu.ru>).

Результаты и обсуждение

Некоторые сведения о ландшафтах, физико-географических особенностях, биоте и истории освоения южной части хребта Черского – района, имеющего высокую природоохранную ценность, опубликованы А.В. Андреевым с соавт. [18]. Ими было разработано предложение о создании в описываемом районе национального парка «Черский». Также опубликованы предварительные сведения о флоре и растительности окрестностей оз. Малый, где отмечено около 215 видов сосудистых растений [19]. По нашим данным, для юго-восточной оконечности хребта Черского характерны светлехвойные лиственничные редколесья, кедровостланиковые заросли, участки осоково-моховых тундр, сухие лишайниково-кустарничковые тундры и каменистые осыпи.

По долине р. Омuleвка произрастают ивово-чозениевые леса, а вдоль менее крупных рек и ручьев – крупнокустарниковые ивняки. Лиственничники распространены до высоты около 1200–1300 м н.у.м. Флора района, по предварительным данным, включает около 350 видов сосудистых растений.

Разнообразие водных сосудистых растений

Водные сосудистые растения в межгорных впадинах юго-восточной части хребта Черского представлены 51 таксоном (48 видов и 3 гибрида) из 26 родов и 20 семейств (табл. 1). Это высокое разнообразие водных растений, оно составляет чуть менее 2/3 от водной флоры Магаданской области и представлено на территории около 2000 км² (менее 0,5 % от площади области). Для сравнения, в долине р. Колыма на участке протяженностью около 1000 км отмечено 62 таксона (59 видов и 3 гибрида) [2], а по долине р. Кава – в важном флористическом рефугиуме на юго-западе области – 55 таксонов (51 вид и 4 гибрида) [20].

Наибольшее число таксонов отмечено в семействах Potamogetonaceae (13 видов и 1 гибрид), Ranunculaceae (7 видов), Suerogaceae (5) и Lentibulariaceae (4). Большинство родов представлены одним–тремя таксонами (см. табл. 1), исключение составляют роды *Potamogeton* (11), *Ranunculus* (5), *Utricularia* (4). Гибриды составляют 5,8 % от общего разнообразия водных сосудистых растений, что гораздо ниже их участия во флоре речных долин: 9,2 % для р. Колыма и 7,3 % для р. Кава [2, 20].

Соотношение географических элементов традиционно для водной флоры северных регионов. Среди широтных групп преобладают пюризональные (21 вид, 44 %) и арктобореальные (15, 31) виды, совсем небольшой вклад вносят арктические (5, 10) и бореальные (7 видов, 15 %) виды. Среди долготных групп более половины составляют голарктические (32 вида, 67 %) виды, на втором месте – пюрирегиональные (6, 13), участие евразийских (4, 8), азиатских (3, 6) и азиатско-североамериканских (3 вида, 6 %) видов примерно одинаково (см. табл. 1).

В экологическом спектре преобладают облигатноводные растения (гидрофиты, гигрогидрофиты, гидрогигрофиты) – 41 таксон (80 %), только 10 видов (20 %) представлены растениями избыточно увлажненных береговых местообитаний (гигрофиты). Среди облигатноводных ра-

Таблица 1

Видовой состав водных сосудистых растений на озерах юго-восточной части хребта Черского

Table 1

The list of aquatic vascular plants on the lakes of the southeastern part of the Chersky Range

Таксон Taxon	Экологическая группа Ecological group	Ареал, широтная группа Range, latitudinal group	Ареал, долготная группа Range, longitudinal group	Оз. Малайк Lake Malyk	Озера вокруг оз. Малайк Lakes around lake Malyk	Оз. Момонтай Lake Momontay	Озера вокруг оз. Момонтай Lakes around lake Momontay	Оз. Чи Lake Chi	Озера вокруг оз. Чи Lakes around lake Chi	Оз. Чулытун Lake Chulytun	Озера вокруг оз. Чулытун Lakes around lake Chulytun	Оз. Дарпир и озера вокруг Lake Darpir and lakes around	Озера по р. Малайк-Сием Lakes along river Malyk-Sien	Оз. Лабанкыр (по Николину) Lake Labankyr (according to Nikolin)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Площадь озера, км² Area of lake, km²				23,4	—	15,8	—	6,16	—	6,67	—	14,9	—	44,7
	Высота над у.м., м Altitude above sea level, m				950		1048		1050		944		820	780-810	1013
	РН, кислотность РН, acidity				5,7		5,77		6,7		5,73		н/д		н/д
	Ррм, минерализация, мг/л Ррm, mineralization, mg/l				12,4		10,2		8		50,9		н/д		н/д
1	<i>Equisetum fluviatile</i> L.	II	PZ	HA						+		+	+	+	+
2	<i>Isoëtes asiatica</i> (Makino) Makino	I	AB	AZ										+	
3	<i>Sparganium hyperboreum</i> Laest.	II	AB	HA		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	<i>S. emersum</i> Rehm. × <i>S. hyperboreum</i> Laest.	II	HYB											+	
5	<i>Potamogeton alpinus</i> Balb.	I	AB	HA		+		+	+			+	+	+	+
6	<i>Potamogeton berchtoldii</i> Fieb.	I	PZ	HA		+									
7	<i>Potamogeton compressus</i> L.	I	PZ	EA										+	
8	<i>Potamogeton friesii</i> Rupr.	I	PZ	HA										+	
9	<i>Potamogeton gramineus</i> L.	I	PZ	HA							+	+	+	+	

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
10	<i>Potamogeton natans</i> L.	I	PZ	HA										+	
11	<i>Potamogeton obtusifolius</i> Mert. et W. D. J. Koch	I	PZ	HA										+	
12	<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	I	PZ	PR		+					+	+	+	+	+
13	<i>Potamogeton praelongus</i> Wulf.	I	PZ	HA				+					+	+	+
14	<i>Potamogeton sibiricus</i> A. Benn.	I	A	HA								+	+	+	+
15	<i>Potamogeton x nitens</i> Web. (<i>P. gramineus</i> × <i>P. perfoliatus</i>)	I	HYB									+			
16	<i>Stuckenia filiformis</i> (Pers.) Börner	I	PZ	R								+		+	+
17	<i>Stuckenia pectinata</i> (L.) Börner	I	PZ	PR										+	
18	<i>Stuckenia subretusa</i> (Hagstr.) Holub (<i>S. vaginata</i> (Turez.) Holub s.l.)	I	A	HA								+	+		
19	<i>Alopecurus aequalis</i> Sobol.	IV	B	HA						+					
20	<i>Arctophila fulva</i> (Trin.) Anderss.	III	A	HA		+	+	+	+	+		+	+	+	+
21	<i>Eleocharis acicularis</i> (L.) Roem. et Schult.	III	PZ	HA		+		+	+			+	+	+	+
22	<i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roem. et Schult.	III	PZ	HA		+									
23	<i>Carex concolor</i> R. Br.	IV	AB	HA						+		+		+	+
24	<i>Carex rhynchochrysa</i> C. A. Mey.	IV	B	AZ-NA				+	+	+		+	+	+	+
25	<i>Carex vesicata</i> Meinsh.	IV	B	AZ								+	+		
26	<i>Nuphar pumila</i> (Timm) DC.	I	AB	EA										+	
27	<i>Thacla natans</i> (Pall. ex Georgi) Deyl et Soják	III	AB	AZ-NA						+			+	+	
28	<i>Caltha palustris</i> L. s.l.	III	AB	HA	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
29	<i>Ranunculus gmelinii</i> DC.	III	AB	HA	+	+	+	+	+	+		+	+		+
30	<i>Ranunculus hyperboreus</i> Rottb.	IV	AB	HA		+		+							
31	<i>Ranunculus pallasii</i> Schlecht.	III	A	HA										+	
32	<i>Ranunculus reptans</i> L.	IV	B	HA		+	+	+	+	+		+	+	+	+
33	<i>Ranunculus trichophyllus</i> Chaix	I	PZ	PR	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
34	<i>Subularia aquatica</i> L.	I	AB	HA		+								+	
35	<i>Rorippa barbareifolia</i> (DC.) Kitag.	IV	B	AZ		+			+					+	+
36	<i>Comarum palustre</i> L.	III	AB	HA	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
37	<i>Callitriche hermaphrodita</i> L.	I	PZ	HA				+				+	+		
38	<i>Callitriche palustris</i> L.	I	PZ	HA				+		+		+		+	+

39	<i>Epilobium palustre</i> L.	IV	AB	HA		+				+				+			+		
40	<i>Myriophyllum sibiricum</i> Kom.	I	PZ	HA		+							+				+		
41	<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	I	PZ	EA													+		
42	<i>Hippuris vulgaris</i> L.	I	PZ	PR		+	+						+				+		+
43	<i>Cicuta virosa</i> L.	III	B	EA													+		
44	<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	III	B	HA		+				+							+		+
45	<i>Limosella aquatica</i> L.	III	PZ	PR									+						
46	<i>Utricularia intermedia</i> Hayne	I	AB	HA		+											+		
47	<i>Utricularia macrohiza</i> Le Conte	I	PZ	AZ-NA		+							+				+		
48	<i>Utricularia minor</i> L.	I	AB	HA		+											+		
49	<i>Utricularia</i> × <i>ochroleuca</i> R. Hartm. (<i>U. minor</i> × <i>U. intermedia</i>)	I	HYB						+										
50	<i>Galium trifidum</i> L.	IV	AB	HA						+							+		
51	<i>Tephrosieris palustris</i> (L.) Reichenb.	IV	A	HA		+				+								+	
	Количество таксонов Number of taxa				4	23	7	17	16	20	3	27	25	39	20				

Примечание. Полу жирным шрифтом выделены охраняемые виды. Ареал: Широкая группа: А – арктический, АВ – арктобореальный, В – бореальный, PZ – пльоризональный; Долготная группа: AZ-NA – азиатско-североамериканский, AZ – азиатский, EA – евразийский, HA – голарктический (евразийско-североамериканский), PR – пльорирегинальный; HYB – безарейный гибрид. Экогруппа: I – гидрофит, II – гигрогидрофит (геллофит), III – гидрогигрофит (гигрогеллофит), IV – гигрофит.

Note. Protected species are given in bold. Range: latitudinal group: A – arctic, AB – arctic-boreal, B – boreal, PZ – plurizonal; longitudinal group: AZ-NA – Asian-North American, AZ – Asian, HA – Eurasian, EA – Eurasian-North American, PR – pluriregional; HYBR – hybrid without range. Ecological group: I – hydrophyte, II – hydrohydrophyte (helophyte), III – hydrohydrophyte (hygrohelophyte), IV – hygrophyte.

стений наиболее разнообразны гидрофиты (растения, постоянно погруженные в воду) – 27 таксонов (53 %), 11 таксонами (22 %) представлены гигрогидрофиты (воздушно-водные растения, побеги которых частично погружены в воду) и 3 видами (6 %) – гидрогидрофиты (растения прибрежной зоны).

Обилие видов количественно не характеризовалось, так как часть сборов проводилось коллегами. Обычные таксоны составляют около четверти от общего числа видов, они представлены хорошо адаптированными к суровым природно-климатическим условиям региона видами: *Spartanium hyperboreum*, *Potamogeton alpinus*, *Arctophila fulva*, *Eleocharis acicularis*, *Carex rhynchophylla*, *Caltha palustris*, *Hippuris vulgaris*, *Ranunculus gmelinii*, *R. reptans*, *Comarum palustre*, *Menyanthes trifoliata*, *Epilobium palustre*. Эти таксоны нередки по всем районам северо-востока России, в том числе и на Чукотке, и в северных районах Якутии.

Новые и редкие виды

Stuckenia subretusa (Hagstr.) Holub – вид, впервые обнаруженный в Магаданской области. Произрастает в водоемах дельтовых систем крупных рек (Колымы, Яны, Индигирки и др.) и в долинных озерах в основном к северу от 68° с.ш. [2, 11]. 1) Магаданская обл., Сусуманский р-н, окрестности оз. Урультун, около 9 км к юго-востоку, долина р. Урультун, небольшое моренное озеро, в воде у берега, 63,716242° с.ш., 148,519301° в.д., около 920 м н.у.м., 18.08.2021, Хорева М.Г., опр. Бобров А.А. (MAG0011331, IBIW). Самое южное местонахождение вида на СВА.

Potamogeton compressus L. – редкий и в Якутии, и в Магаданской области вид, тяготеющий к долинам Колымы, Лены и их крупных притоков. 1) Магаданская обл., Сусуманский р-н, междуречье рр. Бөрёлёх и Малык-Сиен, оз. Щучье, 63,28066° с.ш., 147,87357° в.д., 805 м н.у.м., 25.08.2012, Бобров А.А., Мочалова О.А. (MAG0014343, IBIW).

Potamogeton praelongus Wulf. – нечастый в Якутии и в Магаданской области вид, предпочитающий крупные озера. 1) Якутия, Момский р-н, оз. Большой Дарпир, около 1,5 км от Дарпир-Сиена, 64,18113° с.ш., 148,03762° в.д., 5.08.2018, Андреев А.В., опр. Мочалова О.А. (MAG0014337); 2) там же, оз. Большой Дарпир, выбросы, 30.09.2018, Андреев А.В., опр. Мочалова О.А. (MAG0014339); 3) Магаданская обл., Сусуманский р-н, окрестности оз. Момонтай, оз. Близ-

нецы, на глубине около 1,5 м, 63,734429° с.ш., 148,262911° в.д., 1044 м н.у.м., 23.08.2021, Хорева М.Г., опр. Бобров А.А. (MAG0011335, IBIW); 4) там же, в междуречье рр. Бөрёлёх и Малык-Сиен, оз. Щучье, 63,28002° с.ш., 147,86720° в.д., 24.08.2012, Бобров А.А., Мочалова О.А. (MAG, IBIW); 5) там же, в междуречье рр. Бөрёлёх и Малык-Сиен, оз. Окуневое, около торфянистого берега, 63,28571° с.ш., 147,84556° в.д., 24.08.2012, Бобров А.А., Мочалова О.А. (MAG). В районе исследований вид нередок.

Potamogeton × nitens Web. (*P. gramineus* × *P. perfoliatus*) – один из наиболее распространенных гибридных рдестов, чаще встречающийся в реках. Отдельные находки отмечены почти во всех районах Якутии и Магаданской области. 1) Магаданская обл., Сусуманский р-н, окрестности оз. Урультун, около 8 км к юго-востоку, протока к оз. Кемкинья, на глубине около 60 см, 63,720680° с.ш., 148,501253° в.д., около 910 м н.у.м., 18.08.2021, Хорева М.Г., опр. Бобров А.А. (MAG0011342, IBIW).

Utricularia × ochroleuca R. Hartm. (*U. intermedia* × *U. minor*) – гибридогенный вид, ранее приводившийся как *U. stygia* Thor, известный из пяти местонахождений в Магаданской области, но не собиравшийся в бассейне р. Колыма [21]. Этот таксон спорадически встречается по переувлажненным мочажинам в окрестностях оз. Момонтай и Уи: 1) Магаданская обл., Сусуманский р-н, южный берег оз. Уи, моховая мочажина на низком берегу, 63,80891° с.ш., 147,92699° в.д., 1050 м н.у.м., 27.06.2021, Мочалова О.А. (MAG0012252); 2) там же, окр. оз. Юг, мочажина между двумя термокарстовыми озерами, переувлажненный осоковник, 63,83516° с.ш., 147,68354° в.д., 1120 м н.у.м., 25.06.2021, Мочалова О.А. (MAG0011396); 3) там же, р. Момонтай, в 600 м ниже устья р. Зима, лужи в пойме, 63,791566° с.ш., 148,146866° в.д., 1030 м н.у.м., 13.08.2021, Хорева М.Г., опр. Бобров А.А. (MAG0011344, IBIW); 4) там же, окр. оз. Момонтай, небольшое озерко в 300 м к западу от оз. Момонтай, в воде, 63,73197° с.ш., 148,14625° в.д., 03.08.2018, Андриянова Е.А., опр. Мочалова О.А. (MAG0002656).

Отметим, что на оз. Малык собран *Callitriche* sp., наиболее вероятно относящийся к *C. subanceps* Petrov (*C. anceps* Fernald), – экземпляры были с молодыми бескрылыми округлыми плодами. Магаданская обл., Сусуманский р-н, озерко на западном берегу оз. Малык, на мелко-

воде, 63,53815° с.ш., 147,89382° в.д., 28.07.2020, Андриянова Е.А., опр. Мочалова О.А. Из-за малого количества гербария этот вид мы пока в список видов не включили.

Редкие и охраняемые виды

Район исследований находится на территории двух регионов: Республики Саха (Якутии) и Магаданской области. Среди водных сосудистых растений к охраняемым относятся четыре вида, причем три из них включены в Красные книги обоих регионов [13, 22]. Все находки краснокнижных видов сделаны в пределах Магаданской области и уже опубликованы, поэтому только перечислим их.

Isoetes asiatica – одно местонахождение на оз. Большое [13]. В Красной книге Республика Саха (Якутия) [22] указан как *I. echinospora* Durieu s.l.

Nuphar pumila – одно местонахождение на оз. Лесные братья [13].

Subularia aquatica – 3 местонахождения около оз. Малый, где нередок [23], и одно – на оз. Большое [13]. Вероятно, встречается и в якутской части района.

Stuckenia pectinata (как *Potamogeton pectinatus*) – охраняется только в Магаданской области, где известно местонахождение на оз. Окунеево [13].

Из этих видов только *Subularia aquatica* произрастает на территории, входящей в состав национального парка «Черский». Остальные местонахождения расположены вне территории этой ООПТ.

Отметим, что в окрестностях озер Момонтай и Уи в Магаданской области в сырых тундрах были отмечены охраняемые в Якутии [22] *Pedicularis adunca* Bieb. ex Stev. и *Trichophorum cespitosum* (L.) C. Hartm. (*Kreczetoviczia caespitosa* (L.) Tzvel.). Вполне вероятно, что они произрастают и в якутской части исследуемой территории, которая изучена гораздо хуже.

Видовое разнообразие водоемов разных типов

Среди исследованных трех средних и трех малых озер наибольшим разнообразием отличается оз. Уи (16 видов). Это единственное на изученной территории мелководное озеро со сплавинными берегами, многочисленными затонами, заливами, уровень воды в котором в настоящее время примерно на метр ниже уреза озерной котловины. За счет разнообразия ми-

крозотопов на этом относительно крупном озере произрастают многие виды, которые обычно встречаются только в озерах. До 20 % площади озера, в основном в южной части, занимают мелководья, заросшие травяно-моховой сплавинной из *Arctophila fulva*, *Calamagrostis langsдорффи* (Link) Trin., *Carex chordorrhiza* Ehrh., *C. rariflora* (Wahlenb.) Smith, *C. rhynchophysa*, *Andromeda polifolia* L., *Menyanthes trifoliata*, с многочисленными протоками и озерами-мочажинами, в которых встречаются *Sparganium hyperboreum*, *Potamogeton alpinus*, *Callitriche palustris*, *Ranunculus gmelinii* и др.

Сборы на оз. Дарпир проводились коллегами-биологами (не ботаниками), поэтому не всегда было можно установить место произрастания вида (само озеро или водоем рядом), однако на озере собрано не менее 9 видов, которые представлены в штормовых выбросах. Данные по гидрохимии не собирались, но так как озеро окружено горными массивами с известняками, предполагаем, что минерализация воды должна быть выше, чем в других озерах. В выбросах преобладают *Potamogeton praelongus* и *P. perfoliatus*, а также более редкие *Callitriche hermaphroditica*, *Stuckenia filiformis*, *Ranunculus trichophyllus* и др.

В озерах Малый, Момонтай и Урультун водная флора представлена всего тремя-семью видами, что объясняется поздним сходом льда, низкой температурой воды, неблагоприятным для произрастания растений грунтом (крупные валуны) и сильным ветроволновым воздействием на прибрежные зоны. Всего три вида найдены и в оз. Урультун – озере с более высокой минерализацией воды (51 мг/л) по сравнению с другими крупными озерами с минерализацией 8–13 мг/л.

Водная флора озерков, расположенных в радиусе нескольких километров от крупных озер, гораздо разнообразнее, в среднем произрастает пять-семь видов, разнообразие отдельных водоемов достигает семи-десяти таксонов. Наиболее разнообразный состав отмечен в небольших озерах, находящихся в 100–800 м от крупных озер со стороны, откуда из озер вытекают реки (на юге оз. Малый и на севере оз. Момонтай). Там отмечены *Myriophyllum sibiricum*, обильны *Potamogeton perfoliatus*, *Ranunculus trichophyllus*, а в озерах рядом с оз. Малый обычен редкий в регионе *Subularia aquatica*. Озерки, расположенные рядом с более минерализованным оз. Урультун и р. Урультун, наиболее разнообразны по видовому составу, там встречаются многие ред-

кие виды: *Stuckenia filiformis*, *S. subretusa*, *Potamogeton* × *nitens*, *Potamogeton sibiricus*, *Callitriche hermaphroditica*, *Limosella aquatica* и др.

В озерах моренного, моренно-термокарстового и термокарстового происхождения обычны *Sparganium hyperboreum*, *Hippuris vulgaris*, *Caltha palustris*, *Ranunculus reptans*, реже, только в отдельных озерах, произрастают *R. hyperboreus*, *R. trichophyllus*, *Callitriche palustris*, *Potamogeton alpinus*, *Utricularia macrorhiza*. Почти во всех водоемах заросли у берега образуют *Arctophila fulva*, *Carex rhynchophylla*, *Comarum palustre*, менее распространены *Carex stans*, *Menyanthes trifoliata*, *Equisetum fluviatile*. По мочажинам, реже по мелким термокарстовым озерам, отмечены *Utricularia minor*, *U. intermedia*, *Epilobium palustre*. Основное разнообразие водных растений сосредоточено в системах из нескольких моренно-термокарстовых озерков, связанных между собой ручьями или протоками, заросшими осоково-моховыми сплавинами.

Самыми бедными по составу являются небольшие моренные озера с каменистым дном и сильно изменяющимся уровнем воды на нагорных террасах и водоразделах. В них водные растения или отсутствуют или растут всего один–три вида (*Ranunculus reptans*, *Eleocharis acicularis*, *Hippuris vulgaris*) вне зависимости от высоты и местонахождения озерков.

Почти все реки и ручьи в районе горного типа с быстрым течением и каменистым дном, водные растения в них отсутствуют. Изредка по глубоким протокам-вискам между термокарстовыми озерами растет *Sparganium hyperboreum* (вегетативные растения), а вдоль берегов – *Equisetum fluviatile*, *Carex rhynchophylla*, *Menyanthes trifoliata*.

Высотные пределы распространения водных растений

Водоемы и водотоки юго-восточной части хребта Черского характеризуются разнообразным видовым составом, несмотря на их высокий гипсометрический уровень – вся территория расположена на высотах более 750 м н.у.м. Наиболее разнообразный состав водных растений обнаружен, как и следовало ожидать, в озерах на высотах 750–850 м, в долине р. Малый-Сиен (междуречье рек Малый-Сиен и Буркандья). Только в этом интервале высот растут *Isoetes asiatica*, *Sparganium angustifolium*, *S. emersum*, *Potamogeton compressus*, *P. natans*, *P. friesii*, *P. obtusifolius*, *Stuckenia pectinata*, *Nuphar pumila*, *Ranunculus*

pallasii (табл. 2). Выше 950 м не отмечены *Potamogeton berchtoldii*, *P. × nitens*, *Stuckenia filiformis*, *S. vaginata*, *Subularia aquatica*, *Limosella aquatica*, *Myriophyllum verticillatum*. На высоте 1050 м расположены оз. Уи, самое богатое по видовому составу среди средних и малых озер, и оз. Момонтай, второе по видовому разнообразию. На всех, в том числе и более чем 1000-метровых высотах, встречаются 18 видов, которые обычны и по всей территории СВА: в озерах – *Sparganium hyperboreum*, *Potamogeton alpinus*, *Ranunculus gmelinii*, *Callitriche palustris*, а вдоль берегов – *Arctophila fulva*, *Carex rhynchophylla*, *Comarum palustre*, *Galium trifidum*, *Epilobium palustre* и др. Среди наиболее изученных 30 таксонов гидрофитов и гидрогидрофитов (растений, постоянно погруженных в воду) на высотах до 1050 м н.у.м произрастают 11 видов (37 %), а до 950 м – 19 видов (63 %).

Наиболее высокогорные обследованные нами озера, в которых отмечены водные растения, расположены в окр. оз. Зеленоватое (1220 м н.у.м.) восточнее оз. Момонтай и на водоразделе оз. Уи и р. Омудевка на 1150 м. Это термокарстовые и моренно-термокарстовые озера, не превышающие по площади 50 м², среди осоковых тундр и лиственничных редколесий, большинство из которых перемерзают до дна. В них в разных сочетаниях произрастают четыре–шесть видов: *Arctophila fulva*, *Carex rhynchophylla*, *Caltha palustris*, *Sparganium hyperboreum*, *Ranunculus trichophyllus*, *R. reptans*, *Hippuris vulgaris*, *Callitriche palustris*, а в мочажинах около озер – *Utricularia minor*, *U. × ochroleuca*. В более высоко расположенных озерах в горных цирках и ущельях, например, севернее оз. Малый на высоте 1300–1350 м, водные макрофиты не найдены.

В последние десятилетия сборы водных растений в Магаданской области проводились в нескольких системах горных и водораздельных озер, однако большинство из них находится на высотах до 900 м н.у.м: оз. Солнечное (Тенькинский р-н) – 753 м, оз. Медвежка (Среднеканский р-н) – 776 м, Эликчанские озера (Хасынский р-н) – 798–802 м, оз. Джека Лондона (Ягоднинский р-н) – 803 м, оз. Галитур и Тальские озера 800 – 822 м (Хасынский р-н), оз. Черное и озера по р. Хета 854 – 880 м (Хасынский р-н). Только озеро в истоках р. Хурэнди (1080 м) и мелкие тундровые мочажины на Ольском плато (Хасынский р-н) располагаются на высотах более 1000 м. Сравнение высотных пределов для

Таблица 2

**Высоты произрастания водных растений из группы гидрофитов в озерах
юго-западной части хребта Черского и в Магаданской области**

Table 2

**Altitudes of growth of aquatic plants from group hydrophytes
in the lakes of the southwestern part of the Chersky Ridge and in the Magadan Region**

Растение Plant	Озера юго-западной части хребта Черского Lakes of the southwestern part of the Chersky Range				Озера Магаданской области Lakes of the Magadan region	
	Высота, м н.у.м. Altitude, m a.s.l.				Макс. высота Maximum altitude	Местонахождения в горных озерах Locations in the mountain lakes
	до 850 up to 850	до 950 up to 950	до 1050 up to 1050	Макс.высота Maximum altitude		
<i>Equisetum fluviatile</i> L.	+	+	+	1100	~950	Верховья р. Хета
<i>Isoetes asiatica</i> (Makino) Makino	+			813	802	Эликчанские озера
<i>Sparganium x emersum</i> Rehm.	+			810	780	Верховья р. Туонах
<i>Sparganium hyperboreum</i> Laest.	+	+	+	1220	1361	Верховья р. Эльгенья
<i>Potamogeton alpinus</i> Balb.	+	+	+	1070	~800	Тальские озера
<i>Potamogeton berchtoldii</i> Fieb.		+		950	1080	Верховья р. Хурэнди
<i>Potamogeton compressus</i> L.	+			810	<400	
<i>Potamogeton gramineus</i> L.	+	+		950	854	Окр. оз. Черное
<i>Potamogeton natans</i> L.	+			810	~800	Тальские озера
<i>Potamogeton friesii</i> Rupr.	+			810	<400	
<i>Potamogeton obtusifolius</i> Mert. et W. D. J. Koch,	+			810	<400	
<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.	+	+		960	880	Окр. оз. Черное
<i>Potamogeton praelongus</i> Wulf.	+		+	1050	802	Эликчанские озера
<i>Potamogeton sibiricus</i> A. Benn.	+	+		945	~800	Тальские озера
<i>Potamogeton x nitens</i> Web.		+		945	<400	
<i>Stuckenia filiformis</i> (Pers.) Börner	+	+		945	~800	Тальские озера
<i>Stuckenia pectinata</i> (L.) Börner	+			815	<400	
<i>Stuckenia subretusa</i> (Hagstr.) Holub	+	+		945	<400	
<i>Nuphar pumila</i> (Timm) DC.	+			810	408	Оз. Тихое
<i>Ranunculus trichophyllus</i> Chaix	+	+	+	1220	922	Верховья р. Хета
<i>Subularia aquatica</i> L.	+	+		980	850	Верховья р. Буюнда
<i>Callitriche hermaphroditica</i> L.	+	+	+	1050	790	Верховья р. Иванья
<i>Callitriche palustris</i> L.	+	+	+	1220	~800	Тальские озера
<i>Myriophyllum sibiricum</i> Kom.	+	+		950	854	Окр. оз. Черное
<i>Myriophyllum verticillatum</i> L.	+	+		944	802	Эликчанские озера
<i>Hippuris vulgaris</i> L.	+	+	+	1220	1080	Ольское плато
<i>Utricularia intermedia</i> Hayne	+	+		980	690	Р. Омолон, метеост. Лабазная
<i>Utricularia macrorhiza</i> Le Conte	+	+	+	1060	820	Окр. оз. Черное
<i>Utricularia minor</i> L.	+		+	1150	820	Окр. оз. Черное
<i>Utricularia</i> × <i>ochroleuca</i> R. Hartm.			+	1060	820	Окр. оз. Черное

ряда видов, встречающихся в озерах юго-востока хребта Черского, с другими наиболее высокогорными местонахождения в Магаданской области представлено в табл. 2.

На максимальных высотах около 1150–1200 м ожидаемо встречаются *Sparganium hyperboreum*, *Ranunculus trichophyllus*, *Hippuris vulgaris*, которые и в других районах Магаданской области собирались на высотах более 1000 м, к примеру, на Ольском плато, являющемся крупным рефугиумом арктических и арктоальпийских видов [24]. Впервые на больших высотах отмечена *Utricularia minor*, ранее собиравшаяся только на 800 м н.у.м. в окр. оз. Черное (60,99356° с.ш., 151,73125° в.д.), допускаем, что она распространена в горных районах чаще, но пропускается при флористических сборах. Максимальная высота находок водных растений зафиксирована для *Sparganium hyperboreum* – 1370 м н.у.м. в Тенькинском р-не, в верховьях р. Эльгенья, горное озеро, 62,1412° с.ш., 148,8534° в.д., 28.07.2009, Синельникова Н.В. (MAG). Из рдестов выше 1000 м произрастают *Potamogeton alpinus*, *P. praelongus*, а *P. berchtoldii* на таких высотах собирався нами на Ольском плато. Интересны находки на высотах около 1000 м *Utricularia* × *ochroleuca* в окрестностях озер Момонтай, Уи, Юг, где он нередок в мочажинах, тогда как на меньших высотах не собирався. Этот таксон очень редок в Магаданской области (недавно был собран вместе с *U. minor* в окр. оз. Черное), но является не редким на восточной Чукотке [6, 21].

На оз. Лабынкыр (62,43437° с.ш., 143,60624° в.д.), расположенном на Оймяконском нагорье на высоте 1000–1010 м н.у.м. в сходных климатических условиях Е.Н. Николиным [4, 5] отмечены те же виды, что и на озерах юго-востока хребта Черского: *Potamogeton alpinus*, *P. praelongus*, *P. perfoliatus*, *P. sibiricus*, *Sparganium hyperboreum*, *Ranunculus trichophyllus*, *Hippuris vulgaris* и др. (см. табл. 1).

Большинство видов водных растений способно произрастать в водоемах на высотах 800–1000 м в экстремальных условиях районов с ультраконтинентальным климатом, среднегодовой температурой воздуха –13,1°С и многолетней мерзлотой. На таких высотах они отмечались в разных частях Магаданской области и в сопредельных районах Якутии, но в большинстве местонахождений произрастает не более десятка видов. Богатый видовой состав отмечается только во впадинах и на плоскогорьях с многочисленными

и разнотипными озерами. Высотные пределы распространения водных растений следует искать в водоемах, расположенных выше 1000 м, причем как в мелких водораздельных озерах, мочажинах, так и в более крупных озерных системах.

Изучение влияния высотного градиента на распределение водных растений проводилось в регионах с гораздо более мягким климатом. К примеру, анализ флоры более чем 300 водоемов в низкогорьях Англии показал, что высота была более важным фактором, определяющим видовое богатство, чем гидрохимия и размер водоемов, и снижение видового богатства с высотой не связано с уменьшением общей площади доступных местообитаний. Редкие водные растения, встречающиеся только в одном или двух местонахождениях, чаще растут на малых высотах, тогда как виды, произрастающие в высокогорьях, встречаются по всему градиенту высот [25].

Факторы, влияющие на распространение водных растений, влияют комплексно, к числу наиболее значимых относят широтный градиент, высоту над уровнем моря, размер и гидрохимию водоемов, антропогенное воздействие [3, 26]. В районе нашего исследования, в озерных впадинах юго-восточной части хребта Черского, эти закономерности тоже работают. Учитывая, что кроме высотного градиента на распределение водных растений влияют множество других факторов, проведение статистического анализа высотных пределов распространения видов в наши задачи пока не входило, однако полученные данные впоследствии могут быть вовлечены в комплексный анализ.

Заключение

Юго-восток хребта Черского – территория с множеством озер, расположенных во впадинах на высотах 850–1200 м над уровнем моря, она характеризуется богатой и разнообразной флорой водных сосудистых растений (48 видов и 3 гибрида), произрастающих в условиях ультраконтинентального климата со среднегодовой температурой воздуха –13,1°С. Наиболее разнообразный состав обнаружен в озерах на высотах 750–850 м в долине р. Малый-Сиен. На высотах до 1100 м водные растения распространены как в крупных, так и в мелких водоемах и водотоках, более разнообразный состав отмечен в небольших озерах, расположенных рядом с крупными озерами. Максимальная высота озер, где отмечены растения, – 1220 м н.у.м.

Список литературы / References

1. Takahashi H., Volotovskiy K.A., Sato T. A quantitative comparison of distribution patterns in four common *Sparganium* species in Yakutia, Eastern Siberia. *Acta Phytotax. Geobot.* 2001;51(2):155–167.
2. Бобров А.А., Мочалова О.А. Водные сосудистые растения долины Колымы: разнообразие, распространение, условия обитания. *Бот. журн.* 2017;102(10):1347–1378. <https://doi.org/10.1134/S0006813617100015>
- Bobrov A.A., Mochalova O.A. Aquatic vascular plants of the Kolyma River valley: diversity, distribution, habitat conditions. *Botanicheskii Zhurnal.* 2017;102(10):1347–1378. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813617100015>
3. Alahuhta J., Virtala A., Hjort J. et al. Average niche breadths of species in lake macrophyte communities respond to ecological gradients variably in four regions on two continents. *Oecologia.* 2017;184:219–235. <https://doi.org/10.1007/s00442-017-3847-y>
4. Николин Е.Г. Локальные флоры ресурсного резервата «Верхнеиндигирский» (северо-восточная Якутия). *Бот. журн.* 2020;105(7):627–645. <https://doi.org/10.31857/S000681362007008X>
- Nikolin E.G. Local floras of the resource reserve “Verkhneindigirsky” (North-Eastern Yakutia). *Botanicheskii Zhurnal.* 2020;105(7):627–645. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S000681362007008X>
5. Николин Е.Г. Три стандартные флоры горных систем крайнего Северо-Востока Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* 2021;26(2):136–148. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-9>
- Nikolin E.G. Three standard floras of the mountain systems of the extreme North-East of Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2021;26(2):136–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-9>
6. Бобров А.А., Мочалова О.А., Чемерис Е.В. Водные сосудистые растения национального парка «Берингия» (Восточная Чукотка). *Бот. журн.* 2021;106(1):81–99. <https://doi.org/10.31857/S0006813621010026>
- Bobrov A. A., Mochalova O. A., Chemeris E. V. Aquatic vascular plants of the National Park “Beringia” (East Chukotka). *Botanicheskii Zhurnal.* 2021;106(1):81–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0006813621010026>
7. Поспелова Е.Б., Тишков А.А. К флоре окрестностей автотрассы Сусуман–Буркандья. *Флора и растительность Магаданской области.* Владивосток: ДВНЦ РАН; 1976:37–52.
- Pospelova E.B., Tishkov A.A. To the flora of the vicinity of the Susuman-Burkandia highway. *Flora and vegetation of the Magadan region.* Vladivostok: DVNTs RAS; 1976: 37–52. (In Russ.)
8. Павлов В.Н., Хохряков А.П. К флоре Северо-Восточной Якутии. *Бюл. МОИП. Отд. биол.* 1989; 94(5):94–103.
- Pavlov V.N., Khokhryakov A.P. To the flora of North-Eastern Yakutia. *Byul. MOIP. Otd. Biol.* 1989;94(5):94–103. (In Russ.)
9. Хохряков А.П. *Флора Магаданской области.* М.: Наука; 1985. 398 с.
- Khokhryakov A.P. *Flora of the Magadan region.* Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)
10. *Флора и растительность Магаданской области (конспект сосудистых растений и очерк растительности).* Магадан: ИБПС ДВО РАН; 2010. 364 с.
- Flora and vegetation of the Magadan region (compendium of vascular plants and an outline of vegetation).* Magadan: IBPN FEB RAS; 2010. (In Russ.)
11. *Определитель высших растений Якутии 2-е изд., перераб. и доп.* Москва: КМК; Новосибирск: Наука; 2020. 896 с.
- Key to the higher plants of Yakutia,* 2nd ed., revised and additional. Moscow: КМК; Novosibirsk: Nauka; 2020. (In Russ.)
12. Бобров А.А., Мочалова О.А. Заметки о водных сосудистых растениях Магаданской области. *Бот. журн.* 2013;98(10):1287–1299.
- Bobrov A.A., Mochalova O.A. Notes on aquatic vascular plants of the Magadan region. *Botanicheskii Zhurnal.* 2013;98(10):1287–1299. (In Russ.)
13. *Красная книга Магаданской области. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов.* Магадан: Охотник; 2019. 356 с.
- Red Data Book of the Magadan Region. Rare and endangered species of animals, plants and fungi.* Magadan: Okhotnik; 2019. (In Russ.)
14. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 24. Якутская АССР. Книга 1.* Л.: Гидрометеоздат; 1989. 608 с
- Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Parts 1–6. Issue 24. Yakutsk ASSR. Book 1.* Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989. (In Russ.)
15. Мякишева Н.В. *Многокритериальная классификация озер.* СПб.: Изд-во РГГМУ; 2009. 160 с.
- Myakisheva N.V. *Multi-criteria classification of lakes.* St. Petersburg: Publishing house of the Russian State Meteorological University; 2009. (In Russ.)
16. *Государственный водный реестр.* <https://textual.ru/gvr/> (процитировано 20.09.2022)
- State Water Register* <https://textual.ru/gvr/> (cited 9/20/2022)
17. Юрцев Б. А., Королева Т. М., Петровский В.В., Полозова Т. Г., Жукова П. Г., Катенин А. Е. *Конспект флоры Чукотской тундры.* СПб.: ВВМ; 2010. 627 с.
- Yurtsev B. A., Korolyova T. M., Petrovskii V. V., Polozova T. G., Zhukova P. G., Katenin A. E. *A check list of the flora of the Chukotka tundra.* St. Petersburg: BBM; 2010. (In Russ.)
18. Андреев А.В., Слободин С.Б., Хаменкова Е.В. Беспощадное освоение Колымы, последний рубеж – южная часть хребта Черского. *Природа.* 2020;(6):32–45. <https://doi.org/10.7868/S0032874X20060046>
- Andreev A.V., Slobodin S.B., Khamenkova E.V. Ruthless exploration of Kolyma, the last frontier – Southern part of the Chersky Range. *Priroda.* 2020;(6):32–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032874X20060046>

19. Хорева М.Г., Андриянова Е.А. Особенности флоры окрестностей озера Малак (Магаданская область). *Роль ботанических садов в сохранении и обогащении природной и культурной флоры: материалы Всероссийской конф. с международным участием, посвященной 20-летию Ботанического сада Северо-Восточного федерального университета (12–16 июля 2021 г., Якутск)*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2021:100–104.
- Khoreva M.G., Andriyanova E.A. Features of the flora of the vicinity of Lake Malyk (Magadan region). *The role of botanical gardens in the conservation and enrichment of natural and cultural flora: materials of the All-Russian Conf. with international participation, dedicated to the 20th anniversary of the Botanical Garden of the North-Eastern Federal University (July 12–16, 2021, Yakutsk)*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2021: 100–104. (In Russ.)
20. Бобров А.А., Мочалова О.А., Чемерис Е.В. Бассейн р. Кава (северная Охотия) как важная точка разнообразия водных макрофитов северной Пацифики. *Изв. РАН. Сер. биол.* 2023;50(2):160–171. <https://doi.org/10.1134/S1062359022700078>
- Bobrov A.A., Mochalova O.A., Chemeris E.V. The Kava River basin (northern coast of the Sea of Okhotsk) as a hotspot of aquatic macrophyte diversity in northern Pacific. *Izvestia RAN. Seria biologicheskaja*. 2023;50(2): 160–171. <https://doi.org/10.1134/S1062359022700078>
21. Bobrov A.A., Volkova P.A., Kopylov-Guskov Yu.O., Mochalova O.A., Kravchuk A.E., Nekrasova D.M. Unknown sides of *Utricularia* (Lentibulariaceae) diversity in East Europe and North Asia or how hybridization explained old taxonomical puzzles. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 2022; 54 (March, 125649):1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2021.125649>
22. Красная книга Республики Саха (Якутия). Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. Т. 1. М.: Реарт; 2017. 412 с.
- Red Book of the Republic of Sakha (Yakutia). Rare and endangered species of plants and fungi*. V. 1. Moscow: Reart; 2017. (In Russ.)
23. Мочалова О.А., Хорева М.Г., Андриянова Е.А. Новые местонахождения сосудистых растений из Красной книги Магаданской области. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2022;2:92–95. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-2-92-95>
- Mochalova O.A., Khoreva M.G., Andriyanova E.A. New locations of vascular plants from the Red Data Book of the Magadan Region. *Vestnik SVNTs FEB RAS*. 2022; 2:92–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2022-2-92-95>
24. Юрцев Б.А., Хохряков А.П. Анализ флоры Ольского плато (в связи с историей растительного покрова Колымского нагорья). *Бюл. МОИП. Отд. биол.* 1975;80(2):120–134.
- Yurtsev B. A., Khokhryakov A. P. Analysis of the flora of the Ola Plateau (in connection with the history of the vegetation cover of the Kolyma Highlands). *Byul. MOIP. Otd. Biol.* 1975;80(2):120–134. (In Russ.)
25. Jones J.I., Li W., Maberly S.C. Area, altitude and aquatic plant diversity. *Ecography*. 2003;26:411–420.
26. Pulido C., Sand-Jensen K., Lucassen E.C.H.E.T. et al. Improved prediction of vegetation composition in NW European soft-water lakes by combining location, water and sediment chemistry. *Aquat. Sci.* 2012;74(2):351–360. <https://doi.org/10.1007/s00027-011-0226-3>

Об авторах

МОЧАЛОВА Ольга Александровна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1325-112X>, ResearcherID: AAZ-9414-2021, e-mail: mochalova@inbox.ru

АНДРИЯНОВА Елена Александровна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1441-8283>, ResearcherID: D-7550-2018, andria@ibpn.ru

ХОРЕВА Мария Геннадьевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2290-3043>, ResearcherID: E-1913-2018, e-mail: mkhoreva@ibpn.ru

About the authors

MOCHALOVA, Olga Alexandrovna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1325-112X>, ResearcherID: AAZ-9414-2021, e-mail: mochalova@inbox.ru

ANDRIANOVA, Elena Alexandrovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1441-8283>, ResearcherID: D-7550-2018, e-mail: andria@ibpn.ru

KHOREVA, Maria Gennadievna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2290-3043>, ResearcherID: E-1913-2018, e-mail: mkhoreva@ibpn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 09.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 30.01.2023

Принята к публикации / Accepted 14.02.2023

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.3; 539.5; 620.22

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-337-345>

Оригинальная статья

Об одном специальном случае трансверсально-изотропного упругого материала, применимого для многолетнемерзлых пород

Ю. М. Григорьев^{1,2,✉}, А. М. Яковлев³

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Российская Федерация

³ООО «Майтона», г. Якутск, Российская Федерация

✉ grigyum@yandex.ru

Аннотация

Многие природные и искусственные материалы обладают трансверсальной изотропией упругих свойств. Трансверсально-изотропные материалы возникают и используются во многих технологиях и отраслях, например, в механике горных пород в условиях многолетней мерзлоты. Для математического описания таких материалов используется модель трансверсально-изотропного материала с пятью упругими независимыми константами. Уравнения этой модели сложнее, чем для изотропной упругости, и их анализ вызывает гораздо больше трудностей. Одним из методов такого анализа является факторизация, т. е. сведение к решению более простых уравнений первого порядка. В данной работе представлены основы нового метода кватернионной факторизации уравнений равновесия трансверсально-изотропной теории упругости в одном специальном случае.

Ключевые слова: трансверсально-изотропный материал, теория упругости, факторизация, кватернионная функция

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта № 20-31-90065 Российского научного фонда.

Для цитирования: Григорьев Ю.М., Яковлев А.М. Об одном специальном случае трансверсально-изотропного упругого материала, применимого для многолетнемерзлых пород. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):337–345. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-337-345>

Original article

Transversally isotropic elastic material applicable for permafrost rocks: a case study

Yu. M. Grigor'ev^{1,2,✉}, A. M. Yakovlev³

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

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

³LLC Mytona, Yakutsk, Russian Federation

✉ grigyum@yandex.ru

Abstract

In this paper we present the principles for a new method of quaternion factorization of the equilibrium equations for the transversally isotropic elasticity. Natural and artificial materials have anisotropy of physical properties. Many of them have transversal isotropy of elastic properties. Transversally isotropic materials are used in many technologies and industries, for example, in rock mechanics under permafrost conditions. Mathematical description of such materials involves the model of a transversally-isotropic material with 5 independent elastic constants. The equations of this model are more complicated than those for isotropic elasticity, and their analysis causes much more difficulties.

One of the methods for analyzing such equations is factorization, i.e. reduction to the solution of simpler first-order equations.

Keywords: transversally-isotropic material, elasticity theory, factorization, quaternion function

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant number 20-31-90065).

For citation: Grigor'ev Yu.M., Yakovlev A.M. Transversally isotropic elastic material applicable for permafrost rocks: a case study. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):337–345. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-337-345>

Введение

Многие природные и искусственные материалы обладают анизотропными механическими свойствами. Полностью анизотропный упругий материал имеет 21 материальную константу, но при наличии симметрий их количество уменьшается [1]. Трансверсально-изотропный (ТИ) материал – материал с физическими свойствами, симметричными относительно оси, перпендикулярной плоскости изотропии [1, 2.] Эта поперечная плоскость имеет бесконечные плоскости симметрии, внутри этой плоскости свойства материала одинаковы во всех направлениях. Такие материалы известны еще как «полярно-анизотропные» материалы. В геофизике вертикально-поперечная изотропия также известна как радиальная анизотропия. В инженерной практике, в геофизике, для природных и искусственных материалов с микроструктурой и во многих других случаях используется ТИ-модель упругости. Она имеет пять констант упругости.

Эта модель используется во многих технологиях и отраслях, например, в механике горных пород. Трансверсальная изотропия характерна для большинства осадочных пород (алевролиты, филлиты, сланцы, песчаники, известняки, граниты, гранодиориты и др.) [3, 4]. Показано, что ТИ-модель морозного пучения промерзания мелкозернистых грунтов точнее изотропной модели и вместе с аналитическими выражениями пяти упругих постоянных предоставляет хороший инструмент для анализа промерзающих грунтов [5] Экспериментально показано, что в тоннелях холодного региона морозное пучение окружающих пород в процессе промерзания трансверсально-изотропно. Цилиндрическая поверхность, образованная окружным и осевым направлениями, является поверхностью поперечной изотропии, а линия, проходящая вдоль радиального направления, – осью поперечной изотропии. Эти результаты используются для оптимизации конструкции теплоизоляционного слоя туннеля холодного региона [6, 7].

Однонаправленно армированный материал, в котором армировочные волокна беспорядочно распределены в поперечном сечении цилиндра из изотропного материала или все волокна идентичны и расположены в правильном шестиугольном ряду, представляет собой ТИ-композит [8]. Волокно кевлара, из которого делают бронежилеты, при малых деформациях также представляет собой упругий ТИ-композиционный материал [9]. Детали из однонаправленных ТИ-композитов (трубы, стержни, профили, оболочки и др.), используются в конструкциях современных летательных аппаратов [10].

Многие другие материалы: композиты, керамики, углеволокна, эпоксидный графит, эпоксидное стекло, древесина, некоторые полупроводниковые материалы, также описываются ТИ-моделью. В самой современной технологии 3D-печати также используется ТИ-модель материала [11], как и в биомедицине [12].

Для анализа задач плоской анизотропной упругости эффективно используется метод комплексных функций [1]. Вообще, это – эффективный инструмент, используемый в решении двухмерных задач математической физики. С помощью известных формул Колосова–Мусхелишвили построена полная теория упругости на плоскости.

Но для трехмерной анизотропной теории упругости аналогичные способы использования методов теории функций до сих пор не получили широкого распространения. В настоящее время для задач размерности больше двух развиваются некоторые варианты теории гиперкомплексных функций как аналогов комплексных функций. Наиболее популярны из них кватернионный и клиффордов анализы [13] Для пространственной изотропной упругости разработаны некоторые варианты трехмерного аналога формул Колосова–Мусхелишвили [14–18]. В этом случае общее решение уравнения Ламе для пространственной теории упругости выражается через две регулярные кватернионные или моногенные функции Клиффорда. Показаны некоторые эффективные применения метода кватернионных функций [14, 16–18] и некоторые возможности

решения некорректной задачи Коши для уравнения Ламе [14]. Для трехмерных задач трансверсально-изотропной упругости вопрос применения гиперкомплексных функций остается открытым. Известно, что для некоторых частных случаев для ТИ-тел можно провести матричную диагонализацию трехмерной системы уравнений, например, для так называемого состояния Гассмана, см. [20]. Условие Гассмана [21] является одной из связей между упругими константами ТИ-тела и используется в геофизике, это условие приблизительно выполняется для некоторых геоматериалов [22].

Батугин и Ниренбург [23] показали, что в геомеханике для 45 ТИ горных пород приближенно выполняется некоторое другое условие между пятью упругими константами. В этой статье предлагается кватернионная факторизация уравнений изотропной и ТИ-упругости при выполнении некоторой новой связи между пятью упругими константами.

Основные уравнения трансверсально-изотропной теории упругости

Пусть x_1, x_2, x_3 или x, y, z – декартовы координаты в евклидовом пространстве $\mathbb{R}^3$ с единичными векторами $\mathbf{e}_i, i = 1, 2, 3$; $\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \mathbf{e}_1 u_1 + \mathbf{e}_2 u_2 + \mathbf{e}_3 u_3$ – вектор упругого смещения, $u_i(x_1, x_2, x_3), i = 1, 2, 3$, – его компоненты; $\varepsilon_{ij} = 1/2(u_{i,j} + u_{j,i}), \sigma_{ij}, i, j = 1, 2, 3$, – компоненты тензоров деформации и напряжения соответственно, здесь и далее индекс с запятой или переменной обозначает соответствующую частную производную. Уравнения равновесия имеют вид

$$\sum_{j=1}^3 \sigma_{ij,j} = 0, i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Закон Гука в общем анизотропном случае имеет следующий вид:

$$\sigma_{ij} = \sum_{k,l=1}^3 C_{ijkl} \varepsilon_{kl} = 0,$$

где C_{ijkl} – тензор упругих постоянных среды, имеющий 21 независимую компоненту. При наличии симметрий число независимых упругих постоянных уменьшается до двух для изотропного случая.

Для трансверсально-изотропного тела закон Гука в матричных обозначениях имеет вид [24] (в наших обозначениях для упругих постоянных мы используем одинарный индекс)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{32} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ c_2 & c_1 & c_3 & 0 & 0 & 0 \\ c_3 & c_3 & c_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(c_1 - c_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{32} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

здесь ось x_3 перпендикулярна плоскости трансверсальной изотропии. В компонентах напряжений закон Гука примет вид

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= c_1 \varepsilon_{11} + c_2 \varepsilon_{22} + c_3 \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{22} &= c_2 \varepsilon_{11} + c_1 \varepsilon_{22} + c_3 \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{33} &= c_3 \varepsilon_{11} + c_3 \varepsilon_{22} + c_4 \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{12} &= \frac{1}{2}(c_1 - c_2) \varepsilon_{12}, \\ \sigma_{23} &= c_5 \varepsilon_{23}, \\ \sigma_{31} &= c_5 \varepsilon_{31}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для пяти упругих постоянных выполняются следующие неравенства, вытекающие из положительности упругой энергии [24]:

$$c_1 > |c_2|, (c_1 + c_2)c_4 > 2c_3^2, c_4 > 0.$$

При $c_2 = c_3 = \lambda, c_5 = \mu, c_1 = c_4 = \lambda + 2\mu$ имеем изотропный случай.

Если подставить выражения для напряжений из закона Гука (3) в уравнения равновесия (1), то получим уравнения равновесия в компонентах перемещения в следующем виде [2, с. 39]:

$$\begin{aligned} c_1 u_{1,11} + \frac{c_1 - c_2}{2} u_{1,22} + c_5 u_{1,33} + \\ + \frac{c_1 + c_2}{2} u_{2,12} + (c_3 + c_5) u_{3,13} = 0, \\ \frac{c_1 + c_2}{2} u_{1,12} + \frac{c_1 - c_2}{2} u_{2,11} + c_1 u_{2,22} + \\ + c_5 u_{2,33} + (c_3 + c_5) u_{3,23} = 0, \\ (c_3 + c_5)(u_{1,13} + u_{2,23}) + c_5(u_{3,11} + u_{3,22}) + c_4 u_{3,33} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Имеются разные варианты введения пяти упругих постоянных в ТИ-упругости. В работе [22] вводятся величины $\lambda, \lambda', \mu, \mu', G'$ в качестве независимых упругих параметров ТИ-модели. Закон Гука в этих обозначениях принимает вид

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= (\lambda + 2\mu) \varepsilon_{11} = \lambda \varepsilon_{22} = \lambda' \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{22} &= \lambda \varepsilon_{11} = \lambda \varepsilon_{22} = \lambda' \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{33} &= \lambda' (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) = (\lambda' + 2\mu') \varepsilon_{33}, \\ \sigma_{12} &= 2\mu \varepsilon_{12}, \sigma_{23} = 2G' \varepsilon_{23}, \sigma_{31} = 2G' \varepsilon_{31}. \end{aligned} \quad (5)$$

В изотропном случае будет $\lambda' = \lambda, \mu' = G' = \mu = G$. Связь параметров из вышеприведенных обозначений легко найти, сравнивая (3) и (5):

$$c_1 = \lambda + 2\mu, c_2 = \lambda, c_3 = \lambda', c_4 = \lambda' + 2\mu', c_5 = G'. \quad (6)$$

Широкое распространение получило использование технических постоянных: E, E' – модули Юнга в направлении плоскости изотропии и перпендикулярно к ней, ν, ν' – соответствующие коэффициенты Пуассона, G' – модуль сдвига для плоскости, перпендикулярной плоскости изотропии [1, 2]. В этих обозначениях закон Гука наиболее просто записывается в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu'}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu'}{E'} & -\frac{\nu'}{E'} & \frac{1}{E'} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix},$$

или, в кратком матричном виде, $[\varepsilon] = S[\sigma]$, здесь через $[\varepsilon]$ и $[\sigma]$ обозначены соответствующие вектор-столбцы. Отсюда имеем

$$[\sigma] = S^{-1}[\varepsilon]. \quad (7)$$

Сравнивая матрицы (7) и (2), найдем связи постоянных c_i с техническими постоянными:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{E(-E' + E\nu'^2)}{(1 + \nu)[E'(-1 + \nu) + 2E\nu'^2]}, \\ c_2 &= \frac{E(E'\nu + E\nu'^2)}{(1 + \nu)[E'(-1 + \nu) + 2E\nu'^2]}, \\ c_3 &= \frac{EE'\nu'}{E'(1 - \nu) - 2E\nu'^2}, \\ c_4 &= \frac{E'^2(-1 + \nu)}{E'(-1 + \nu) + 2E\nu'^2}, \\ c_5 &= G'. \end{aligned}$$

Сравнивая обратную матрицу (2) с матрицей S , найдем выражения технических постоянных через постоянные c_i :

$$\begin{aligned} E &= \frac{(c_1 - c_2)[-2c_3^2 + (c_1 + c_2)c_4]}{-c_3^2 + c_1c_4}, \\ \nu &= \frac{(c_1 - c_2)[c_3^2 - c_2c_4]}{c_3^2 - c_1c_4}, \\ E' &= \frac{-2c_3^2 + (c_1 + c_2)c_4}{c_1 + c_2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu' &= \frac{c_3}{c_1 + c_2}, \\ G' &= c_5. \end{aligned}$$

В изотропном случае остаются только две независимые упругие постоянные $E' = E, \nu' = \nu$. В этом случае модуль сдвига не является независимой переменной и выражается через технические постоянные:

$$G' = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Заметим, что в изотропном случае используются также упругие постоянные Ламе λ и μ (здесь всюду используются они), последняя совпадает с коэффициентом сдвига: $\mu = G$. Они удобны тем, что закон Гука в этих обозначениях имеет очень краткую индексную запись:

$$\sigma_{ij} = \lambda \operatorname{div} \mathbf{u} + 2\mu \varepsilon_{ij}.$$

Их связь с техническими постоянными следующая:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Некоторые частные случаи трансверсально-изотропной упругости

Укажем некоторые частные случаи для трансверсально-изотропных тел, упомянутые во введении. Установлено, что в теории упругих волн в трансверсально-изотропных средах значительные математические упрощения получаются при выполнении определенных ограничений на упругие постоянные. Например Кэрриер [25], Кэмерон и Изон [26] нашли следующее алгебраическое соотношение между упругими постоянными:

$$(c_1 - c_5)(c_4 - c_5) - (c_3 + c_5)^2 = 0. \quad (8)$$

При выполнении соотношения (8) существенно упрощается задача анализа распространения волн в трансверсально-изотропных средах. С физической точки зрения существует мало экспериментальных данных, подтверждающих реальность такого твердого тела. Однако ценность данного соотношения заключается не в его приближении к какому-либо конкретному материалу, а в упрощении решения задачи о распространении волн в трансверсально-изотропных средах, но при сохранении некоторых качественных особенностей. Такое решение может также служить проверкой асимптотических и других приближенных результатов.

Условие Гассмана [21] в обозначениях (5) имеет вид

$$\frac{1}{G'} = \frac{\lambda + 2\mu + 3\lambda' + 2\mu'}{(\lambda + 2\mu)(\lambda' + 2\mu') - \lambda'^2}. \quad (9)$$

В наших обозначениях

$$c_1 c_4 - c_3^2 = c_5(c_1 + 2c_3 + c_4). \quad (10)$$

Если выполняется (9), то поверхность преломления упругой волны представляет собой эллипсоид вращения. Показано, что некоторые геоматериалы приблизительно удовлетворяют этому условию [22]. При условии Гассмана система уравнений (4) приводится к диагональной матричной форме [20].

Батугин и Ниренбург [23] обнаружили приближенное состояние для 45 горных пород в геомеханике, при котором

$$G' = \frac{EE'}{E(1 + 2\nu') + E'} \quad (11)$$

Здесь используются технические упругие постоянные для ТИ-тела. Это условие активно используется в геомеханике [3, 4], в наших обозначениях будем иметь довольно громоздкое выражение.

Как видно, в основном ограничения на упругие постоянные, упрощающие математический анализ, получены для волновых задач. В данной работе мы представим новую связь между упругими постоянными, получаемую из рассмотрения статической задачи.

Кватернионная факторизация уравнений теории упругости

Приведем начальные сведения о кватернионах и кватернионных функциях. Подробности можно найти в разных изданиях, например, в [13]. Пусть i, j, k — базисные единицы кватернионов, подчиняющиеся следующим правилам умножения:

$$i^2 = j^2 = k^2, \quad ij = -ji = k, \quad jk = -kj = i, \quad ki = -ik = j.$$

Элемент q -алгебры кватернионов $\mathbb{H}$ запишем в виде $q = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z = q_0 + \mathbf{q}$, где q_0, q_x, q_y, q_z — действительные числа, q_0 называется скалярной частью кватерниона, $\mathbf{q} = iq_x + jq_y + kq_z$ называется векторной частью кватерниона q . Кватернионная функция, или, кратко, $\mathbb{H}$ -значная функция f неполной кватернионной переменной $\mathbf{r} = ix + jy + kz \in \mathbb{R}^3$, является отображением $f: \Omega \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{H}$, или $f(\mathbf{r}) = f_0(\mathbf{r}) + \mathbf{f}(\mathbf{r}) = f_0(x, y, z) + if_x(x, y, z) + jf_y(x, y, z) + kf_z(x, y, z)$.

Функции f_0, f_x, f_y, f_z являются вещественными, определенными в Ω . Непрерывность, дифференцируемость или интегрируемость f определяют по координатам. Для непрерывно дифференцируемых функций $f: \Omega \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{H}$, которые для простоты будем обозначать через $f \in C^1(\Omega, \mathbb{H})$,

оператор $\nabla = i\partial_x + j\partial_y + k\partial_z$ называется оператором Дирака. Функция $f \in C^1(\Omega)$ называется регулярной в Ω , если $f \in \ker \nabla(\Omega): \nabla f(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \in \Omega$. В векторных обозначениях условие регулярности записывается следующим образом:

$$\nabla f(\mathbf{r}) = -\nabla \cdot \mathbf{f}(\mathbf{r}) + \nabla f_0(\mathbf{r}) + \nabla \times \mathbf{f}(\mathbf{r}) = 0.$$

Здесь и далее « $\cdot$ » и « $\times$ » обозначают соответственно скалярное и векторное умножения из векторного анализа, при наличии таких обозначений величины i, j и k рассматриваются как орты декартовой системы координат. Эта формула является кратким обозначением системы Моисила–Теодореску (СМТ), а СМТ является трехмерным аналогом системы Коши–Римана.

Кватернионная факторизация в изотропном случае

Вначале проведем кватернионную факторизацию уравнения упругого равновесия Ламе в изотропном случае:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu\Delta \mathbf{u} = 0. \quad (12)$$

Перейдем к кватернионным обозначениям в этом уравнении Ламе. Во-первых, оператор Лапласа Δ выражается через кватернионный оператор Дирака ∇ в виде

$$\Delta = -\nabla \nabla.$$

Верхней черточкой будем обозначать кватернионное сопряжение: $\overline{q} = \overline{q_0 + \mathbf{q}} = q_0 - \mathbf{q}$. Далее, имеем соотношение

$$\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}} = -\nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \times \mathbf{u} - \nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \times \mathbf{u} = -2\nabla \cdot \mathbf{u}.$$

С помощью этих двух соотношений запишем уравнение Ламе (12) в кватернионной форме

$$-(\lambda + \mu)\nabla \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) - \mu \nabla \nabla \mathbf{u} = 0.$$

В этом уравнении оператор ∇ можно вынести налево за скобку:

$$\nabla \left[\frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) + \mu \nabla \mathbf{u} \right] = 0.$$

Факторизация уравнения Ламе и заключается в получении этого уравнения. Отсюда следует, что выражение в квадратной скобке равняется некоторой регулярной кватернионной функции, обозначим ее w , $\nabla w = 0$, т. е. имеем следующее равенство:

$$\begin{aligned} w &= \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) + \mu \nabla \mathbf{u} = \\ &= \frac{1}{2}(\lambda + 3\mu)\nabla \mathbf{u} + \frac{1}{2}(\lambda + \mu)\overline{\nabla \mathbf{u}}. \end{aligned}$$

В векторных обозначениях это соотношение будет иметь следующий вид:

$$w = \frac{1}{2}(\lambda + 3\mu)(-\nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \times \mathbf{u}) + \\ + \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(-\nabla \cdot \mathbf{u} - \nabla \times \mathbf{u}) = -(\lambda + 2\mu)\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla \times \mathbf{u}.$$

Для регулярной функции w найдется ее первообразная, т. е. такая кватернионная функция W , что $\nabla W = w$, так что имеем следующее равенство:

$$\nabla W = \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) + \mu \nabla \mathbf{u} = \\ = \frac{1}{2}(\lambda + 3\mu)\nabla \mathbf{u} + \frac{1}{2}(\lambda + \mu)\overline{\nabla \mathbf{u}}. \quad (13)$$

Используя равенство (13), вычислим выражение:

$$\nabla W - \overline{\nabla W} = \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) + \mu \nabla \mathbf{u} - \\ - \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\overline{\nabla \mathbf{u}} + \nabla \mathbf{u}) - \mu \overline{\nabla \mathbf{u}} = \mu(\nabla \mathbf{u} - \overline{\nabla \mathbf{u}}).$$

Теперь найдем следующее выражение:

$$\nabla W - \overline{\nabla W} = \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\nabla \mathbf{u} + \overline{\nabla \mathbf{u}}) + \mu \nabla \mathbf{u} + \\ + \frac{1}{2}(\lambda + \mu)(\overline{\nabla \mathbf{u}} + \nabla \mathbf{u}) + \mu \overline{\nabla \mathbf{u}} = (\lambda + 2\mu)(\nabla \mathbf{u} - \overline{\nabla \mathbf{u}}).$$

Исключая $\overline{\nabla \mathbf{u}}$ из этих двух полученных равенств, находим

$$\nabla \mathbf{u} = \frac{\lambda + 3\mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)} \nabla W - \frac{\lambda + \mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)} \nabla \overline{W}. \quad (14)$$

Далее нам будет необходима следующая лемма М. Мишику [27].

Лемма (Мишику). Для любой регулярной функции f справедливо соотношение:

$$\bar{f} = -\frac{1}{2}[\nabla(f\mathbf{r}) + f]. \quad (15)$$

Доказательство. Вычислим действие оператора ∇ :

$$\nabla(f\mathbf{r}) = i\frac{\partial}{\partial x}(f\mathbf{r}) + j\frac{\partial}{\partial y}(f\mathbf{r}) + k\frac{\partial}{\partial z}(f\mathbf{r}) = \\ = i\frac{\partial f}{\partial x}\mathbf{r} + ifi + j\frac{\partial f}{\partial y}\mathbf{r} + jfj + k\frac{\partial f}{\partial z}\mathbf{r} + kfk = \\ = (\nabla f)\mathbf{r} + ifi + jfj + kfk = (if_0 - f_x + kf_y - jf_z)i + \\ + (jf_0 - f_z - kf_x + jf_z)j + (kf_0 - f_z + jf_x - if_y)k = \\ = -\mathbf{f} - 3f_0 + 2\mathbf{f} = -3f_0 + \mathbf{f} = -f - 2\bar{f}.$$

Здесь использовано условие регулярности функции f : $\nabla f = 0$. Из полученного выражения и следует искомая формула. Лемма доказана.

Выражение ∇W в формуле (14) является регулярной функцией, поэтому, используя для нее лемму Мишику, будем иметь

$$\nabla \mathbf{u} = \frac{\lambda + 3\mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)} \nabla W + \\ + \frac{\lambda + \mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)} \frac{1}{2} \{ \nabla[(\nabla W)\mathbf{r}] + \nabla W =$$

$$= \nabla \left\{ \frac{\lambda + 3\mu}{2\mu(\lambda + 2\mu)} W + \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} [(\nabla W)\mathbf{r} + W] \right\} = \\ = \nabla \left\{ \frac{3\lambda + 7\mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} W + \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} (\nabla W)\mathbf{r} \right\}. \quad (16)$$

Отсюда находим

$$\mathbf{u} = \frac{3\lambda + 7\mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} W + \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} (\nabla W)\mathbf{r} + \varphi = \\ = \frac{3\lambda + 7\mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} W + \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} w\mathbf{r} + \varphi, \quad (17)$$

здесь φ – произвольная регулярная функция такая, что скалярная часть правой части формулы (17) равна нулю.

Введем другую регулярную функцию f , которая отличается только постоянным множителем от функции w :

$$f = \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} w. \quad (18)$$

Введем также соответствующую первообразную F : $\nabla F = f$. Тогда окончательный результат сформулируется так: решение уравнения Ламе выражается через две регулярные кватернионные функции f , ψ и первообразную F функции f в виде

$$\mathbf{u} = \kappa F + f\mathbf{r} + \psi, \quad \kappa = \frac{3\lambda + 7\mu}{\lambda + \mu},$$

$$\nabla f = \nabla \psi = 0, \quad \nabla F = f, \quad (19)$$

причем регулярная функция f выражается через перемещение в следующем виде:

$$f = \frac{\lambda + \mu}{4\mu(\lambda + 2\mu)} [-(\lambda + 2\mu)\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \times \mathbf{u}], \quad (20)$$

а первообразная F и регулярная функция ψ связаны соотношением

$$\kappa F_0 - \mathbf{f} \cdot \mathbf{r} + \psi_0. \quad (21)$$

Формулу (19) называют трехмерным аналогом формул Колосова–Мусхелишвили. Впервые кватернионная факторизация уравнения Ламе проведена М. Мишику [27], но его конечный результат отличается от приведенного здесь. Трехмерный кватернионный аналог формул Колосова–Мусхелишвили впервые получен разными способами в [16, 28] и В.В. Наумовым [29]. В работе [30] проведена аналогичная факторизация уравнения Ламе с использованием клиффордовой алгебры, но там допущены ошибки, в частности, лемма Мишику сформулирована неверно и конечный аналог формулы Колосова–Мусхелишвили является неверным. Другой вариант трехмерного аналога формул Колосова–Мусхелишвили получен на основе общего решения Папковича–Нейбера [15].

Кватернионная факторизация для трансверсально-изотропной среды

Преобразуем уравнения равновесия следующим образом: введем следующие обозначения в ТИ-уравнение равновесия (4):

$$c^2 \equiv \frac{c_1 - c_2}{2c_5}; \quad a \equiv \frac{2(c_3 + c_5)}{c_1 + c_2};$$

$$\nabla^* = i\partial_1 + j\partial_2 + k\frac{1}{c}\partial_3; \quad (22)$$

$$\Delta^* \equiv -\nabla^* \nabla^* = \partial_1^2 + \partial_2^2 + \frac{1}{c^2} \partial_3^2.$$

Тогда эти уравнения (4) можно переписать как следующие:

$$\frac{c_1 - c_2}{2} \Delta^* u_1 + \frac{c_1 - c_2}{2} (u_{1,1} + u_{2,2} + au_{3,3})_{,1} = 0,$$

$$\frac{c_1 - c_2}{2} \Delta^* u_2 + \frac{c_1 - c_2}{2} (u_{1,1} + u_{2,2} + au_{3,3})_{,2} = 0, \quad (23)$$

$$\frac{c_1 - c_2}{2} \Delta^* \frac{1}{ac^3} u_3 + \frac{c_1 - c_2}{2} [u_{1,1} + u_{2,2} +$$

$$+ \frac{2}{a(c_1 + c_2)} (c_4 - \frac{c_1 - c_2}{2c_4}) u_{3,3}]_{,3} = 0.$$

Если ввести следующую связь между упругими постоянными ТИ-тела:

$$\frac{2}{a(c_1 + c_2)} \left(c_4 - \frac{c_1 - c_2}{2c_4} \right) = a, \quad (24)$$

то третье уравнение (23) будет аналогично первому и второму уравнениям (23), и мы получим условие кватернионной факторизации. Далее, умножим первое уравнение (23) на кватернионную единицу i , второе на j и третье на k и после суммирования этих выражений получим уравнение равновесия ТИ-тела в следующей кватернионной форме:

$$\frac{c_1 + c_2}{2} \nabla^* (u_{1,1} + u_{2,2} + au_{3,3}) +$$

$$+ \frac{c_1 - c_2}{2} \left(iu_1 + ju_2 + k \frac{1}{ac^3} u_3 \right) = 0. \quad (25)$$

Это уравнение можно представить как действие левой части кватернионного квазидираковского оператора ∇^* на некоторую кватернионную функцию

$$\nabla^* \left[\frac{c_1 + c_2}{2} (u_{1,1} + u_{2,2} + au_{3,3}) - \right.$$

$$\left. - \frac{c_1 - c_2}{2} \nabla^* \left(iu_1 + ju_2 + k \frac{1}{ac^3} u_3 \right) \right] = 0. \quad (26)$$

Таким образом, если ввести кватернионную функцию

$$f = \frac{c_1 + c_2}{2} (u_{1,1} + u_{2,2} + au_{3,3}) -$$

$$- \frac{c_1 - c_2}{2} \nabla^* \left(iu_1 + ju_2 + k \frac{1}{ac^3} u_3 \right), \quad (27)$$

то эту функцию $f \in \ker \nabla^*$ можно назвать квазирегулярной кватернионной функцией неполной кватернионной переменной $\mathbf{r} = ix + jy + kz$

$$\nabla^* f = 0. \quad (28)$$

После вычисления кватернионного действия оператора ∇^* в (27) находим связь между упругим перемещением $\mathbf{u}(x, y, z)$ ТИ-тела со скаляром и вектором части произвольной квазирегулярной кватернионной функции $f = f_0 + \mathbf{f}$:

$$f_0 = c_1 (u_{1,1} + u_{2,2}) + \left(a \frac{c_1 + c_2}{2} + \frac{c_1 + c_2}{2ac_3} \right) c_{3,3},$$

$$\mathbf{f} = \frac{c_1 + c_2}{2} \nabla \times \left(iu_1 + ju_2 + k \frac{1}{ac^3} u_3 \right). \quad (29)$$

В частном случае изотропной упругости, когда [2] $c_1 = c_4 = \lambda + 2\mu$, $c_2 = c_3 = \lambda$, $c_5 = \mu$, отсюда имеем $c = a = 1$ и уравнение (22) преобразуется в обычную кватернионную факторизацию уравнения Ламе для изотропной упругости с оператором Дирака:

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla \cdot \mathbf{u} - \mu\nabla \times \mathbf{u}] = 0.$$

В дальнейшем необходимо из соотношения (29) выразить вектор перемещения $\mathbf{u}$ через квазирегулярную функцию f и, тем самым, получить трехмерный кватернионный аналог формул Колосова–Мусхелишвили для трансверсально-изотропной среды. При этом необходимо развить теорию квазирегулярных кватернионных функций, удовлетворяющих условию (28).

Заключение

В данной работе мы представляем новую связь (20) между пятью упругими постоянными для ТИ-тела, которая позволила провести кватернионную факторизацию уравнений равновесия. С помощью этой факторизации можно найти аналог формул Колосова–Мусхелишвили для таких ТИ-тел. Представленная кватернионная факторизация открывает путь к решению трехмерных задач для ТИ-тел с использованием методов кватернионных функций.

Список литературы / References

1. Лехницкий С.Г. *Теория упругости анизотропного тела*. Изд. 2-е. М.: Наука; 1977. 416 с.
Lekhnitsky S.G. *Theory of elasticity of an anisotropic body*. Ed. 2nd. Moscow: Nauka; 1977. 416 p. (In Russ.)

2. Ding H., Chen W., Zhang L. *Elasticity of Transversely Isotropic Materials*. Springer; 2006.
3. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Механико-математическое и экспериментальное моделирование устойчивости скважин в анизотропных геосредах. *Изв. РАН. МТТ*. 2013;(4):4–12.
- Klimov D.M., Karev V.I., Kovalenko Y.F. et al. Mechanical--mathematical and experimental modeling of well stability in anisotropic media. *Mech. Solids*. 2013;(4):4–12. (In Russ.)
4. Журавлев А.Б., Устинов К.Б. О величинах, характеризующих степень упругой анизотропии трансверсально-изотропных горных пород; роль сдвигового модуля. *Изв. РАН. МТТ*. 2019;(4):129–140. <https://doi.org/10.1134/S0572329919040123>.
- Zhuravlev A.B., Ustinov K.B. On values characterizing the degree of elastic anisotropy of transversely isotropic rocks; role of shear modulus. *Mech. Solid*. 2019;(4):129–140. <https://doi.org/10.1134/S0572329919040123>. (In Russ.)
5. Liu Q., Wang Z., Li Z. et al. Transversely isotropic frost heave modeling with heat–moisture–deformation coupling. *Acta Geotech*. 2020;15:1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00774-1>
6. Xia Caichu, Lv Zhitao, Li Qiang, Huang Jihui, Bai Xueying. Transversely isotropic frost heave of saturated rock under unidirectional freezing condition and induced frost heaving force in cold region tunnels. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;152:48–58. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.04.011>.
7. Lyu Zhitao, Xia Caichu, Liu Weiping. Analytical solution of frost heaving force and stress distribution in cold region tunnels under non-axisymmetric stress and transversely isotropic frost heave of surrounding rock. *Cold Regions Science and Technology*. 2020;178:103117. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103117>
8. Hashin Z. Analysis of composite materials – a survey. *Applied Mechanics*. 1983;50(3):481–505. <https://doi.org/10.1115/1.3167081>
9. Cheng Ming, Chen Weinong, Tusit Weerasooriya. Mechanical properties of kevlar $\textcircled{R}$ KM2 single fiber. *Engineering Materials and Technology-Transactions of The Asme*. 2005;127(2):197–203. <https://doi.org/10.1115/1.1857937>
10. Бодунов Н.М., Дружинин Г.В. Об одном решении осесимметричной задачи теории упругости для трансверсально-изотропного материала. *Прикладная механика и техническая физика*. 2009;50(6):81–89.
- Bodunov N.M., Druzhinin G.V. On one solution of an axisymmetric problem of the theory of elasticity for a transversally isotropic material. *Applied Mechanics And Technical Physics*. 2009;50(6): 81–89. (In Russ.)
11. Zou R., Xia Y., Liu S., Hu P., Hou W., Hu Q., Shan C. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites Part B: Engineering*. 2016;99:506–513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>.
12. Байэр С.М., Замураев Л.А., Котляр К.Е. Модель трансверсально-изотропного сферического слоя для расчета изменения внутриглазного давления при интрасклеральных инъекциях. *Российский журнал биомеханики*. 2006;10(2):43–49.
- Bauer S.M., Zamuraev L.A., Kotlyar K.E. Model of a transversally isotropic spherical layer for calculating changes in intraocular pressure during intrascleral injections. *Russian Journal of Biomechanics*. 2006;10(2):43–49. (In Russ.)
13. Gurlebeck K., Habetha K., Sprossig W. *Holomorphic Functions In The Plane And N-Dimensional Space*. Basel: Birkhauser; 2008.
14. Григорьев Ю.М. Решение одной задачи для упругого шара в замкнутой форме. *Динамика сплошной среды*. 1985;71:50–54.
- Grigor'ev Yu.M. Solution of a problem for an elastic sphere in a closed form. *Dynamika Spl. Sredy*. 1985; 71:50–54. (In Russ.)
15. Bock S., Gurlebeck K. On a spatial generalization of the Kolosov-Muskhelishvili formulae. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2009;32(2):223–240. <https://doi.org/10.1002/mma.1033>.
16. Grigor'ev Yu. Three-dimensional Quaternionic Analogue of the Kolosov-Muskhelishvili Formulae. *Hypercomplex Analysis: New perspectives and applications*, Trends in Mathematics. Eds. S. Bernstein, U. Kaehler, I. Sabadini, F. Sommen. 2014; Birkhauser, Basel, 145–166. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08771-9>.
17. Grigoriev Yu. Radial integration method in quaternion function theory and its applications. *AIP Conference Proceedings*. 2015;1648:440003. <https://doi.org/10.1063/1.4912654>.
18. Yakovlev A., Grigor'ev Yu. Three-dimensional quaternionic Kolosov-Muskhelishvili formulae in infinite space with a cavity. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2293:110008. <https://doi.org/10.1063/5.0026655>.
19. Grigor'ev Yu., Gurlebeck K., Legatiuk D. Quaternionic formulation of a Cauchy problem for the Lamé equation. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1978: 280007. <https://doi.org/10.1063/1.5043907>.
20. Остробаблин Н.И. Диагонализация трехмерной системы уравнений в смещениях линейной теории упругости трансверсально-изотропных сред. *Прикладная механика и техническая физика*. 2013;54(6): 125–145.
- Ostrosablin N.I. Diagonalization of a three-dimensional system of equations in displacements of the linear theory of elasticity of transversally isotropic media. *Applied Mechanics And Technical Physics*. 2013;54(6):125–145. (In Russ.)
21. Gassmann F. Introduction to seismic travel time methods in anisotropic media. *Pure Appl. Geophys*. 1964; 58(II):63–113. <https://doi.org/10.1007/BF00879140>.
22. Аннин Б.Д. Трансверсально-изотропная упругая модель геоматериалов. *Сиб. журн. индустр. математики*. 2009; 12(3). 5–14.

Annin B.D. A transversely isotropic elastic model of geomaterials. *Sib. J. Appl. Ind. Math.* 2009;12(3):5–14. (In Russ.)

23. Батугин С.А., Ниренбург Р.К. Приближенная зависимость между упругими константами горных пород и параметры анизотропии. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* 1972; 1: 7–11.

Batugin SA, Nirenburg PK. Approximate relationship among the elastic constants of anisotropic rocks, and anisotropy parameters. *Fiz.-tekhn. Probl. Razrabotki Polezn. Iskopaemykh.* 1972;(1):7–11. (In Russ.)

24. Федоров Ф.И. *Теория упругих волн в кристаллах.* М.: Наука; 1965. 388 с.

Fedorov F.I. *Theory Of Elastic Waves In Crystals.* М.: Nauka; 1965. 388 p. (In Russ.)

25. Carrier G.F. The propagation of waves in orthotropic media. *Quart. Appl. Math.* 1946; 4:160–165.

26. Cameron N., Eason G. Wave Propagation in an Infinite Transversely Isotropic Elastic Solid. *Quart. J. Mech. Appl. Mech.* 1967; 20(1):23–40. <https://doi.org/10.1093/qjmam/20.1.23>

27. Misicu M. Reprezentarea ecuatiilor echilibrului elastic prin functii monogene de cuaternioni. *Bull. Stiint. Acad. RPR. Sect. st. mat.fiz.* 1957; 9(2): 457–470.

28. Григорьев Ю.М. *Решение пространственных статических задач теории упругости методами теории кватернионных функций:* Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск. 1985. 142 с.

Grigoriev Yu.M. *Solution of spatial static problems of the theory of elasticity by methods of the theory of quaternion functions.*: Diss. Cand.Sci., Novosibirsk. 1985. 142 p. (In Russ.)

29. Наумов В.В. *Аналитические результаты в математической теории упругости:* Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Якутск. 1993. 111 с.

Naumov V.V. *Analytical results in the mathematical theory of elasticity:* Diss. Cand. Sci., Yakutsk. 1993. 111 p. (In Russ.)

30. Liu Li-Wei, Hong Hong-Ki. Clifford algebra valued boundary integral equations for three-dimensional elasticity. *Applied Mathematical Modelling.* 2017; 54: 246–267. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.09.031>.

Об авторах

ГРИГОРЬЕВ Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой «Теоретическая физика»; ведущий научный сотрудник; AuthorID: 14623701400, ResearcherID: K-8270-2016, <https://orcid.org/0000-0001-8001-9964>, e-mail: grigyum@yandex.ru

ЯКОВЛЕВ Андрей Михайлович, специалист по машинному обучению; e-mail: andrewyakovlev1994@gmail.com

About the authors

GRIGOR'EV, Yuri Mikhailovich, Dr. Sci (Phys. and Math.), Associate Professor, Deputy rector for international scientific and technical activities, Head of the Theoretical Physics Department; Leading Researcher; AuthorID: 14623701400, ResearcherID: K-8270-2016, <https://orcid.org/0000-0001-8001-9964>, e-mail: grigyum@yandex.ru

YAKOVLEV, Andrey Mikhailovich, Machine Learning Specialist; e-mail: andrewyakovlev1994@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 20.12.2022

Поступила после рецензирования / Revised 11.01.2023

Принята к публикации / Accepted 25.01.2023

Оригинальная статья

**Влияние состава и технологии
изготовления композиций на структуру и свойства
морозостойких резин на основе смесей
полярных и неполярных каучуков**

**В. В. Мухин^{✉,1}, Н. Н. Петрова¹, Н. Н. Лазарева¹,
С. Н. Данилова¹, Н. В. Шадрин²**

¹*Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация*

²*Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация*

[✉]*mvvnj@yandex.ru*

Аннотация

Резины для создания уплотнительных устройств, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера, в том числе в Республике (Саха) Якутия, должны обладать стойкостью к рабочим средам, морозо-, износостойкостью и приемлемыми физико-механическими свойствами. Некоторые из перечисленных свойств являются взаимоисключающими и не всегда достижимы в материалах на основе индивидуального каучука. Для создания резин уплотнительного назначения с сочетанием необходимых свойств перспективным может являться использование смесей каучуков. В работе исследованы модельные рецептуры на основе смесей полярного бутадиен-нитрильного (БНКС-18), неполярных бутадиенового (СКД) и изопренового (СКИ-3) каучуков. Выбор удовлетворительно морозостойкого каучука БНКС-18 обусловлен стремлением обеспечения достаточной стойкости разрабатываемых материалов в углеводородных рабочих средах. В свою очередь, смесь из неполярных диеновых каучуков СКД и СКИ-3 выбрана для дальнейшего улучшения низкотемпературных свойств и придания дополнительной стойкости в полярных рабочих жидкостях. Добавление СКИ-3 также обеспечивало подавление кристаллизации бутадиенового каучука СКД. Установлено, что с повышением содержания БНКС-18 происходит улучшение физико-механических свойств, износостойкости, стойкости к неполярным углеводородным маслам, а также снижение низкотемпературных свойств и стойкости к полярным маслам. Дополнительно были проведены исследования структуры полученных материалов методом атомно-силовой микроскопии, доказавшие равномерность распределения частиц дисперсной фазы, размеры которой не превышают 1–5 мкм. Оптимальное соотношение бутадиен-нитрильного и диеновых каучуков 70:30 (масс. ч.) соответственно. Именно при таком соотношении получены эластомерные материалы, которые отвечают требованиям для создания из них уплотнительных устройств для работы в условиях холодного климата.

Ключевые слова: бутадиен-нитрильный каучук, бутадиеновый каучук, изопреновый каучук, смеси каучуков, резина, морозостойкость, износостойкость

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Госзадание № FSRG-2023-0026).

Для цитирования: Мухин В.В., Петрова Н.Н., Лазарева Н.Н., Данилова С.Н., Шадрин Н.В. Влияние состава и технологии изготовления композиций на структуру и свойства морозостойких резин на основе смесей полярных и неполярных каучуков. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(2):346–357. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357>

Composition and technology effect on the structure and properties of frost-resistant elastomeric materials based on blends of polar and nonpolar rubbers

V. V. Mukhin^{✉,1}, N. N. Petrova¹, N. N. Lazareva¹, S. N. Danilova¹, N. V. Shadrinov²

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

²*Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation*

[✉]*mvvnj@yandex.ru*

Abstract

Elastomeric materials for sealing devices operated in the Far North, including the Republic of Sakha (Yakutia), must be resistant to working environments and have frost and wear resistance with acceptable physical and mechanical properties. Some of the listed properties are mutually exclusive and are not always achievable in materials based on individual rubber. Thus, one promising method for sealing elastomeric materials is the use of rubber mixtures. In this study, model blends based on nitrile-butadiene (BNKS-18), butadiene (SKD), and isoprene (SKI-3) rubbers were studied. Nitrile butadiene rubber was chosen as the component of the mixture responsible for resistance to working environments, and diene rubbers (SKD and SKI-3) were chosen as the components responsible for frost resistance. The addition of SKI-3 also suppressed the crystallization of SKD butadiene rubber. An increase in the BNKS-18 content enhanced the physical and mechanical properties and resistance to wear and non-polar oils. A decrease in low-temperature properties and resistance to polar oils was also observed. Additionally, studies of the structure of the obtained materials by atomic force microscopy were carried out, which proved the uniformity of the distribution of particles of the dispersed phase, the size of which did not exceed 1-5 μm . The optimal ratio of butadiene-nitrile to diene rubbers was 70:30 phr. At this ratio, the obtained elastomeric materials meet the requirements of sealing materials for operation in cold climates.

Keywords: nitrile rubber, butadiene rubber, isoprene rubber, rubber mixture, elastomeric material, frost resistance, wear resistance

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant Number №FSRG-2023-0026).

For citation: Mukhin V.V., Petrova N.N., Lazareva N.N., Danilova S.N., Shadrinov N.V. Composition and technology effect on the structure and properties of frost-resistant elastomeric materials based on blends of polar and nonpolar rubbers. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):346–357. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-346-357>

Введение

В настоящее время существует проблема создания морозостойких уплотнительных материалов, работоспособных в среде масел и топлив различной природы. Особую актуальность решение этой проблемы имеет для техники, эксплуатирующейся в районах Крайнего Севера, где к уплотнительным устройствам предъявляются жесткие требования. Материалы уплотнительного назначения, которые применяются в составе этих устройств, должны отвечать целому ряду различных требований. Так, например, уплотнительные эластомерные материалы должны обладать высокими релаксационными свойствами (остаточная деформация сжатия (ОДС) ниже 80 %), стойкостью к воздействию агрес-

сивных рабочих сред (малые степени набухания) и приемлемыми физико-механическими характеристиками (условная прочность не менее 7 МПа). Одновременно они должны обладать достаточной морозостойкостью, которая может быть охарактеризована низкой температурой стеклования и высоким значением коэффициента морозостойкости по эластическому восстановлению (не менее 0,2 для неподвижных уплотнительных устройств) [1–3]. Стоит отметить, что использование нескольких показателей для описания морозостойкости эластомеров предпочтительнее. Это обусловлено тем, что применение только температуры стеклования не позволяет точно установить минимальную температуру работоспособности для уплотнительных устройств [4, 5].

Для создания подобных уплотнительных устройств в качестве полимерной основы наиболее часто применяются бутадиен-нитрильные каучуки БНКС-18 или СКН-18. Они являются каучуками специального назначения с удовлетворительными низкотемпературными характеристиками с температурой стеклования $T_C \approx -49^\circ\text{C}$. Их широкое применение обусловлено доступностью и относительно низкой стоимостью при наличии весьма универсальных эксплуатационных свойств [6]. Для резин уплотнительного назначения на основе этих каучуков минимальная температура работоспособности составляет $-45\div-55^\circ\text{C}$, при более низкой температуре они теряют свою эластичность и становятся хрупкими. Повысить морозостойкость можно путем введения пластификаторов, которые повышают гибкость и подвижность [7–9]. Однако установлено, что резины теряют свои эксплуатационные свойства по мере вымывания пластификатора рабочей средой [10, 11], что существенно ограничивает возможности их применения. Перспективной основой для создания уплотнительных устройств повышенной морозостойкости являются пропиленоксидные (СКПО, $T_C = -74^\circ\text{C}$) и эпихлоргидриновые (Hydrin T6000, $T_C = -62^\circ\text{C}$) каучуки, которые несмотря на полное вымывание пластификатора демонстрируют сохранение практически всех эксплуатационных свойств [12–15]. Данные каучуки могут обеспечивать работоспособность уплотнительных устройств для температур ниже -55°C , однако на данный момент они мало распространены на рынке, что не позволяет их массово применять в промышленности.

Каучуки общего назначения имеют приемлемые низкотемпературные свойства (например, бутадиеновый каучук СКД, $T_C < -100^\circ\text{C}$; изопреновый каучук, $T_C = -70^\circ\text{C}$) [16]), но они не обладают стойкостью в неполярных углеводородных рабочих средах и демонстрируют чрезмерно высокие степени набухания. Данный факт не позволяет использовать их в качестве полимерной основы для создания уплотнительных эластомеров, предназначенных для работы в средах углеводородной природы. Однако подобные каучуки могут проявлять высокую стабильность, наоборот, в полярных рабочих средах из-за значительного различия химического состава, по сравнению с БНКС-18.

Одним из решений вышеуказанной проблемы может стать создание морозостойких и масло-

стойких резин на основе смесей каучуков [17]. Большинство смесей эластомеров являются термодинамически несовместимыми и образуют гетерогенные системы [18]. Однако, меняя соотношение ингредиентов, их последовательность и технологию введения, можно регулировать фазовую морфологию смесей. Использование подобного подхода позволяет в достаточно широких пределах регулировать эксплуатационные свойства создаваемого эластомерного материала. Стоит также учитывать тот факт, что у резин на основе смесей полимеров свойства материалов могут превосходить прогнозируемые аддитивные свойства, которые рассчитываются из предположения, что вклад отдельного компонента напрямую зависит от его соотношения с остальными.

Для создания резин уплотнительного назначения часто используются смеси каучуков, например: бутадиен-нитрильного с эпихлоргидриновыми [19], эпихлоргидринового с пропиленоксидным [20], бутадиен-нитрильного с изопреновым [21] и натуральным [22] и др. Перспективным способом дальнейшего улучшения свойств резин на основе смесей каучуков является введение третьего компонента, который может повысить степень дисперсности фаз эластомерной системы [23] и благоприятно повлиять на эксплуатационные свойства.

В качестве объектов для исследования были выбраны смеси на основе бутадиен-нитрильного (БНКС-18), бутадиенового (СКД) и изопренового (СКИ-3) каучуков. БНКС-18 не обладает достаточными низкотемпературными свойствами для надежной эксплуатации в условиях Крайнего Севера, но он все равно широко используется для создания материалов уплотнительного назначения для различных углеводородных сред за счет своей технологичности, доступности и приемлемых физико-механических свойств. В свою очередь, добавление в рецептуру труднокристаллизующейся смеси [2] диеновых каучуков с низкой температурой стеклования СКД и СКИ-3, которые были предварительно совмещены в виде отдельной маточной смеси (СКД:СКИ-3 = 80:20), должно положительно сказаться на морозостойкости вулканизатов. Наличие в рецептуре маточной смеси на основе неполярных каучуков должно также повысить стойкость к полярным маслам.

Целью исследования является изучение влияния состава полимерных компонентов и техно-

логии смешения резиновых смесей на структуру и свойства резин на базе композиций полярного, бутадиен-нитрильного и неполярных диеновых каучуков для создания уплотнительных резин для техники, эксплуатирующейся в условиях Крайнего Севера.

Методы и материалы исследования

В данной работе рассматриваются резины на основе выше перечисленных каучуков: бутадиен-нитрильный каучук БНКС-18 (ТУ 38.30313-2006), изопреновый каучук СКИ-3 (ТУ 2294-037-48158319-2010), бутадиеновый каучук СКД (ТУ 38.403750-2001). На основе выбранных эластомеров была разработана модельная рецептура резины (табл. 1) с эффективной вулканизирующей системой, где в качестве активаторов вулканизации использовали стеариновую кислоту и оксид цинка, в качестве ускорителей вулканизации выступали сульфенамид Ц и морфолин, а сера – как вулканизирующий агент. Кроме того, в рецептуре в качестве наполнителя имелись технический углерод П803 и противостаритель – неозон Д. В качестве ингредиента для улучшения низкотемпературных свойств и снижения вязкости смеси применен пластификатор дибутилфталат (ДБФ).

Смешение производили с использованием маточной смеси из неполярных каучуков, т. е.

предварительно совмещали СКИ-3 и СКД, а затем эту смесь вводили в БНКС-18. Данный способ смешения позволяет достичь соизмеримых вязкостей смешиваемых разнородных фаз каучуков и улучшения диспергирования всех ингредиентов в объеме смеси.

Резиновые смеси готовили на пластикордере Plastograph EC Plus (Brabender GmbH&Co.KG, Германия). Для создания резиновых смесей процесс смешения проводили при 40 °С и скорости 40 об./мин. Далее для формования образцов применялись вальцы Polymix 110L (Brabender GmbH&Co.KG). Вулканизацию проводили 35 минут при 150 °С, используя пресс GT-7014-H10C (GOTECH, Тайвань).

Далее определяли основные свойства:

- кинетика вулканизации исследованных образцов при 150 °С определена по ГОСТ Р 54547-2011 на реометре RPA-2000 («Alpha Technologies», США);
- основные физико-механические характеристики исследованных образцов резин определяли по ГОСТ 270-75, используя разрывную машину Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония);
- релаксационные свойства образцов охарактеризовали с помощью ОДС (метод Б по ГОСТ 9.029-74): для этого исследуемые образцы резин в виде цилиндров, высотой 10 мм, выдерживали под постоянной нагрузкой в течение 72 ч

Таблица 1

Рецептура резин на основе смесей бутадиен-нитрильного (БНКС-18) и диеновых (СКД, СКИ-3) каучуков

Table 1

Elastomeric blends composition based on mixtures of nitrile-butadiene (BNKS-18) and diene (SKD, SKI-3) rubbers

Ингредиент	Смесь 1 (0:100)	Смесь 2 (10:90)	Смесь 3 (30:70)	Смесь 4 (40:60)	Смесь 5 (50:50)	Смесь 6 (60:40)	Смесь 7 (70:30)	Смесь 8 (100:0)
БНКС-18	0,0	10,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	100,0
Маточная смесь СКД+СКИ-3	100,0	90,0	70,0	60,0	50,0	40,0	30,0	0,0
Оксид цинка	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Стеариновая кислота	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Морфолин	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Сульфенамид Ц	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Неозон Д	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Технический углерод П803	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
ДБФ	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Сера	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

при 100 °С, затем, после снятия нагрузки и охлаждения до комнатной температуры, фиксировали значения эластического восстановления;

– степень набухания была определена, используя ГОСТ 9.030-74, образцы выдерживали при температуре 90 °С в среде неполярного минерального углеводородного гидравлического масла ВМГЗ и полярного синтетического масла Б-3В на основе сложных эфиров в течение 24 ч;

– коэффициент морозостойкости (K_B) по эластическому восстановлению после сжатия определяли по ГОСТ 13808-79 на приборе ВН 5303 («Полимермаш групп», Россия), образцы охлаждали до –50 °С с использованием жидкого азота и этилового спирта;

– объемный износ определяли согласно ГОСТ 23509-79, износ исследуемых образцов проводили на наждачной бумаге Р150 в течение 5 минут на приборе МИ-2 («Полимермаш групп») с использованием груза с массой 2,6 кг;

– температура стеклования образцов была исследована с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC204F1 Phoenix (NETZSCH, Германия), где образцы массой 0,015 г помещали в алюминиевые тигли и подвергали нагреву от –100 до 20 °С при постоянной скорости нагревания 20 °С/мин;

– для исследования фазовой морфологии образцов резин на основе смесей каучуков были получены микрофотографии с помощью атомно-силового микроскопа Ntegra Prima (NT-MTD, Россия) с использованием метода полуконтактного сканирования с кантилевером NSG01 с резонансной частотой 115–190 кГц и с силовой константой 2,5–10 Н/м. Область зондирования составляла 10×10 мкм.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 2 приведены данные по кинетике вулканизации исследованных смесей.

Значения ΔM косвенно характеризуют степень поперечного сшивания вулканизата. Это позволяет прогнозировать жесткость получаемых резин, так как при больших значениях максимального крутящего момента будут получаться материалы с более высокими значениями модуля упругости [24]. Как видно из значений ΔM , приведенных в табл. 2, получения более жестких вулканизатов следует ожидать при содержании БНКС-18 от 30 масс.ч. и выше. Время достижения оптимума вулканизации, принятого за t_{90} , для всех смесей является соизмеримым и составляет в среднем 13,2 мин. Это свидетельствует о том, что вулканизирующая система обеспечивает технологичность и приемлемые параметры вулканизации резин.

Таблица 2

Кинетика вулканизации для резин на основе смесей бутадиен-нитрильного (БНКС-18) и диеновых (СКД, СКИ-3) каучуков

Table 2

Vulcanization kinetics for elastomeric materials based on mixtures of nitrile-butadiene (BNKS-18) and diene (SKD, SKI-3) rubbers

Свойство	Смесь 1 (0:100)	Смесь 3 (30:70)	Смесь 5 (50:50)	Смесь 7 (70:30)	Смесь 8 (100:0)
$M_{\min}$, дН·м	1,67	1,92	1,89	1,88	1,55
$M_{\max}$, дН·м	8,80	11,28	11,13	10,11	10,48
ΔM , дН·м	7,13	9,36	9,24	8,23	8,93
t_s , мин	2,64	2,49	2,29	2,20	2,14
t_{10} , мин	4,52	4,24	4,10	4,09	4,10
t_{50} , мин	8,22	7,67	7,57	7,82	7,94
t_{90} , мин	14,21	12,86	12,69	12,84	13,33

Примечание. $M_{\min}$ – минимальный крутящий момент; $M_{\max}$ – максимальный крутящий момент; ΔM – разность крутящих моментов; t_s – время начала вулканизации; t_{10} , t_{50} и t_{90} – время достижения заданной степени (%) вулканизации.

Note. $M_{\min}$ – minimum torque; $M_{\max}$ – maximum torque; ΔM – torque difference; t_s – vulcanization start time; t_{10} , t_{50} и t_{90} – time needed to reach a specific vulcanization degree (%).

Таблица 3

**Свойства исследованных резин на основе смесей бутадиен-нитрильного (БНКС-18)
и диеновых (СКД, СКИ-3) каучуков**

Table 3

**Properties of the studied elastomeric materials based on mixtures of nitrile-butadiene (BNKS-18)
and diene (SKD, SKI-3) rubbers**

Свойство	Смесь 1 (0:100)	Смесь 2 (10:90)	Смесь 3 (30:70)	Смесь 4 (40:60)	Смесь 5 (50:50)	Смесь 6 (60:40)	Смесь 7 (70:30)	Смесь 8 (100:0)
f_p , МПа	4,2±1,2	3,2±1,0	5,1±1,6	7,3±1,5	6,8±1,5	7,4±1,1	7,6±1	9,6±1,5
ε_p , %	160±46	166±16	227±26	260±18	263±13	273±3	305±20	353±26
$f_{100\%}$, МПа	2,0±0,2	2,2±0,3	2,6±0,3	2,8±0,4	2,7±0,4	2,8±0,3	2,7±0,3	2,8±0,4
C , %	61,2±5,3	59,5±11,1	58,1±4,1	60,8±7,0	64,6±7,3	65,3±7,9	61,2±5,3	74,1±9,6
ΔV , см ³	1,49±0,29	1,21±0,24	1,16±0,25	1,11±0,16	0,98±0,19	1,09±0,10	1,08±0,15	1,24±0,11
$Q_{\text{ВМГЗ}}$, %	46,99±3,74	42,68±2,64	32,25±3,94	24,09±4,89	22,54±3,31	16,37±3,39	14,00±4,38	2,31±1,17
$Q_{\text{Б-3В}}$, %	26,31±3,58	31,04±2,42	28,46±2,55	32,83±2,60	33,22±3,59	34,39±5,88	34,75±3,23	28,05±4,79
K_B	0,86±0,22	0,74±0,13	0,52±0,11	0,51±0,14	0,48±0,04	0,54±0,16	0,50±0,07	0,34±0,13
T_C , °C	-69,3	-65,6	-66,9	-63,6	-62,6	-63,6	-54,3	-52,2

Примечание. f_p – условная прочность; ε_p – относительное удлинение; $f_{100\%}$ – условное напряжение при 100% удлинении; C – ОДС; ΔV – объемный износ; $Q_{\text{ВМГЗ}}$ – степень набухания в масле ВМГЗ; $Q_{\text{Б-3В}}$ – степень набухания в масле Б-3В; K_B – коэффициент морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия при температуре -50 °C; T_C – температура стеклования.

Note. f_p – tensile strength; ε_p – elongation at break; $f_{100\%}$ – tensile stress at 100% elongation; C – compression set; ΔV – volumetric wear; $Q_{\text{ВМГЗ}}$ – swelling degree in VMGZ oil; $Q_{\text{Б-3В}}$ – swelling degree in B-3V oil; K_B – frost resistance coefficient with tension at -50 °C; T_C – glass transition temperature.

В табл. 3 приведены свойства исследованных смесей.

Низкое значение условной прочности для резины из смеси 1 на основе диеновых каучуков СКД и СКИ-3 может быть объяснено наличием в рецептуре малоактивного технического углерода П803. Далее при добавлении БНКС-18 происходит дальнейшее снижение показателя за счет образования грубодисперсной гетерогенной системы, что, по-видимому, связано с малым содержанием БНКС-18 и его недостаточно равномерным распределением (смесь 2). Данные каучуки являются термодинамически не совместимыми, однако, из-за малой скорости расслоения полимерных компонентов на их основе можно получить технически ценные вулканизаты [11]. По мере повышения содержания БНКС-18 происходит увеличение условной прочности (смесь 3). Далее, при постепенном увеличении содержания бутадиен-нитрильного каучука до 70 масс.ч. в резинах из смесей 4–7, условная прочность практически не меняется. Резина на основе смеси 8 (100 масс.ч. БНКС-18) демонстрирует максимальные значения условной прочности. Также с увеличением содержания БНКС-18 наблюдается

повышение показателя относительного удлинения и условного напряжения при 100%-м удлинении. Было обнаружено, что вулканизаты смесей 3–6 являются более жесткими и имеют повышенные значения $f_{100\%}$. Это подтверждает прогноз, сделанный при проведении реометрии. Подобные изменения показателей могут быть объяснены постепенным преобладанием фазы более свулканизованного бутадиен-нитрильного каучука и уменьшением размеров элементов фазовой морфологии.

ОДС для резин из смесей 1–7 является показателем, мало зависящим от состава, он остается практически неизменным при среднем значении 65,3 %. Подобное значение является допустимым в соответствии с требованиями, предъявляемыми к резинам уплотнительного назначения. Наибольшее значение ОДС, близкое к критическому значению, наблюдается у резины на основе чистого БНКС-18.

Для показателей объемного износа наблюдается отклонение от закона аддитивности свойств в отрицательную сторону, что является положительным фактом. Это позволило получить более износостойкие эластомеры – смеси 2–7, у кото-

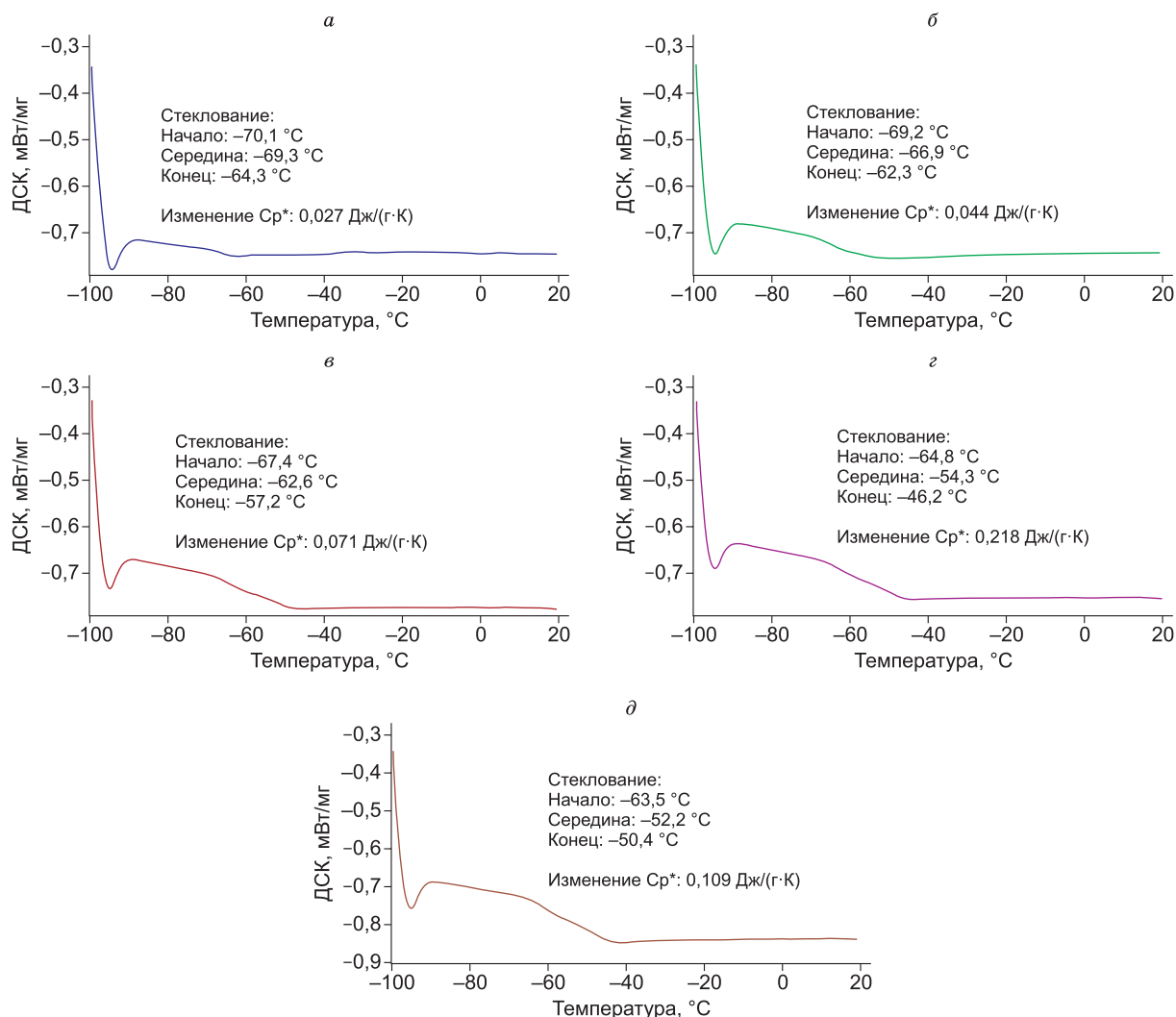


Рис. 1. Термограммы резин на основе смесей бутадиен-нитрильного и диеновых каучуков с содержанием БНКС-18:СКД, СКИ-3: а – смесь 1 (0:100), б – смесь 3 (30:70), в – смесь 5 (50:50), г – смесь 7 (70:30), д – смесь 8 (100:0)

Fig. 1. Thermograms of the elastomeric materials based on mixtures of nitrile-butadiene and diene rubbers containing BNKS-18:SKD, SKI-3: а – Blend 1 (0:100), б – Blend 3 (30:70), в – Blend 5 (50:50), г – Blend 7 (70:30), д – Blend 8 (100:0)

рых ΔV практически одинаков и, в среднем, составляет $1,11 \text{ см}^3$. Полученное значение ниже на 19 % среднего значения объемного износа резин из смесей 1 и 8 на основе индивидуальных каучуков.

В свою очередь, степень набухания в полярном гидравлическом масле ВМГЗ является полностью аддитивной величиной, и с повышением содержания БНКС-18 происходит постепенное увеличение стойкости материалов в среде. В случае набухания исследованных материалов в полярном масле Б-3В тенденция к повышению стойкости в среде, наоборот, наблюдается с повышением содержания диеновых каучуков СКД и СКИ-3.

Коэффициент морозостойкости разработанных материалов ожидаемо снижается при повышении содержания в составе композиций бутадиен-нитрильного каучука. Однако все исследуемые резины на основе смесей имеют соответствующие требованиям показатели K_B и могут быть работоспособны при температурах ниже -50°C . Для более точной характеристики низкотемпературных свойств необходимо рассмотреть термограммы ДСК и температуры стеклования, приведенные на рис. 1.

Для исследованных резин (см. рис. 1) наблюдается наличие одной температуры стеклования, что нехарактерно для эластомеров на основе смесей каучуков. Это, возможно, обусловлено

близостью и слиянием температур стеклования у БНКС-18 ($T_c = -46,6^\circ\text{C}$) и СКИ-3 ($T_c = -61,0^\circ\text{C}$) в присутствии пластификатора, который сдвигает обе T_c в область более низких температур. Для СКД применяемая методика проведения эксперимента не позволяет зафиксировать температуру стеклования вследствие ее крайне низкой величины ($T_c < -100^\circ\text{C}$). На всех термограммах не наблюдается признаков процессов кристаллизации, которая характерна для индивидуальных СКИ-3 и СКД. Вероятно, подобное явление может быть обусловлено взаимоподавлением кристаллизации фаз диеновых каучуков при их постоянном соотношении в маточной смеси (СКД:СКИ-3 = 80:20), так как данный эффект проявляется вне зависимости от содержания маточной смеси в рецептуре.

В случае смесей из полимеров, значительно различающихся по химическому составу и физическим свойствам, при исследовании образцов методом атомно-силовой микроскопии можно визуализировать участки поверхности, различающиеся по фазовому составу. Известно, что при амплитудном детектировании топографии образца параллельно производится картирование фазового распределения в объеме, что дает возможность исследования фазового распределения разных смесей каучуков. Фазовые изображения исследованных резин, полученные методом АСМ, представлены на рис. 2 [17]. На этих микрофотографиях более темные цвета отвечают за более жесткие области. На АСМ-изображениях заметны темные участки в фазовом контрасте, характеризующие фазовое разделение гетерогенной смеси.

На всех микрофотографиях резин на основе смеси каучуков (см. рис. 2, а–г) дисперсная фаза равномерно распределена в дисперсионной среде. Из-за ограниченной термодинамической совместимости каучуков СКИ-3 и СКД можно заметить образование гетерогенной системы (см. рис. 2, а), где преобладает более жесткий СКД. При наличии в рецептуре БНКС-18 (см. рис. 2, б) можно отчетливо наблюдать элементы фазовой морфологии, размеры которых составляют от 1 до 2 мкм, по всей видимости, соответствующие более мягкому СКИ-3. При равном соотношении БНКС-18 и неполярных каучуков (см. рис. 2, в) происходит обращение фаз и далее дисперсионной средой служит более темная фаза бутадиенитрильных каучуков, которая является более

жесткой и вязкой, по сравнению с СКД и СКИ-3. В данном случае наблюдается увеличение размеров элементов фазовой морфологии. С увеличением содержания БНКС-18 до 70 масс.ч. зафиксировано более равномерное распределение фаз, при этом фазовые элементы имеют размеры от 1 до 2 мкм (см. рис. 2, г). Возможно, белые шумы, которые прослеживаются во время зондирования, являются результатом амплитудного колебания кантилевера во время сканирования из-за шероховатой поверхности скола образца, что обусловлено более равномерным распределением смесей каучуков. На микрофотографии резины на основе индивидуального БНКС-18 в виде элементов дисперсной фазы были выявлены частицы технического углерода П803 (см. рис. 2, д). Видно, что технический углерод находится в объеме БНКС-18 в виде черных участков, которые распределены в фазе в виде агломераций.

После сопоставления всех исследованных свойств было установлено, что оптимальным сочетанием свойств обладает резина из смеси 7, где содержание БНКС-18 составляет 70 масс.ч., а неполярных каучуков СКД и СКИ-3 – 30 масс.ч. Несмотря на то что у резины 7 наблюдается более низкие условная прочность (на 21 %), относительное удлинение (на 14 %) и стойкость к агрессивным рабочим средам по сравнению с резиной из смеси 8 на основе индивидуального БНКС-18, она демонстрирует более низкие значения ОДС (на 18 %), высокие значения износостойкости (на 15 %) и коэффициента морозостойкости (на 47 %) в сочетании с более низкой температурой стеклования (на $2,1^\circ\text{C}$). Совокупность полученных характеристик разработанного материала, отвечающая предъявляемым требованиям для морозостойких и износостойких уплотнительных эластомеров, позволяет рекомендовать его применение в качестве уплотнительной резины для эксплуатации в условиях холодного климата. На основании данного соотношения была разработана резина (патент РФ № 2705069), которая рекомендуется для широкого применения для производства уплотнительных деталей для техники Севера.

Заключение

В результате проведенной работы доказана перспективность использования смесей каучуков различной природы в качестве основы для со-

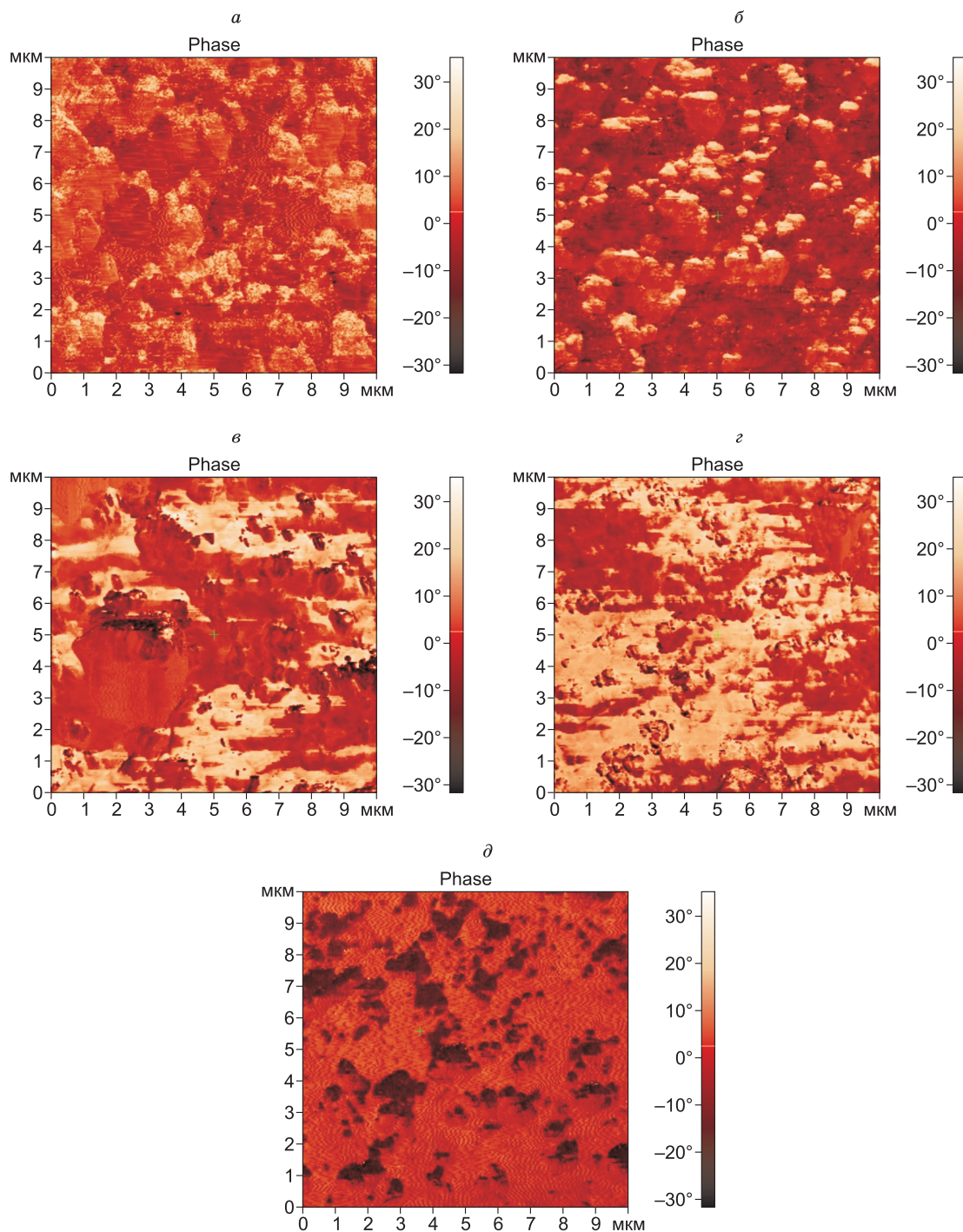


Рис. 2. Фазовые микрофотографии резин на основе смесей бутадиен-нитрильного и диеновых каучуков с содержанием БНКС-18:СКД, СКИ-3 соответственно: *а* – смесь 1 (0:100), *б* – смесь 3 (30:70), *в* – смесь 5 (50:50), *г* – смесь 7 (70:30), *д* – смесь 8 (100:0)

Fig. 2. Phase micrographs of the elastomeric materials based on mixtures of nitrile-butadiene and diene rubbers containing BNKS-18:SKD, SKI-3, respectively: *a* – Blend 1 (0:100), *б* – Blend 3 (30:70), *в* – Blend 5 (50:50), *г* – Blend 7 (70:30), *д* – Blend 8 (100:0)

здания резин уплотнительного назначения. Показано влияние соотношения полимерных компонентов и технологии смешения на структуру и

свойства получаемых резин. Использование подобного метода позволяет сочетать свойства, которые не всегда достижимы для резин на основе

индивидуального каучука. Так, например, в разработанной оптимальной рецептуре (смесь 7) наблюдается сочетание приемлемых физико-механических свойств и стойкости в агрессивных рабочих средах с высокими износостойкостью и морозостойкостью.

Дальнейшим направлением работы является оценка работоспособности разработанных резин в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации техники в регионах Крайнего Севера.

Список литературы / References

1. Кондаков Л.А., Голубев А.И., Овандер В.Б. и др. Уплотнения и уплотнительная техника. М.: Машиностроение; 1986. 464 с.
2. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B. et al. *Sealings and sealing devices*. Moscow: Mashinostroenie; 1986. 464 p. (In Russ.)
3. Bukhina M.F., Kurlyand S.K. *Low-Temperature Behaviour of Elastomers*. Boca Ranton: CRC Press; 2007. 188 p. <https://doi.org/10.1201/b12239>
4. Мухин В.В., Петрова Н.Н., Капитонов Е.А., Афанасьев А.В. Разработка стойких к авиационным синтетическим маслам резин на основе смесей нитрильных и диеновых каучуков. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2016;6(56):41–50.
5. Mukhin V.V., Petrova N.N., Kapitonov Ye.A., Afanasev A.V. Development of aircraft synthetic oil resistant rubbers based on mixture of nitrile and diene rubbers. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2016;6(56):41–50. (In Russ.)
6. Akulichev A.G., Echtermeyer A.T., Persson B.N.J. Interfacial leakage of elastomer seals at low temperatures. *International journal of pressure vessels and piping*. 2018;160:14–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.014>
7. Kömmling A., Jaunich M., Pourmand P., Wolff D., Hedenqvist M. Analysis of O-ring seal failure under static conditions and determination of end-of-lifetime criterion. *Polymers*. 2019;11(8):1251. <https://doi.org/10.3390/polym11081251>
8. Jiang B., Jia X., Wang Z., Wang T., Guo F., Wang Y. Influence of thermal aging in oil on the friction and wear properties of nitrile butadiene rubber. *Tribology Letters*. 2019;67:1–10. <https://doi.org/10.1007/s11249-019-1201-8>
9. Чайкун А.М., Наумов И.С., Алифанов Е.В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор). *Труды ВИИМ*. 2017;1(49):99–106. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-1-12-12>
10. Chaykun A.M., Naumov I.S., Alifanov Ye.V. Rubber sealing materials (overview). *Trudy VIAM*. 2017;1(49):99–106. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2017-0-1-12-12>. (In Russ.)
11. Kim D.Y., Kim G.H., Nam G.M., Kang D.G., Seo K.H. Oil resistance and low-temperature characteristics of plasticized nitrile butadiene rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;136(32):47851. <https://doi.org/10.1002/app.47851>
12. Fedorova A.F., Davydova M.L., Shadrinov N.V., Sokolova M.D., Pavlova V.V., Fedorov A.L. Investigation of the effect of plasticizer injection technology on the properties of epichlorohydrin rubbers. *Journal of Elastomers & Plastics*. 2021;53(7):757–768. <https://doi.org/10.1177/0095244320967029>
13. Петрова Н.Н., Попова А.Ф., Федотова Е.С. Исследование влияния низких температур и углеводородных сред на свойства резин на основе пропиле-ноксидного и бутадиен-нитрильного каучуков. *Каучук и резина*. 2002;(3):6–10.
14. Petrova N.N., Popova A.F., Fedotova Ye.S. Study of the effect of low temperatures and hydrocarbon media on the properties of rubbers based on propylene oxide and butadiene-nitrile rubbers. *Kauchuk i rezina*. 2002;(3):6–10. (In Russ.)
15. Lou W., Zhang W., Wang H., Jin T., Liu X.. Influence of hydraulic oil on degradation behavior of nitrile rubber O-rings at elevated temperature. *Engineering Failure Analysis*. 2018;92:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.006>
16. Klingender R.C. *Handbook of specialty elastomers*. Boca Ranton: CRC Press; 2008. 576 p.
17. Портнягина В.В., Петрова Н.Н., Заровняев Б.Н. Исследование работоспособности уплотнительных резин горнодобывающей техники в экстремальных климатических условиях Севера. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014;9:371–380.
18. Portnyagina V.V., Petrova N.N., Zarovnyaev B.N. Study of operability of sealing rubbers of mining equipment in extreme climatic conditions of North. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;9:371–380. (In Russ.)
19. Mukhin V.V., Petrova N.N., Portnyagina V.V., Fedorov A. L., Baisheva A.V. Investigation of the plasticizer content effects on the operability of the epichlorohydrin rubber based elastomeric material during full-scale test under cold climate conditions and hydrocarbon medium influence. *Materials Science Forum*. 2018;945:417–421. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.417>
20. Haldeeva A.R., Davydova M.L., Sokolova M.D. Development of frost-resistant rubber based on epichlorohydrin rubber of Hydrin T6000 brand. *Materials Science Forum*. 2019;945:356–361. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.356>
21. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. *Большой справочник резинщика. Часть 1. Каучуки и ингредиенты*. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ»; 2012. 744 с.
22. Reznichenko S.V., Morozov Yu.L. *Handbook of Rubber Technologist. Volume 1. Rubbers and ingredients*.

Moscow: ООО "Izdatelskiy tsentr "Tekhinform" MAI"; 2012. (In Russ.)

17. Елисеев О.А., Чайкун А.М., Бузник В.М., Соколова М.Д., Попов С.Н. Основные принципы построения рецептур морозостойких резин для изделий, эксплуатируемых в условиях арктического климата. *Перспективные материалы*. 2015;11:5–18.

Yeliseev O.A., Chaykun A.M., Buznik V.M., Sokolova M.D., Popov S.N. The basic principles of creation of formula cold-resistant rubbers stock for the products maintained in the conditions of the Arctic climate. *Perspektivnye materialy [Advanced materials]*. 2015;11:5–18. (In Russ.)

18. Кулезнев В.Н. *Смеси и сплавы полимеров*. СПб.: Научные основы и технологии; 2013. 216 с.

Kuleznev V.N. *Polymer blends and alloys*. Saint-Petersburg: Scientific foundations and technologies; 2013. (In Russ.)

19. Ушмарин Н.Ф., Егоров Е.Н., Кольцов Н.И. Морозостойкая резина на основе комбинации бутадиен-нитрильного и гидриновых каучуков. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017;60(8):60–64. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017608.5474>

Ushmarin N.F., Yegorov Ye.N., Koltsov N.I. Frost-resistant rubber based on a combination of nitrile butadiene and hydride rubbers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2017;60(8):60–64. <https://doi.org/10.6060/tcct.2017608.5474>. (In Russ.)

20. Гресь И.М., Демидов Д.В., Востриков Д.С., Гусев Д.О., Коваленко В.В., Устинова С.В. Исследование низкотемпературных свойств и стойкости к действию авиационного керосина эластомеров на основе пропиленоксидного и эпихлоргидринового каучуков. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2017;11(206):113–117.

Gres I.M., Demidov D.V., Vostrikov D.S., Gusev D.O., Kovalenko V.V., Ustinova S.V. Study of low-temperature properties and resistance to aviation kerosene of elastomers based on propylene oxide and epichlorohydrin rubbers. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstven-*

nogo tekhnicheskogo universiteta. 2017;11(206):113–117. (In Russ.)

21. Дьяконов А.А., Тапыев С.А., Охлопкова А.А., Слепцова С.А., Петрова Н.Н., Винокуров П.В., Кычкин А.К., Стручков Н.Ф. Исследование свойств эластомеров на основе комбинации изопренового и бутадиен-нитрильного каучуков. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2021;3(37):93–97. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2021.37.3.003>

Dyakonov A.A., Tapyev S.A., Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Petrova N.N., Vinokurov P.V., Kychkin A.K., Struchkov N.F. Research of elastomers properties based on combination of isoprene and nitrile butadiene rubbers. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2021;3(37):93–97. <https://doi.org/10.25699/SSSB.2021.37.3.003>. (In Russ.)

22. Saputra A.H. et al. Degradation of blending vulcanized natural rubber and nitril rubber (NR/NBR) by dimethyl ether through variation of elastomer ratio. *Materials Science and Engineering*. 2018;45(1):012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/345/1/012035>

23. Мирошников Ю.П. *Закономерности смешения и формирования фазовой структуры в гетерогенных полимерных системах*: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. М.; 1996. 45 с.

Miroshnikov Yu.P. Regularities of mixing and formation of phase structure in heterogeneous polymer systems: Abstr. ... Diss. Doct. Sci. Moscow. 1996. 45 p. (In Russ.)

24. Жансакова К.С., Русских Г.С., Еремин Е.Н. Влияние ускорителя вулканизации на свойства пористых резин. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2021;14(2):215–221. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0302>

Zhansakova K.S., Russkikh G.S., Yeremin Ye.N. Influence of the vulcanization accelerator on the properties of porous rubbers. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021;14(2):215–221. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0302>. (In Russ.)

25. Garcia R., Proksch R. Nanomechanical Mapping of Soft Matter by Bimodal Force Microscopy. *European Polymer Journal*. 2013;49:1897–1906. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.03.037>

Об авторах

МУХИН Василий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-1969-8747>, ResearcherID: E-3312-2019, e-mail: mvvnj@yandex.ru

ПЕТРОВА Наталия Николаевна, доктор химических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-7699-7511>, ResearcherID: E-7406-2014, e-mail: pnn2002@mail.ru

ЛАЗАРЕВА Надежда Николаевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, ResearcherID: E-5063-2014, e-mail: nn.lazareva@s-vfu.ru

ДАНИЛОВА Сахаяна Николаевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, ResearcherID: AAZ-5494-2021, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

ШАДРИНОВ Николай Викторович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2694-9615>, ResearcherID: A-6417-2014, e-mail: nshadrinov@gmail.com

About the authors

MUKHIN, Vasilii Vasilevich, Cand Sci. (Eng.), Senior Lecturer, <https://orcid.org/0000-0003-1969-8747>, ResearcherID: E-3312-2019, e-mail: mvvnj@yandex.ru

PETROVA, Natalia Nikolaevna, Dr. Sci. (Chem.) Professor, <https://orcid.org/0000-0001-7699-7511>, ResearcherID: E-7406-2014, e-mail: pnn2002@mail.ru

LAZAREVA, Nadezhda Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of Laboratory, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, ResearcherID: E-5063-2014, e-mail: nn.lazareva@s-vfu.ru

DANILOVA, Sakhayana Nikolaevna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, ResearcherID: AAZ-5494-2021, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

SHADRINOV, Nikolay Viktorovich, Leading Researcher, Cand Sci. (Eng.), <https://orcid.org/0000-0002-2694-9615>, ResearcherID: A-6417-2014, e-mail: nshadrinov@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 03.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.04.2023

Принята к публикации / Accepted 25.05.2023

КОНФЕРЕНЦИИ

Обсуждение проблем изменения климата и таяния вечной мерзлоты

Discussion of climate change and permafrost thawing

22–24 марта 2023 г. в рамках реализации плана мероприятий председательства Российской Федерации в Арктическом совете в 2021–2023 гг. на площадках Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова (СВФУ) и Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН) состоялась Международная конференция по вопросам изменения климата и таяния вечной мерзлоты. В работе конференции приняли участие 493 делегата, в том числе 347 в очном формате и 146 дистанционно. Среди ее участников значились видные государственные и научные деятели России, Казахстана, Китая, Монголии, Китая, Японии и США, руководители международных организаций, ведущие ученые и практики в области исследований климата и вечной мерзлоты, представители общественности, бизнеса и средств массовой информации (рис. 1).

Основной целью международной конференции являлся поиск научно обоснованных практических решений, направленных на адаптацию глобальной экономики к изменениям климата и проблемам жизнеобеспечения в северных регионах.



Рис. 1. Открытие конференции

Fig. 1. Opening of the Conference

В рамках конференции прошли пленарные заседания, круглые столы, дискуссионные площадки, выставка инновационных проектов научно-образовательных центров мирового уровня и конкурс молодежных научных «зеленых проектов».

Одним из важных мероприятий в рамках Международной конференции стала научно-практическая конференция «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», посвященная 150-летию основоположника мерзлотоведения, профессора М.И. Сумгина. В рамках этой конференции приняло участие 136 ученых из России, США, Китая, Казахстана, в том числе один академик РАН, два члена-корреспондента РАН, 20 докторов наук, 32 кандидата наук (рис. 2).

Среди 94 представленных докладов были затронуты вопросы межведомственной системы мониторинга вечной (многолетней) мерзлоты в Российской Федерации, основой которого должны быть фоновый и геотехнический мониторинги, создание федерального и региональных центров сбора, систематизации, прогноза состояния криолитозоны, а также принятия оперативных решений по адаптации экономики. Одной из ключевых обсуждаемых тем стала оценка устойчивости инженерных сооружений в криолитозоне, были затронуты вопросы строительства на вечной мерзлоте, представлены результаты исследований состояния мерзлых толщ на территориях горнопромышленных комплексов, транспортных систем, крупных северных городов, таких как Якутск и Норильск.

Важность проведения мероприятия подтверждается интересом, проявленным к нему со стороны Правительства Российской Федерации и Республики Саха (Якутия) в лице министра иностранных дел РФ С.В. Лаврова, полномочного представителя Президента РФ в Дальневосточном федеральном округе Ю.П. Трутнева, Главы



Рис. 2. Участники заседания научно-практической конференции «Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата», посвященной 150-летию М.И. Сумгина
(Фото: <https://arctic-council-russia.ru>)

Fig. 2. Participants of the Research and Training Conference ‘Sustainability of Natural and Technical Permafrost Systems amidst Climate Change’ dedicated to the 150th anniversary of M.I. Sumgin

Республики Саха (Якутия) А.С. Николаева, Советника Президента РФ Р. Эдельгериева и других.

По итогам конференции состоялось подписание ряда соглашений. Представителями научного сообщества было предложено создать Ассоциацию криологов России, цель которой координация и консолидация мерзловедов России. Эта инициатива получила одобрение и поддержку со стороны Главы РС (Я) А.С. Николаева. Также участники конференции высказали свои

рекомендации Правительству РФ, Министерству строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации совместно с Министерством Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики, Федеральной службе России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) и Академии наук Республики Саха (Якутия).

*Железняк М.Н., чл.-корр. РАН, д.г.-м.н.,
директор ИМЗ СО РАН*

*Кузь А.А., к.г.-м.н.,
ученый секретарь ИМЗ СО РАН*

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *З.И. Евсеев*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 27.06.2023. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 20,9. Тираж 100 экз. Заказ № 360. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «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