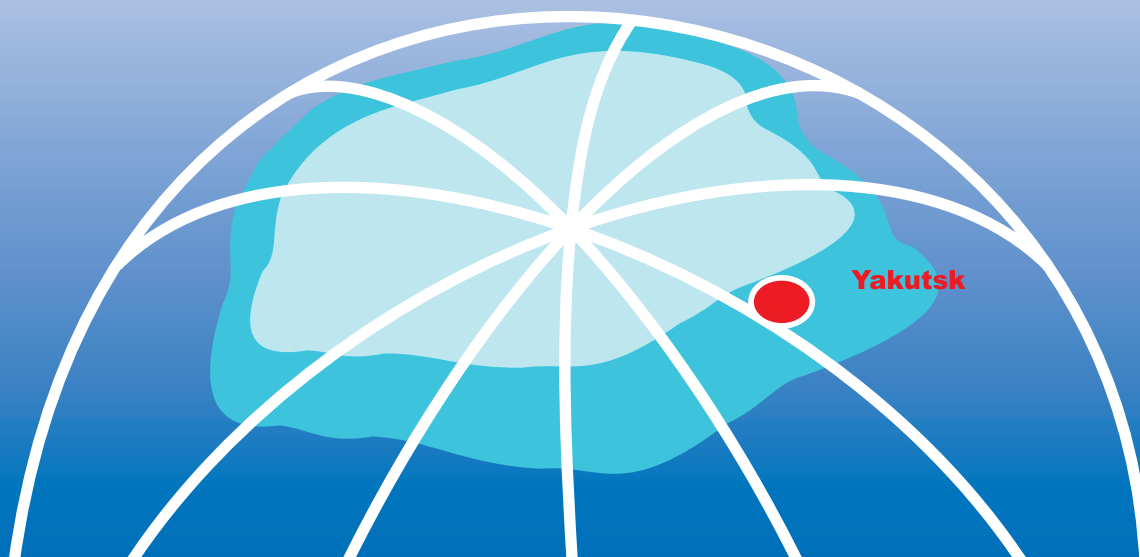


ISSN 2618-9712 (print)
ISSN 2686-9683 (online)



ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

2022

т. 27 № 2

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2022, Том 27, № 2

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

Академия наук Республики Саха (Якутия),
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

В.В. Филиппов

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

Н.Г. Соломонов, член-корр. РАН
Ю.М. Григорьев, д-р физ.-мат. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<http://nras.asrsya.ru>

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

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

© Академия наук РС (Я), 2022
© Якутский научный центр СО РАН, 2022
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2022
© Министерство образования и науки РС (Я), 2022

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 «Nauka i Obrazovanie»)

Scientific journal

2022, Vol. 27, No. 2

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia),
Yakut Scientific Center 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

V.V. Filippov

Corresponding Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief:

N.G. Solomonov
Corresponding Member of RAS
Yu.M. Grigoriev
Dr.Sci. (Phys.-Math.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

33 Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia
nras2018@mail.ru

<http://nras.asrsya.ru>

The certificate of registration of PI No. TU14-00503
of February 15, 2018, issued by the Department
of Federal Service for Supervision in the Sphere
of Communication, Information Technologies
and Mass Communications in the Republic of Sakha (Yakutia)
Subscription Index in the Russian Post Catalogue – ПР046
Enlisted in the Catalogue of Leading Scientific Journals
of the Higher Attestation Commission, RF (22.12.2020)
Included in the Russian Science Citation Index database (RSCI)

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

Редакционный совет:

Филиппов В.В. – чл.-корр. РАН, АН РС (Я); Крымский Г.Ф. – акад. РАН, ИКФИА СО РАН; Лебедев М.П. – чл.-корр. РАН, ИФТПС 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. – чл.-корр. РАН, СВКНИИ ДВО РАН
Григорьев М.Н. – д.г.н., ИМЗ СО РАН
Железняк М.Н. – д.г.-м.н., ИМЗ СО РАН
Колодезников И.И. – д.г.-м.н., проф., АН РС (Я)
Кутыгин Р.В. – к.г.-м.н., ИГАБМ СО РАН
Матвеев А.И. – д.т.н., ИГДС СО РАН
Похиленко Н.П. – акад. РАН, ИГМ СО РАН
Романовский В.Е. – д-р, проф., Геофиз. ин-т Ун-та шт. Аляска, США
Стоун Дэвид – д-р, проф., Геофиз. ин-т Ун-та шт. Аляска, США
Толстов А.В. – д.г.-м.н., НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО)
Фридовский В.Ю. – д.г.-м.н., проф., ИГАБМ СО РАН
Шепелев В.В. – д.г.-м.н., проф., ИМЗ СО РАН
Хуббертен Х.-В. – д-р, проф., Потсдамский ф-л Ин-та полярных и морских исслед. им. А. Вегенера, Германия
Яковлев В.Л. – чл.-корр. РАН, ИГД УрО РАН

Общая биология

Арчибалд Дж. – д-р, Межд. фонд охраны журавлей, США
Данилова Н.С. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН
Исаев А.П. – д.б.н., ИБПК СО РАН
Кершенголыц Б.М. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН
Соломонов Н.Г. – чл.-корр. РАН, ИБПК СО РАН
Хияма Т. – д-р, проф., Ун-т г. Нагоя, Япония
Убугунов Л.Л. – д.б.н., ИОЭБ СО РАН
Хатано Р. – д-р, проф., Ун-т Хоккайдо, Япония
Шадрина Е.Г. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН

Материаловедение

Аннин Б.Д. – акад. РАН, ИГиЛ СО РАН
Григорьев Ю.М. – д.ф.-м.н., СВФУ
Дейонг Джонг – д-р, проф., Университет Инха, Ю. Корея
Качанов М.Л. – д-р, проф., Ун-т Тафтса, США
Лепов В.В. – д.т.н., ИФТПС СО РАН
Охлопкова А.А. – д.т.н., проф., СВФУ
Салахов М.Х. – д.ф.-м.н., проф., К(П)ФУ

Editorial Council:

V.V. Filippov – corr. member RAS, AS RS(Ya), Prof., AS RS(Ya); G.F. Krymsky – Acad. RAS, Yu.G. Shafer Inst. of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS; M.P. Lebedev – corr. member RAS, Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS; A.N. Nikolaev – Dr. Sci. (Biol), NEFU n.a. M.K. Ammosov; M.Yu. Prisyazhny – Dr. Sci. (Geography), Ministry of Education and Science of RS (Ya)

Editorial Board:Earth Sciences

N.A. Goryachev – Corr. Member RAS, Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS
M.N. Grigoriev – Dr. Sci. (Geogr.), Melnikov Permafrost Inst. SB RAS
M.N. Zhelezniak – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Melnikov Permafrost Institute SB RAS
I.I. Kolodeznikov – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), prof., AS RS(Ya)
R.V. Kutygin – Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS
A.I. Matveev – Dr. Sci. (Tech.), Chersky Inst. of Mining of the North SB RAS
N.P. Pokhilenko – Acad. RAS, V.S. Sobolev Inst. of Geology and Mineralogy SB RAS
V. E. Romanovsky – Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, USA
David B. Stone – Dr., Prof., Geophysical Inst., Univ. of Alaska, USA
A.V. Tolstov – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Research Geological Prospecting Enterprise (NIGP) of PJSC «ALROSA»
V.Yu. Fridovsky – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Diamond and Precious Metal Geology Inst. SB RAS
V.V. Shepelev – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Prof., Melnikov Permafrost Inst. SB RAS
H.-V. Hubberten – Dr., Prof., Alfred Wegener Inst. for Polar and Marine Research, Potsdam Research Unit, Germany
V.L. Yakovlev – Corr. Member RAS, Inst. of Mining UB RAS

General Biology

George Archibald – Dr., International Crane Foundation, USA
N.S. Danilova – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
B.M. Kershengolts – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
N.G. Solomonov – Corr. Member RAS, Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
Tetsuya Hiyama – Dr., Prof., Nagoya Univ., Japan
A.P. Isaev – Dr. Sci. (Biol.), Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS
L.L. Ubugunov – Dr. Sci. (Biol.), Inst. of General and Experimental Biology SB RAS
Ryusuke Hatano – Dr., Prof., Hokkaido Univ., Japan
E.G. Shadrina – Dr. Sci. (Biol.), Prof., Inst. for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS

Materials Science

B.D. Annin – Acad. RAS, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Yu.M. Grigoriev – Dr. Sci. (Phys. and Math.), NEFU
Dae-Yong Jeong – Dr., Inha University, Korea
M.L. Kachanov – Dr., Prof., Tufis Univ., USA
V.V. Lepov – Dr. Sci. (Tech.), Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS
A.A. Okhlopova – Dr. Sci. (Tech.), Prof., NEFU n. a. M.K. Ammosov
M.H. Salakhov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ.

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

<i>Третьяков Ф.Ф.</i> Тектоника Верхояно-Колымской системы мезозой (Восточная Якутия)	181
<i>Баранов Л.Н., Толстов А.В.</i> Роль фоскоритов в минерализации Томторского рудного поля	195
<i>Герасимов Б.Б.</i> Вещественный состав и геолого-структурная позиция золотоносных гидротермально-метасоматических образований бассейна р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы)	207

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Боброва Д.А., Казаков А.И., Шевченко А.И.</i> Современная динамика количества твердых осадков и слоя стока весеннего половодья на реках Сахалина	221
<i>Федорова С.В., Павлова Н.А.</i> Фтор в поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии	233

Общая биология

Экология

<i>Турчина Т.А., Янченко З.А.</i> Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений	246
<i>Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Петрова И.В.</i> Анализ регрессионных связей температуры воздуха на разных высотах в горах Северного Урала	258
<i>Колосова О.Н., Кершенгольц Б.М.</i> Сезонные изменения уровня эндогенных этанола и ацетальдегида в крови крупных растительноядных млекопитающих Арктики и Субарктики (на англ. яз.)	268

Биологические ресурсы

<i>Алексеев К.В.</i> Анализ таксационных показателей лиственных лесов долины средней Лены	277
<i>Данилова Н.С., Борисова С.З., Егорова А.А.</i> Фитоценотическая характеристика ломко-колосниково-терескеновой степи в Якутии	282
<i>Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф., Морозова К.В., Ермолаева О.В., Литвинова Т.И.</i> Пути адаптации <i>Stellaria humifusa</i> на приморских территориях западного Шпицбергена	294

Материаловедение

<i>Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г.</i> Испытания на износ порошковых покрытий и исследования микрогеометрии поверхностей трения в условиях холода	305
<i>Федорова А.Ф., Давыдова М.Л., Шадрин Н.В., Борисова А.А., Федоров А.Л., Антоев К.П., Халдеева А.Р., Павлова В.В.</i> Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима	316

Память

<i>Филиппов Василий Васильевич</i>	327
--	-----

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

<i>Tretyakov F.F.</i> Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system (Eastern Yakutia)	181
<i>Baranov L.N., Tolstov A.V.</i> The role of phoscorites in the minerageny of the Tomtor ore field.....	195
<i>Gerasimov B.B.</i> Material composition and geological-structural position of gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations of the Anabar river basin (northeast of the Siberian platform)	207

Engineering geology, permafrost and soil science

<i>Bobrova D.A., Kazakov A.I., Shevchenko A.I.</i> Current dynamics of the amount of solid precipitation and the spring flood runoff on the Sakhalin rivers.....	221
<i>Fedorova S.V., Pavlova N.A.</i> Fluorine in surface and suprapermfrost waters in Central Yakutia.....	233

General biology

Ecology

<i>Turchina T.A., Yanchenko Z.A.</i> Assessment of the reindeer pastures safety in the Avam tundra: content of heavy metals in the vegetative organs of plants.....	246
<i>Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Petrova I.V.</i> Analysis of regression relationships of air temperature at different altitudes in the mountains of the Northern Urals	258
<i>Kolosova O.N., Kershengolts B.M.</i> Seasonal changes in the level of endogenous ethanol and acetaldehyde in the blood of large herbivorous mammals of the Arctic and Subarctic.....	268

Biological resources

<i>Alekseev K.V.</i> Analysis of taxational indicators of the larch forests in the Middle Lena valley (Central Yakutia)	277
<i>Danilova N.S., Borisova S.Z., Egorova A.A.</i> Phytocenotic characteristics of Psathyrostachys caespitosa-Krascheninnikovia ceratoides communities in Yakutia	282
<i>Shmakova N.Yu., Markovskaya E.F., Morozova K.V., Ermolaeva O.V., Litvinova T.I.</i> <i>Stellaria humifusa</i> adaptation on the western coast of Svalbard	294

Materials science

<i>Struchkov N.F., Lebedev D.I., Vinokurov G.G.</i> Wear testing of powder coatings and investigations of microgeometry of friction surfaces under cold conditions	305
<i>Fedorova A.F., Davydova M.L., Shadrinov N.V., Borisova A.A., Fedorov A.L., Antoev K.P., Haldeeva A.R., Pavlova V.V.</i> Investigation of changes in the properties of sealing rubbers under the influence of a hydrocarbon environment and temperature conditions.....	316

Memory

In memory of Filippov Vasily Vaslievich	327
---	-----

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 551.243.(571.5)

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-181-194

Тектоника Верхояно-Колымской системы мезозойд (Восточная Якутия)

Ф.Ф. Третьяков

*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
treyakov_ff@mail.ru*

Аннотация. Предложена окраинноморская модель перестройки Якутского окраинного моря (ЯОМ) в орогенную Верхояно-Колымскую систему мезозойд (ВКСМ), изложенная в общих чертах и, несомненно, подлежащая дальнейшему детальному исследованию. Установлено сходство строения и формирования ЯОМ с современным Японским окраинным морем. Образование ВКСМ в позднем мезозое происходило путем минисубдукции океанской коры ЯОМ под островную дугу и микроконтинент с закрытием малых океанских бассейнов и коллизией блоков земной коры ЯОМ с Сибирским континентом. Окраинноморская модель позволяет установить, что основные тектонические структуры Верхояно-Колымской и Новосибирско-Чукотской складчатых систем мезозойд Северо-Востока России являются структурными элементами разных кратонов – Северо-Азиатского и Северо-Американского и формировались они по разные стороны конвергентной границы южной Протоарктики. Коллизионная (окраинноморская) Верхояно-Колымская в тыловой, а аккреционная Новосибирско-Чукотская – во фронтальной части границы.

Ключевые слова: Якутское окраинное море, малый океан, «спящий» режим, минисубдукция, конвергентная граница, Верхояно-Колымская система мезозойд

Благодарности. Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект № FUEM-2019-0001(0381-2019-0001)) и при поддержке гранта РФФИ № 19-05-009 45.

Введение

В основу происхождения Верхояно-Колымской системы мезозойд (ВКСМ) положена модель структурного преобразования окраинных (краевых) морей в орогенную складчатую систему. Сама идея окраинноморской модели, возникшая еще в пору геосинклинальной концепции [1], позже в плитотектонических построениях ВКСМ только упоминалась, но была обоснована лишь в конце прошлого столетия [2]. Эти представления показали, что территория ВКСМ в позднем палеозое–мезозое представляла собой окраинное море, отгороженное от океанических пространств Палеопацифики и Протоарктики конвергентными границами. В позднем мезозое в тылу указанных конвергентных границ произошла перестройка окраинного моря в коллизионную складчатую систему, которая принципиально отличается своим происхождением и строением от

аккреционных складчатых систем, формирующихся во фронте конвергентных границ [2–4].

Цель данной статьи направлена на постановку проблемы и обсуждение альтернативной окраинноморской модели формирования ВКСМ на основе концепции тектоники плит, которая нуждается в дальнейшем изучении и детальной разработке. Предпринята попытка показать строение основных тектонических элементов ВКСМ, этапы и некоторые особенности их развития в процессе структурной перестройки окраинного моря.

Кроме того, окраинное море, занимавшее территорию ВКСМ в позднем палеозое–мезозое, предлагается называть «Якутским окраинным морем» (ЯОМ). А малый океан между Верхоянской пассивной окраиной и Омuleвским микроконтинентом [3–6] именовать «Оймяконский малый океан, малый океанический бассейн».

Обсуждение

В тектоническом строении ВКСМ большая часть ее территории принадлежит районам с погребенной дорифейской континентальной корой Северо-Азиатского кратона (САК), а также отдельным блокам с выходами дорифейской коры на дневную поверхность. Наиболее обширным из них является восточная окраина САК, на поверхности погруженного дорифейского фундамента которой располагаются терригенные комплексы Верхоянской пассивной континентальной окраины (ВПКО) (см. рисунок). Значительные размеры ВПКО были приобретены не только в процессе осадконакопления с проградацией шельфовых отложений верхоянского комплекса в восточном направлении [5], но и образованием ВПКО между двумя сравнительно далеко отстоящими друг от друга Индигирской и Верхоянской среднепалеозойскими рифтовыми системами [7], заложенными соответственно в живетское и франское время и закончившими свое развитие в конце позднекаменноугольной эпохи [8].

Расположение погребенных рифтовых структур Индигирской и Верхоянской систем вдоль восточной и западной границ Верхоянского складчато-надвигового пояса (ВСНП) и сеть разломов, образованная между ними, показали высокую степень дробления фундамента ВСНП, его высокую проницаемость и насыщенность интрузиями гранитоидов. Разобщенные «отторженцы» дорифейской континентальной коры САК, Охотский и Омолонский мегаблоки с архейским субстратом, выходящим на дневную поверхность, выделяются в юго-восточной части ВКСМ и сочленяются через погруженные дорифейские блоки, лежащие в основании Балыгычанской и Сугойской складчатых зон [9]. В среднем палеозое они представляли протяженный Северо-Охотский дорифейский цоколь САК, на окраине которого формировались образования кедонской серии Охотско-Омолонской магматической дуги андского типа [10]. Находят свое место и происхождение ряд погребенных выступов фундамента (Янское и другие), расположенные между Верхоянской и Индигирской палеорифтами, которые интерпретировались ранее как погруженные срединные массивы [9].

Многочисленные блоки Омурского пояса (микроконтинента) представляют собой фрагменты земной коры фанерозойской пассивной окраины, отторгнутые от восточного края САК в процессе среднепалеозойского рифтогенеза [11, 12].

Крупным из них является Приколымский блок с раннепротерозойским метаморфическим основанием [13, 14]. Другие палеозойские блоки образуют западный индентор Колымо-Омолонского мегаблока (КОМ). Тектонически Омурские блоки разделяются на две группы. Улахан-Сисский, Селенняхский, Тас-Хаяхтахский и Урультунский являются аллохтонными, покровными структурами, которые надвинуты на терригенные толщи Полоусненского и Инъяли-Дебинского синклиналиев. Кроме того, эти покровы пронизаны коллизионными гранитоидами Главного и Северного поясов. Автохтонные – Приколымский, Ясаченский, Рассохинский, Омурский и Нахаттинский блоки располагаются в тылу аллохтонных пластин. Граница между аллохтонными и автохтонными блоками проводится по разлому Улахан, вдоль юго-западной окраины КОМ.

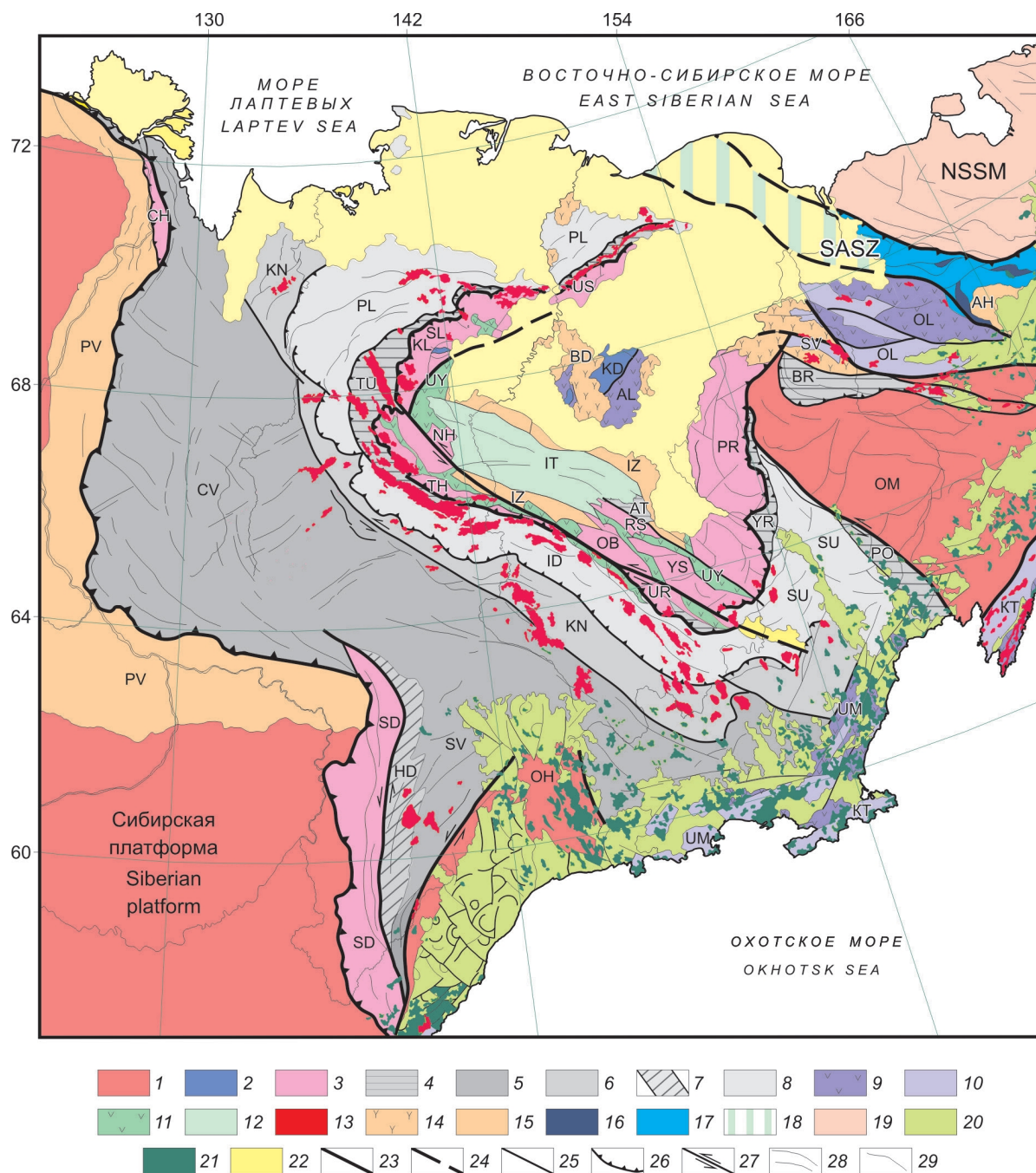
Омурский микроконтинент в строении ЯОМ играл важную роль, он разделял Оймяконский и Арга-Тасский малые бассейны. Первый из них известен в качестве пострифтового Оймяконского малого океана (МО), второй – размещается между Омурским микроконтинентом и Алазейской островной дугой и является малым задуговым бассейном [5, 15].

Блоки симатических и офиолитовых образований выделяются на территории КОМ. Наиболее крупный Кенкельдинский блок размещается на Алазейском поднятии. Он имеет двухъярусное строение: симатический метаморфический фундамент и маломощный осадочный чехол.

Метаморфические породы фундамента сложены рассланцованными метабазами (океанические толеиты, оливиновые базальты) и сложнодислоцированными кварц-слюдисто-амфиболовыми и другими сланцами, кварцитами и мраморизованными известняками. Они неоднократно деформированы в складки пластического течения и являются их структурными отличительными признаками. Породы метаморфизованы в эпидот-амфиболитовой и глаукофан-зеленосланцевой [16] или глаукофансланцевой, зеленосланцевой и цеолитовой [17] фациях. Докембрийский возраст метаморфических образований обоснован находками остатков нижнерифейских водорослей [18] и комплекса юдомских онколитов [16], полный список которых (*Vesicularites concretus* Z. Zhur. и др.) приводится в фондовых материалах (А.Г. Кац и др., 1980 г.).

Осадочный чехол Кенкельдинского блока сложен маломощными трещиноватыми отложениями кенкельдинской толщи. Ископаемые органи-

ТЕКТОНИКА ВЕРХОЯНО-КОЛЫМСКОЙ СИСТЕМЫ МЕЗОЗОИД (ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ)



Тектоническая схема Верхояно-Колымской системы мезозой.

Геологические комплексы. Северо-Азиатского кратона: 1 – дорифейские континентальные, 2 – докембрийские симатические. Пассивных окраин. Омурская: 3 – рифей–среднего палеозоя, 4 – позднего палеозоя–мезозоя. Верхоянская позднего палеозоя–мезозоя: 5 – шельфовые, 6 – континентального склона и подножья, 7 – поперечной долины Южного Верхоянья. Оймяконского океанического бассейна: 8 – мезозойские осадочные. Активных окраин позднего палеозоя–мезозоя: 9 – островодужные, 10 – задатковых и преддуговых бассейнов. Синколлизонные. Позднеюрские: 11 – минисубдукционные вулканогенные, 12 – морские осадочные. 13 – гранитоиды поздней юры–раннего мела. Меловые: 14 – вулканогенные, 15 – осадочные. Южно-Аннуйская шовная зона: 16 – океанической коры; островодужные и морские: 17 – установленные, 18 – предполагаемые. Новосибирско-Чукотская система мезозой: 19 – террейны Северо-Американского кратона (Чукотский микроконтинент). Охотско-Чукотский магматический пояс: 20 – вулканогенные, 21 – интрузивные. 22 – кайнозойские отложения. Разломы главные: 23 – установленные, 24 – предполагаемые, 25 – разломы складчатых зон; 26 – надвиги, 27 – сдвиги; 28 – структурные линии складок и разрывов; 29 – стратиграфические границы.

Буквенные обозначения. Блоки Северо-Азиатского кратона: ОН – Охотский, ОМ – Омолонский, КД – Кенкельдинский. Омурского пояса. Автохтонные: РК – Приколымский, ЯС – Ясачненский, ОВ – Омурской, РС – Рассохинский, НН –

Нахтинский. Аллохтонные: UR – Урультунский, TH – Тас-Хаяхтахский, SL – Селенняхский, KL – Калгынский, US – Улахан-Сисский. *Складчатые зоны. Верхоянские*: SD – Сетте-Дабанская, CH – Чекуровская, CV – Центрально-Верхоянская, SV – Южно-Верхоянская, HD – Хандыгская (кливажная), KN – Кулар-Нерская. *Оймяконские*: ID – Иньяли-Дебинская, PL – Полоусненская, SU – Сугойская, TU – Туостакская, YR – Ярходонская, PO – Приомолонская. *Островодужные*: AL – Алазейская, OL – Олойская, KT – Кони-Тайгоноская, UM – Удско-Мургальская. *Преддуговые и задуговые (нерасчлененные)*: AT – Арга-Тасская, BR – Березовская, SV – Сиверский блок. *Синколлизионные структуры*: UY – Уяндина-Ясачненский вулканический пояс, IT – Илин-Тасский антиклинорий. Прогибы: PV – Приверхоянский, IZ – Индигиро-Зырянский. Впадины: BD – Бадярихинская, AH – Айнахкуркенская. SASZ – Южно-Анхойская шовная зона, NSSM – аккреционная Новосибирско-Чукотская система мезозой (террейны Северо-Американского кратона).

Tectonic scheme of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system.

Geological complexes. North Asian Craton: 1 – Pre-Riphean continental, 2 – Precambrian simatic. Passive margins. Omulevskaya: 3 – Riphean-Middle Paleozoic, 4 – Late Paleozoic-Mesozoic. Verkhoyansk of the Late Paleozoic-Mesozoic: 5 – shelf, 6 – continental slope and foot, 7 – transverse valley of the Southern Verkhoyansk. Oymyakon oceanic basin: 8 – mesozoic sediments. Active margins of the Late Paleozoic-Mesozoic: 9 – island-arc, 10 – back-arc and fore-arc basins. Syncollisional. Late Jurassic: 11 – minisubduction volcanogenic, 12 – marine sediments. 13 – granitoids of the Late Jurassic – Early Cretaceous. Cretaceous: 14 – volcanogenic, 15 – sedimental. South Anyuy suture zone: 16 – oceanic crust; island-arc and marine: 17 – established, 18 – proposed. Novosibirsk-Chukotka mesozoid system: 19 – terrains of the North American craton (Chukotka microcontinent). Okhotsk-Chukotka magmatic belt: 20 – volcanogenic, 21 – intrusive. 22 – Cenozoic sediments. Major faults: 23 – established, 24 – proposed, 25 – faults of the folded zones, 26 – thrust faults, 27 – strike-slip faults, 28 – structural lines of folds and faults, 29 – stratigraphic boundaries.

Abbreviations. Blocks. *North Asian Craton*: OH – Okhotsky, OM – Omolonsky, KD – Kenkeldinsky. *Omulevsky belt*. Autochthonous: PK – Prikolymsky, YS – Yasachnensky, OV – Omulevsky, RS – Rassokhinsky, NH – Nakhtinsky. Allochthonous: UR – Urultunsky, TH – Tas-Khayakhtakhsy, SL – Selennyakhsy, KL – Kalgynsky, US – Ulakhan-Sissy. *Fold zones. Verkhoyansk*: SD – Setteh-Dabanskaya, CH – Chekurovskaya, CV – Central Verkhoyansk, SV – Southern Verkhoyansk. HD – Khandygsкая (cleavage), KN – Kular-Nerskaya. *Oymyakon*: ID – Inyali-Debinskaya, PL – Polousnenskaya, SU – Sugoyetskaya, TU – Tuostakhsкая, YR – Yarkhodonskaya, PO – Preomolonskaya. *Island-arc*: AL – Alazeiskaya, OL – Oloyskaya, KT – Koni-Taygonosskaya, UM – Uda-Murgalskaya. *Fore-arc and back-arc*: AT – Arga-Tasskaya, BR – Berzovskaya, SV – Siversky block. *Syncollisional structures*: UY – Uyandina-Yasachnensky volcanic belt, IT – Ilin-Tass anticlinorium. Troughs: PV – Priverkhoyansk, IZ – Indigirka-Zyryansky. Hollowes: BD – Badyarikhinskaya, AH – Aynakhkurgenskaya. SASZ – South Anyuy suture zone, NSSM – accretion Novosibirsk-Chukotka mesozoid system (terrane of the North American Craton).

ческие остатки в них не обнаружены, и они условно относятся к среднепалеозойским образованиям. Состоят из слабостратифицированных граувакковых, реже полимиктовых песчаников, содержащих обломки гранитоидов, кварцитов и метаморфических сланцев. Нередко среди них встречаются крупные окатанные обломки кремнистых пород и известняков [16, 19].

Образования Алазейского островодужного комплекса занимают юго-восточную половину одноименного поднятия. Сложены они из вулканокластических отложений каменноугольно-юрского возраста с подчиненным количеством базальтовых лав и органогенно-детритовых известняков. По геодинамической природе породы соответствуют осадкам, заполнявшим задуговой бассейн Алазейской островной дуги [19, 20]. Неравномерное накопление осадков отмечается стратиграфическими перерывами в разрезах раннего, среднего карбона, перми, отсутствием отложений раннего и среднего триаса [16, 17]. В конгломератах позднего триаса присутствуют валуны и галька всех подстилающих пород, а также плагиогранитов и метаморфических сланцев [19].

Цепочка пластин офиолитовых образований хребта Черского тектонически встроена надви-

гами в миогеоклинальные толщи Омuleвского пояса. Среди них лучше изучен калгынский комплекс Селенняхского блока, сложенный (снизу вверх) серпентениновым меланжем, офиолитокластитами, ультрабазит-базитами, габбро-амфиболитами и metabазальтами, которые перекрывают полиметаморфические образования уядинского комплекса [6]. Результаты последних исследований показали, что ультрамафиты калгынского комплекса имеют близкое родство по составу и происхождению с океаническими аналогами, а не с муниланскими, которые менее близки к океаническим [21]. Наиболее древний возраст офиолитовых образований хребта Черского предполагается раннепалеозойским [22]. Однако до сих пор не опровергнуты данные о находках среднерифейских строматолитов в карбонатных породах томмотской серии Селенняхского блока [23], ассоциирующих пространственно с породами офиолитового комплекса.

Мезозойские структурно-вещественные комплексы Полоусненского, Иньяли-Дебинского и Сугойского синклинориев Оймяконского складчатого пояса дугой обрамляют КОМ с запада и представляют собой три составных сегмента

Оймяконского бассейна малого океана. Формирование его связано с процессом заложения в живетское время Ольджойско-Нерской рифтовой ветви ИРС [7], отколовшей от восточного края САК миогеоклинальные блоки Омuleвского микроконтинента [11, 12]. Этот бассейн в течение среднепалеозойско-мезозойского времени последовательно прошел все стадии своего развития, начиная от внутриконтинентальной рифтовой долины до раздвига ее бортов с полным расколом сиалической коры и внедрением образований мантийного вещества, создавшего океанскую кору ОМО [5] или дно различных малых океанических бассейнов [24]. В позднеюрское время ОМО закончил свое существование предугловым бассейном островной дуги Уяндино-Ясачненского вулканического пояса (УЯВП) [5].

Из трех сегментов внутриконтинентального ОМО наиболее изучена его центральная Инъяли-Дебинская зона (синклиний) [1, 25], выполненная терригенными флишoidными триас-юрскими толщами мощностью около 11 000 м. Геологические исследования синклиния последних лет свидетельствуют, что осадконакопление в бортовых участках бассейна сопровождалось размывом, оползанием осадочных отложений, с частыми нарушениями осадков следами течения, а неокатанные формы местных обломков и наличие конседиментационных олистором указывают, что эти осадки не могли транспортироваться далеко от его берегов [26]. Тем не менее, юрские толщи (6000 м) Инъяли-Дебинской зоны обладают непрерывным осадочным разрезом, тогда как строение и развитие разновозрастных терригенных толщ Сугойского и Полоусненского сегментов иное.

В Сугойском синклинии триас-юрские морские отложения со стратиграфическим несогласием перекрывают верхнепалеозойские породы пассивных окраин Приколымского и Омолонского блоков [27]. Следующий перерыв в осадконакоплении отмечается на уровне плинсбах-тоарской эпохи, и аален-байосские отложения несогласно перекрывают геттанг-синемюрские [28]. Другие исследователи подчеркивают, что мезозойские осадочные толщи Сугойского бассейна не содержат пелагических осадков и «ничего океанического в них нет» [2], как нет их в центральном и северном сегментах Оймяконского бассейна.

Северный сегмент Оймяконского бассейна состоит из морских терригенных отложений Полоусненского и Ерчинского синклинийев, несущих

разнообразную геологическую информацию о неглубоко залегающем их кристаллическом фундаменте. В районе Депутатского месторождения дайки основного состава мелового возраста содержат ксенолиты лейкократовых гранитов и пород кристаллического фундамента (гнейсы, гранулиты, биотит-графитовые и гранат-графитовые сланцы) [29]. В Ерчинском синклинии (Кондаковское плоскогорье) изучение литологических свойств позднеюрских (оксфорд-волга) турбидитовых отложений показало, что источником обломочных пород служат гранитоиды и кристаллические сланцы подстилающего фундамента [30].

Келловейские отложения Полоусненского синклиния со стратиграфическим перерывом залегают на норийских отложениях, а в осадках оксфордского возраста обнаруживается накопление хаотических обломков и валунов известняков среднего палеозоя [31]. На территории этого синклиния, как и в Сугойском, из осадконакопления выпадают отложения плинсбахского яруса и глинистые осадки тоарского или ааленского веков перекрывают песчаники геттангского возраста.

Характерная черта строения пострифтового внутриконтинентального Оймяконского бассейна состоит в том, что он, как и все подобные бассейны, размещается между структурами пассивных континентальных окраин [4, 32]. Его западная сторона состоит из осадочных комплексов обширной ВПКО, а противоположная сторона — из отложений цепочки блоков пассивной окраины Омuleвского микроконтинента.

Позднепалеозойские комплексы пассивной окраины Омuleвского микроконтинента хорошо сохранились на восточном крыле Приколымского блока, где происходит смена терригенно-карбонатных шельфовых отложений раннего карбона черносланцевыми отложениями континентального склона и подножья среднего-позднего карбона и пермского возраста. В осадочных разрезах позднего карбона содержатся горизонты лав и эффузивов основного состава монхайдинской свиты [33], являющихся аналогами чахаданской свиты Южного Приколымья. С вулканогенными образованиями монхайдинской свиты ассоциирует разновозрастная ей интрузивная серия силлов и даек габбро и долеритов, которые цепочкой прослеживаются вдоль зоны Ярхонского разлома и проникают далее на северо-восток в каменноугольные толщи Березовской складчатой зоны [28]. Этот позднекаменноуголь-

ный магматизм основного состава вдоль пассивной окраины Прикомльского блока интерпретируется как следствие локального «неразвившегося рифта» [28]. Однако, это событие можно трактовать как проявления финального магматизма рифтовой ветви ИРС и попытку проникновения ее в Березовскую зону.

На северной окраине Селенняхского блока, среди отложений среднего–позднего карбона, также обнаруживаются покровы базальтов и их туфов [31]. Вполне возможно, что они тоже являются следами позднего рифтового магматизма, закончившего свое развитие в Ольджойской зоне, на другом северо-западном конце ИРС.

Возвращаясь к проблеме среднепалеозойского рифтогенеза, следует указать, что полный раскол сиалической коры с раскрытием мантийного субстрата произошел в центральной Нерской (Инъяли-Дебинской) зоне ИРС. Предполагается, что перерастание рифтовой зоны в ОМО началось в визейское время [15]. Однако формирование океанской коры в Оймяконском бассейне могло начаться и раньше с позднего девона (фран). Это время отмечается проявлением рифтового ультрабазит-базитового магматизма не только в пределах Тас-Хаяхтаха блока [21], но и далее на юго-восток, вдоль всей зоны структур Омудевского микроконтинента [8, 34]. Кроме того, во франскую эпоху происходило усиление, разрастание процесса рифтинга, латерального растяжения и деструкции земной коры САК с образованием второй трехлучевой Верхоянской рифтовой системы [7]. Одновременно с этим продолжалось развитие ИРС, а в ее Нерской зоне произошел полный раскол сиалического слоя с формированием ОМО и началом спрединга ее океанской коры.

Можно предполагать, что время завершения процесса рифтинга в Индигирском регионе примерно совпадает со временем окончания спрединга в ОМО и есть возможность приблизительно оценить возраст океанской коры ОМО как поздний девон–поздний карбон.

Во-первых, это проявление рифтогенеза ИРС (живет) и базальтового магматизма увязкинской толщи в Арга-Тасской зоне (эйфель?), природа которой трактуется неоднозначно [34, 35].

Во-вторых, уместно напомнить, что существующие представления о возрасте офиолитов пояса хребта Черского построены на том, что большинство из них предполагаются палеозойскими. Среди них Калгынский и Мунилканский

офиолиты – ордовикские [6,15], Арга-Тасского бассейна – среднепалеозойские [35]. А кыбытыгасские базиты Тас-Хаяхтаха имеют рифтовое происхождение и франский возраст [21]. Остатки океанской коры молодого возраста в пределах коллизийного пояса Черского и в соседних с ним районах пока не обнаружены.

В-третьих, если предполагать действие спрединга ОМО с каменноугольного времени до юрского, то этот океанический бассейн приобрел бы, по крайней мере, размеры, близкие Атлантическому океану, и ход геологической истории рассматриваемой территории был бы совершенно иным. Все это позволяет искать другие пути решения поставленных вопросов, один из которых обсуждается ниже.

Изучение геодинамических обстановок современных малых океанических бассейнов показало, что среди них существуют бассейны с прерванным спредингом или утратившим рост океанической коры с последующим погребением ее осадочным чехлом и именуются они как «спящие, уснувшие» океанические бассейны [36]. «Спящий» тектонический режим океанской коры таких бассейнов может охватывать разные промежутки времени. В качестве примера приводятся строение бассейнов Черного, Каспийского (южная часть) морей и Мексиканского залива, утративших спрединг или активный рост океанской коры. В этой работе в качестве примера «спящего» малого океана попытаемся рассмотреть Оймяконский малый океанический бассейн.

Идея «спящего» малого океана позволяет предполагать, что прекращение процесса среднепалеозойского рифтинга на территории ВКСМ произошло одновременно с прекращением спрединга, разрастания малой океанской коры в Оймяконском бассейне в конце каменноугольной эпохи и переходом ее в состояние «спящего» тектонического режима.

В такой обстановке тектонического покоя малая океанская кора Оймяконского бассейна, примерный возраст которой составляет поздний девон–поздний карбон (см. выше), вероятно – пребывала в течение пермско-раннеюрского времени и была покрыта толстым слоем (чехлом) терригенных осадков, сносимых с Верхоянского и Омудевского пассивных континентальных окраин, обрамлявших Оймяконский бассейн. Мощность мезозойских отложений, накопившихся только в его центральном сегменте, составляла более 11 000 м. Дальнейший механизм погруже-

ния дна таких «спящих» малых океанов был обусловлен преимущественно весом накопившихся перекрывающих отложений дна бассейна и относительно «быстрым» охлаждением «спящей» океанской коры [36].

Возобновление активного латерального движения «спящей» Оймяконской малой позднепалеозойской океанской коры и ее погружение под земную кору КОМ начались лишь в позднеюрскую эпоху с закрытием ОМО и формированием в поздней юре (оксфорд–ранний титон) островодужных комплексов УЯВП, связанных с временем процесса минисубдукции малой океанской коры. Здесь «минисубдукция» понимается как процесс погружения, субдукции малой океанской коры в замкнутых окраинных морях под островную дугу или микроконтинент.

Близкая палеогеодинамическая обстановка формирования ЯОМ с указанными перикратонными структурами оказывается сходной с образованием структур дна современного Японского моря [13]. Одна из моделей формирования структур дна таких окраинных морей предполагает разрыв, расклинивание литосферы над зоной субдукции восходящей рассеянной (диффузной) мантийной ветвью, подобно процессу рифтогенеза. Отсюда следует предполагать, что этот механизм образования структур океанского дна окраинного моря с течением времени прерывается, прекращается и спрединг малой океанской коры в этих бассейнах. Вполне возможно, что Арга-Тасский и Оймяконский малые океаны, утратившие процесс спрединга в позднекаменноугольное время до позднеюрской эпохи, могли находиться в состоянии «спящих» малых океанов.

Структурное преобразование ЯОМ в орогенную складчатую ВКСМ началось в среднеюрское время. Главным событием этой эпохи стало закрытие Арга-Тасского малого океанического (задугового) бассейна, который, с одной стороны, омывал берега пассивной окраины Омулевского микроконтинента, а с другой – берега Алазейской островодужной зоны. Закрытие этого бассейна привело к тектоническому объединению Омулевского микроконтинента с Алазейско-Олойской островной дугой в Колымо-Омолонский мегаблок, супертеррейн по Л.М. Парфенову [5]. Однако на палеотектонических схемах и профилях рассматриваемой территории Арга-Тасский малый океанический бассейн не изображается или изображается безымянным [3, 6, 13].

В образовании земной коры КОМ в среднеюрскую эпоху участвовали разнородные и разновозрастные блоки: дорифейский Приколывский, палеозойские Омулевские, докембрийский Кенкельдинский и Алазейско-Олойской островной дуги позднего палеозоя–раннего мезозоя [15]. Геологические комплексы и тектонические деформации, созданные в процессе среднеюрского орогенного этапа на территории КОМ, многочисленны и выражены в разнообразной форме, что свидетельствует о различных взаимоотношениях блоков его земной коры.

На Тас-Хаяхтаском и Омулевском блоках это угловые несогласия в основании осадочных и вулканогенных толщ средней юры [25, 37], а в пределах чешуйчатых блоков хребта Арга-Тас среднеюрские отложения не обнаружены [25, 38]. В Улахан-Сисском блоке образования верхнебатских олистостром определяют развитие фронтальных надвигов [39].

На Алазейском поднятии рассматриваемое событие отмечено накоплением аален-байосской толщи с конгломератами, перекрывающей несогласно более древние отложения, и проявлением среднеюрского гранитоидного магматизма [17].

На востоке Олойской зоны бат-келловейские вулканогенно-осадочные породы со стратиграфическим несогласием залегают на верхнеюрских [28]. В Березовской зоне и на Сиверском блоке из осадочного разреза выпадают отложения средней юры и киммеридж-волжские толщи базальными конгломератами с размывом и угловым несогласием перекрывают отложения разных горизонтов верхнего палеозоя, триаса и нижней юры. Тогда как рядом в Омолонском палеобассейне накопление осадков в среднеюрскую эпоху не прекращалось [28]. Наконец, со среднеюрской тектонической эпохой проявился заключительный, третий этап (174 млн лет) метаморфических преобразований калгынского офиолитового и ассоциирующих с ними метаморфических пород уядинского комплексов с выведением их складчато-надвиговыми дислокациями к земной поверхности Селенняхского блока [6, 15].

На южной окраине САК в рассматриваемую эпоху в процессе столкновения структур кратона с Буренинским супертеррейном завершается формирование Монголо-Охотского орогенного пояса [10]. Одновременно на северном побережье Палеоокеана региональные тектонические движения в пределах Северо-Охотской конти-

нентальной окраины приводят к смене древних островодужных структур активных окраин молодыми. В результате Кони-Тайгоноская островная дуга, которая в позднем палеозое–раннем мезозое отгораживала Сибирский континент от Палео-пацифики [2], наращивается наложением на нее позднеюрско-раннемеловой Удско-Мургальской дуги [10].

Позднемезозойская тектоническая перестройка ЯОМ, начавшаяся в среднеюрское время образованием КОМ, была продолжена в поздней юре–раннем мелу закрытием ОМО в процессе сближения КОМ с Сибирским континентом [5]. Замыкание этого бассейна происходило в поздней юре, в относительно коротком интервале времени (оксфорд–начало титона), с формированием островодужного УЯВП в результате минисубдукции малой Оймяконской океанской коры под неоднородную земную кору КОМ. В этой обстановке, на заключительной стадии своего развития Оймяконский бассейн был выражен преддуговым прогибом [5], но без типичного надсубдукционного аккреционного клина. Поскольку погружение малой «спящей» океанской коры происходило под мощным чехлом морских отложений позднего палеозоя–мезозоя, накопившихся в результате размыва Верхоянской и Омuleвской пассивных окраин, обрамлявших Оймяконский бассейн. Соответственно, поддвигающаяся плита малой океанской коры проскальзывала и погружалась под базальными срывами в основании осадочных толщ этого бассейна.

Однако близкая по строению аккреционной призматической тектонической структура во фронтальной зоне КОМ существует. Она сложена триас-юрскими отложениями Туостаской складчатой зоны антиклинорного строения. Формирование складчато-надвиговой структуры и скупивание морских отложений этой зоны было создано в результате коллизионного «бульдозерного» действия индентора КОМ в западном направлении на мезозойские толщи Полоусненской зоны.

Следует обратить внимание и на то, что современные тектонические схемы развития ВКСМ [13; и др.] построены на методах тектоники литосферных плит, используемых для расшифровки структурного образования геодинамических единиц открытых, обширных океанических пространств. Видимо поэтому возникают расхождения в интерпретации зарождающихся тектонических комплексов и структур ВКСМ в

позднем мезозое в условиях замкнутого окраинного моря.

Например, природа УЯВП трактуется по-разному, хотя большинство геологов принимают его островодужное происхождение, но при этом неодинаково решают полярность ее минисубдукции [12, 40]. Другие видят происхождение УЯВП рифтовым [41] или сложным геодинамически зональным [42]. Соответственно, смежный Илин-Тасский позднеюрский прогиб предполагается преддуговым или задуговым бассейном Уяндино-Ясачненской островной дуги, но Илин-Тасский синколлизийный прогиб мог возникнуть и рамповым грабеном.

Неоднозначно решается происхождение Главного и Северного гранитных поясов, завершивших формирование континентальной коры ВКСМ в позднеюрско-раннемеловое время. Гранитоиды Главного батолитового пояса традиционно представляют собой магматические образования позднеюрского коллизионного процесса [13, 43]. Тогда как происхождение субдукционных раннемеловых гранитоидов Северного пояса предполагает формирование их с закрытием небольшого остаточного залива Южно-Ануйского океана [13], но возможно и другое, и они отражают процесс минисубдукции малой океанической коры Арга-Тасского задугового бассейна, который не был полностью замкнут в среднеюрское время.

Таким образом, закрытием Оймяконского и Арга-Тасского малых океанических бассейнов, столкновением КОМ с Сибирским континентом, формированием Главного и Северного поясов гранитных батолитов в поздней юре–раннем мелу завершается тектоническая перестройка перикратонных структур ЯОМ северо-востока Азии в орогенную складчатую ВКСМ с новообразованной позднемезозойской континентальной корой. Структурный план ВКСМ показывает не нагромождение, коллаж блоков земной коры, а отчетливый латеральный ряд различных по природе складчатых поясов, сменяющих друг друга с запада на восток (см. рисунок). В этом же направлении складчатые пояса деформируются, образуя в центральной части ВКСМ полукольцо, получившее наименование «Колымская петля» [11].

Западное обрамление ВКСМ представлено структурами синколлизийного Приверхоянского краевого прогиба, раннемеловые осадочные толщи которых нарушены надвиговыми дислокациями. К востоку от них располагается обшир-

ный Верхоянский складчато-надвиговый пояс, сложенный преимущественно шельфовыми терригенными отложениями одноименной пассивной континентальной окраины. Размещаются они на погруженном раздробленном дорифейском фундаменте САК, целостность которого нарушена разломами, по крайней мере, девонского рифтогенеза. К структурам Верхоянского складчато-надвигового пояса с востока примыкает Кулар-Нерский сланцевый пояс, сложенный дистальными отложениями континентального склона и подножья ВПКО, которые далее сменяет пояс морских глубоководных флишевых толщ Оймяконского малого океанического бассейна, образующих внешние складчато-надвиговые структуры коллизионного пояса хребта Черского.

Внутренние структурные элементы коллизионного пояса Черского («Колымской петли») состоят из полукольца аллохтонных и автохтонных палеозойских блоков Омупевского микроконтинента, на которые наложена цепочка минисубдукционных островодужных образований Уяндино-Ясачненского вулканогенного пояса. Вулканогенно-осадочные породы Арга-Тасского задугового океанического бассейна выявляются среди серии небольших чешуйчатых блоков Омупевского складчатого пояса, а основная часть их скрыта под осадочными комплексами Илинь-Тасского антиклинория. Структуры Алазейской островной дуги на противоположной стороне Арга-Тасского бассейна погребены меловыми отложениями Индигиро-Зырянского прогиба и четвертичными Ожогинского дола.

В строении основных коллизионных структур пояса Черского участвуют гранитоидные батолиты позднеюрского Главного и раннемелового Северного поясов, которые «сшивают» разнородные блоки земной коры КОМ и Сибирского континента. Наконец, восточную окраину ВКСМ дугообразно замыкают структуры Алазейско-Олойского, Кони-Тайгоносского и Удско-Мургальского островодужных складчато-надвиговых поясов, которые представляли собой активные геодинамические элементы конвергентных границ Протоарктики и Палеопацифики и обрамляли структуры Якутского окраинного моря в позднем палеозое–мезозое.

В позднеюрское время вдоль северной активной окраины Сибирского континента с началом закрытия остаточного Южно-Анжуйского бассейна происходит сближение Чукотского микроконтинента с континентальной окраиной ВКСМ.

В конце раннемелового времени в процессе аккреции они столкнулись с формированием между ними Южно-Анжуйской шовной зоны (ЮАШЗ). В итоге вдоль ЮАШЗ произошло приращение, увеличение новообразованной позднемезозойской континентальной коры Северо-Азиатского кратона чужеродными блоками (террейнами) Северо-Американского кратона, состоящими из Чукотского микроконтинента (пассивной окраины), и тектоническими элементами островов Новой Сибири и Врангеля, которые образовали аккреционную Новосибирско-Чукотскую систему мезозой (НЧСМ).

Особенности геодинамического развития орогенных сооружений мезозойд Северо-Востока России на примере неоднородных Верхояно-Чукотской и Корякско-Камчатской складчатой областей [4] показывают, что орогенные складчатые Верхояно-Колымская и Новосибирско-Чукотская системы мезозойд состоят из тектонических структур разных кратонов – Северо-Азиатского и Северо-Американского и формировались они по разные стороны конвергентной границы южной Протоарктики. С момента своего сочленения в зоне Южно-Анжуйского шва эти две разнородные складчатые системы мезозойд: коллизионная (окаинноморская) Верхояно-Колымская и аккреционная Новосибирско-Чукотская, продолжили свое развитие уже в составе единой Верхояно-Чукотской орогенной области мезозойд Северо-Востока России, конвергентная граница которой была обозначена вдоль новой юго-восточной окраины Северо-Азиатского кратона формированием позднемеловых вулканоплутонических комплексов Охотско-Чукотского магматического пояса.

Заключение

Рассмотрена альтернативная окаинноморская модель формирования орогенной системы в процессе структурной перестройки окаинного моря. В позднем палеозое–мезозое на территории ВКСМ размещалось ЯОМ с малыми океанскими бассейнами, которые в позднем мезозое были закрыты в процессе минисубдукции их океанской коры под островные дуги и микроконтиненты. В результате происходило возникновение новообразованных тектонических элементов, столкновение их с Сибирским континентом и формирование орогенной ВКСМ.

Особенности геодинамического развития орогенных ВКСМ и НЧСМ показывают, что они состоят из тектонических структур разных кра-

тонов, Северо-Азиатского и Северо-Американского, и формировались они по разные стороны конвергентной границы литосферных плит. С момента своего сочленения эти две разнородные системы мезозойд: коллизионная (океаноморская) Верхояно-Колымская и аккреционная Новосибирско-Чукотская, продолжили свое развитие уже в составе единой Верхояно-Чукотской орогенной области мезозойд Северо-Востока России.

Литература

1. Чехов А.Д. Тектоническая эволюция Северо-Востока Азии (океаноморская модель). М.: Научный мир, 2000. 204 с.
2. Соколов С.Д., Диденко А.Н., Григорьев В.Н., Алексютин М.В., Бондаренко Г.Е., Крылов К.А. Палеотектонические реконструкции северо-востока России: проблемы и неопределенности // Геотектоника. 1997. № 6. С. 72–90.
3. Бондаренко Г.Е. Тектоника и геодинамическая эволюция мезозойд северного обрамления Тихого океана. Автореф. дис. докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2004. 46 с.
4. Соколов С.Д. Очерк тектоники Северо-Востока Азии // Геотектоника. 2010. № 6. С. 60–78.
5. Парфенов Л.М. Террейны и история формирования мезозойских орогенных поясов Восточной Якутии // Тихоокеанская геология. 1995. Т. 14, № 6. С. 32–43.
6. Оксман В.С. Тектоника коллизионного пояса Черского (Северо-Восток Азии). М.: ГЕОС, 2000. 269 с.
7. Третьяков Ф.Ф. Некоторые аспекты строения консолидированной коры Верхоянского складчатонадвигового пояса // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 116–122.
8. Гусев Г.С., Гайдук В.В., Булгакова М.Д., Фрадкин Г.С., Брахфогель Ф.Ф. Среднепалеозойский (верхнегерцинский) мегакоматекс // Структура и эволюция земной коры Якутии М.: Наука, 1985. С. 89–117.
9. Мерзляков В.М., Терехов М.И. Срединные массивы Северо-Востока СССР // Тектоника срединных массивов. М.: Наука, 1976. С. 37–42.
10. Ханчук А.И., Голозубов В.В., Горячев Н.А., Родионов С.М. Геодинамические реконструкции и металлогения Востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 2. С. 880–897.
11. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. М.: Недра, 1990. 334 с.
12. Parfenov L.M. Tectonics of Verkhoyansk-Kolyma Mesozooids in context of plate tectonics // Tectonophysics. 1991. Vol. 199. P. 319–342.
13. Парфенов Л.М. Тектоническая эволюция земной коры Якутии в контексте геодинамики севера Тихоокеанского обрамления и металлогенические пояса // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001. С. 499–512.
14. Беус В.А. Возраст и геолого-петрохимические особенности метаморфических ортопород Приколымского докембрийского комплекса // Региональная геодинамика и стратиграфия Азиатской части СССР. Сборник научных трудов. СПб., 1992. С. 65–85.
15. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–255.
16. Тектоника, магматические и метаморфические комплексы Колымо-Омолонского массива / Гринберг Г.А., Гусев Г.С., Бахарев А.Г., Булгакова М.Д., Ипатьева И.С., Недосекин Ю.Д., Рукович В.Н., Соловьев В.И., Сурнин А.А., Третьяков Ф.Ф. М.: Наука, 1991. 359 с.
17. Лычагин П.П., Мерзляков В.М., Терехов М.И. Геология Алазейского плоскогорья // Вопросы геологии срединных массивов Северо-Востока СССР. Магадан, 1977. С. 18–55.
18. Иванов О.Н. Геология Алазейского нагорья в связи с тектоническим районированием Северо-Востока СССР // Принципы тектонического районирования. Владивосток, 1975. С. 227–235.
19. Булгакова М.Д. Литологические особенности формационных комплексов позднего палеозоя–раннего мезозоя Верхояно-Чукотской складчатой области // Литология и полезные ископаемые. 1982. № 1. С. 55–66.
20. Лычагин П.П. Андезитовый вулканизм Алазейского плоскогорья (Северо-Восток СССР) // Вулканология и сейсмология, 1983. № 4. С. 53–61.
21. Трунилина В.А., Роев С.П., Орлов Ю.С., Иванов А.И. Магматизм хребта Тас-Хаятах. Якутск: Изд-во ЯГУ, 2009. 135 с.
22. Кропачев А.П., Стрельников С.И., Киселев А.А., Федорова Н.П. Доордовикские офиолитокластиты Омудовского поднятия (Северо-Восток СССР) // Докл. АН СССР. Сер. Геол., 1987. Т. 292, № 4. С. 941–944.
23. Гребенников Г.А., Работнов В.Т., Спектор В.Б. К стратиграфии верхнего докембрия Селенняхского кряжа // Докембрий и палеозой Северо-Востока СССР. Тезисы докладов межведомственного стратиграфического совещания. Магадан, 1974. С. 12.
24. Дженкинс Х.К. Пелагические фациальные обстановки // Обстановки осадконакопления и фации. Т. 2. М.: Мир, 1990. С. 74–140.

25. *Натапов Л.М., Сурмилова Е.П.* Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист-54, 55 – Хонуу. Объяснительная записка. Л., 1986. 120 с.
26. *Оксман В.С., Суздальова Н.И., Краев А.А.* Деформационные структуры и динамические обстановки формирования пород Верхне-Инди́гирского района. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2005. 204 с.
27. *Кузнецов В.М.* Особенности строения Сугойского синкли́нория и его положение в мезозоидах Северо-Востока СССР // Тихоокеанская геология. 1983. № 2. С. 105–109.
28. *Натапов Л.М., Шульгина В.С.* Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист Q-56,57 – Среднеколымск. Объяснительная записка. Л., 1991. 111 с.
29. *Индолев Л.Н.* Дайки рудных районов Восточной Якутии. М.: Наука, 1979. 196 с.
30. *Осипова З.В.* Литология верхнеюрского песчаникового комплекса Кондаковского плоскогорья // Новые данные по металлогении и геологическому строению Яно-Колымского междуречья. Л., 1972. С. 43–50.
31. *Натапов Л.М., Сурмилова Е.П.* Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1000000 (новая серия). Лист R-53-(55) Депутатский. Объяснительная записка. СПб., 1992. 105 с.
32. *Митчелл А.Х.Г., Рединг Х.Г.* Осадконакопление и тектоника // Обстановки осадконакопления и фации. Т. 2 / Под редакцией Х.Г. Рединга. М.: Мир, 1990. С. 227–283.
33. *Кузнецов В.М.* Верхнепалеозойские отложения восточного крыла Приколымского поднятия // Материалы по геол. и полезн. ископ. Северо-Востока СССР. Магадан: Кн. изд-во, 1980. Вып. 25. С. 3–9.
34. *Булгакова М.Д., Колодезников И.И.* Среднепалеозойский рифтогенез на Северо-Востоке СССР: осадконакопление и вулканизм. М.: Наука, 1990. 256 с.
35. *Натапов Л.М., Зоненишайн Л.П., Шульгина В.С., Сурмилова Е.П., Десятьев В.С., Савосина А.К., Артемов А.В., Кац А.Г., Ставский А.П.* Геологическое развитие Колымо-Инди́гирского региона и проблема Колымского массива // Геотектоника. 1977. № 4. С. 18–31.
36. *Ingersoll R. V.* Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature // Tectonics of sedimentary basins: Recent Advances / Edited by Cathy Busby and Antonio Azor. Blackwell Publishing Ltd, 2012. P. 3–43.
37. *Константиновский А.А.* Древние глыбы в юрских отложениях хребта Черского (Северо-Восток СССР) // Геотектоника. 1975. № 6. С. 61–67.
38. *Терехов М.И., Дылевский Е.Ф.* Геология хребта Арга-Тас. Препринт. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1988. 49 с.
39. *Архипов Ю.В., Агафонов Г.Е., Сонин Г.С.* Олистохромы Улахан-Тасского горст-антиклинория // Бюллетень научно-технической информации. Вопросы региональной и нефтяной геологии Якутии / ЯФ СО АН СССР. Якутск, 1980. С. 17–20.
40. *Гедько М.И.* Уяндино-Ясачненская позднеюрская островная дуга (северо-восток СССР) // Геотектоника. 1988. № 3. С. 88–100.
41. *Сурнин А.А.* Позднеюрские ультраосновные и основные комплексы Колымского массива. Новосибирск: Наука, 1990. 160 с.
42. *Дылевский Е.Ф.* Зональность Уяндино-Ясачненского вулканического пояса и его тектоническая природа (северо-восток Азии) // Геотектоника. 1994. № 4. С. 52–62.
43. *Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Д., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахарев А.Г., Трунилина В.А.* U-Pb-SHRIMP-возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // Докл. РАН. 2009. Т. 426, № 2. С. 216–221.

Поступила в редакцию 25.02.2022

Поступила после рецензирования 24.03.2022

Принята к публикации 14.04.2022

Об авторе

ТРЕТЬЯКОВ Феликс Филаретович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,
<https://orcid.org/0000-0001-6087-6408>, e-mail: tretyakov_ff@mail.ru

Для цитирования

Третьяков Ф.Ф. Тектоника Верхояно-Колымской системы мезозой (Восточная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 181–194. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-181-194>

Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system (Eastern Yakutia)

F.F. Tretyakov

*Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
tretyakov_ff@mail.ru*

Abstract. In this paper we propose the model of transformation of the Yakut Marginal Sea (YMS) into the orogenic Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system (VKMS). The model is indicated in general terms and is undoubtedly a subject to further research. We have established similarity of the structure and formation of the YMS to the modern Japan marginal sea. In the late Mesozoic the VKMS was formed through the mini-subduction of the YMS oceanic crust beneath the island arc and microcontinent with the closure of small ocean basins, along with the collision of the YMS crustal blocks with Siberian continent. The marginal sea model allows us to claim that the major tectonic structures of the Verkhoyansk-Kolyma and Novosibirsk-Chukotka folded mesozoic systems of the Northeast Russia are in fact structural elements of different cratons: the North Asian and North American cratons. Moreover, formation of the systems occurred on different sides of the convergent boundary of the southern Proto-Arctic. Thus, the collisional (marginal sea) Verkhoyansk-Kolyma border was formed in the rear zone of the border, and the accretionary Novosibirsk-Chukotka border was formed in its frontal part.

Keywords: Yakut marginal sea, small ocean, «sleep» mode, minisubduction, convergent boundary, Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system

Acknowledgements. The research was carried out as part of the scientific work of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (number FUEM-2019-0001(0381-2019-0001)) and funded by the Russian Foundation for Basic Research (project number 19-05-009 45).

References

1. Cehov A.D. Tectonicheskaya evolusiya Severo-Vostoka Asia (okrainnomorskaya model). M.: Nauchny mir, 2000. 204 p.
2. Sokolov S.D., Didenko A.P., Grigoriev V.N., Aleksutin M.V., Bondarenko G.E., Krylov K.A. Paleotectonicheskie rekonstruktsii severo-vostoka Rossia: problems i neopredelennosti // Geotectonica. 1997. No. 6. P. 72–90.
3. Bondarenko G.E. Tektonika i geodinamicheskaya evolusiya mezozoid severnogo obramleniya Tihogo okeana. Avtoref. dis. dokt. geol.-min. nauk. M.: MGU, 2004. 46 p.
4. Sokolov S.D. Ocherk tektoniki Severo-Vostoka Azii // Geotektonika. 2010. No. 6. P. 60–78.
5. Parfenov L.M. Terrany i istoria formirovaniya mezozoiskih orogennih poyasov Vostochnoi Yakutia // Tihookeanskaya geologia. 1995. Vol. 14, No. 6. P. 32–43.
6. Oksman V.S. Tektonika kollizionnogo poyasa Cherskogo (Severo-Vostok Azii). M.: GEOS, 2000. 269 p.
7. Tretyakov F.F. Nekotorye aspekty stroeniya konsolidirovannoy kory Vtrkhoynkogo skladchato-nadvigovogo poyasa // Otechestvennaya geology. 2017. No. 5. P. 116–122.
8. Gusev G.S., Gaiduk V.V., Bulgakova M.D., Fradkin G.S., Brahfogel F.F. Srednepaleozoiskiy (verkhneg-ersinsky) megakomplex // Struktura i evolusiya zemnoi kori Yakutia. M.: Nauka, 1985. P. 89–117.
9. Merzlykov V.M., Terehov M.I. Sredinnie massivi Severo-Vostoka SSSR // Tektonika sredinnih massivov. M.: Nauka, 1976. P. 37–42.
10. Hanchuk A.I., Golozubov V.V., Gorychev N.A., Rodionov S.M. Geodinamicheskie rekonstrukcii i metallogenia Vostoka Rossii // Geodinamika, magmatizm i metallogenia Vostoka Rossii. Vladivostok: Dalnyauka, 2006. Kniga 2. P. 880–897.
11. Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M. Tektonika litosfernykh plit territorii SSSR. Kniga 2. M.: Nedra, 1990. 334 p.
12. Parfenov L.M. Tectonics of Verkhoyansk-Kolyma Mesozoids in context of plate tectonics // Tectonophysics. 1991. Vol. 199. P. 319–342.
13. Parfenov L.M. Tectonicheskaya evolucia zemnoi koru Yakutii v kontekste geodinamiki severa Tihookeanskogo obramleniya i metallogenicheskie poysa // Tektonika, geodinamika i metallogenia territorii Respubliki Chaha (Yakutia). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 499–512.
14. Beus V.A. Vozrast i geologo-petrohimicheskie osobennosti metamorficheskikh ortopod Prikolymnogo

dokembriiskogo kompleksa // Regionalnaya geodinamika i stratigrafia Aziatskoi chasti SSSR. Sbornik nauchnih trudov. L., 1992. P. 65–85.

15. *Parfenov L.M., Oksman V.S., Prokopiev A.V., Timofeev V.F., Tretyakov F.F., Trunilina V.A., Deikunenko A.V.* Collage terreinov Verkhoyano-Kolymskoi orogennoi oblasti // Tectonika, geodinamika i metallogenia territorii Respubliki Sakha (Yakutia) / Otв. Red. L.M. Parfenov, M.I. Kuzmin. M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 199–255

16. *Tektonika*, magmaticheskie i metamorficheskie kompleksi Kolimo-Omolonskogo massiva / Grinberg G.A., Gusev G.S., Baharev A.G. i drugie. M.: Nauka, 1991. 359 p.

17. *Lichagin P.P., Merzliakov V.M., Terehov M.I.* Geologia Alazeiskogo ploskogoria // Voprosi geologii sredninih massivov Severo-Vostoka SSSR. Magadan, 1977. P. 18–55.

18. *Ivanov O.N.* Geologia Alazeiskogo nagoria v sviazi s geologicheskim raionirovaniem Severo-Vostoka SSSR // Printsipi tektonicheskogo raionirovaniya. Vladivostok, 1975. P. 227–235.

19. *Bulgakova M.D.* Litologicheskie osobennosti formacionnih kompleksov pozdnego paleozoya-rannego mezozoya Verhoyna-Chukotskoi skladchatoi oblasti // Litologia i poleznie iskopaemie. 1982. No. 1. P. 55–66.

20. *Lichagin P.P.* Andezitovii vulkanizm Alazeiskogo ploskogoria (Severo-Vostok SSSR) // Vulkanologia i seismologia. 1983. No. 4. P. 53–61.

21. *Trunilina V.A., Roev S.P., Orlov J.S., Ivanov A.I.* Magmatizm hrebta Tas-Hayhtah. Yakutsk: Izd-vo YGU, 2009. 135 p.

22. *Kropachev A.P., Strelnikov S.I., Kiselev A.A., Fedorova N.P.* Doordovikskie ofiolitoklastiti Omulevskogo podnyatia (Severo-Vostok SSSR) // Dokl. AN SSSR. Ser. Geol. 1987. Vol. 292. No. 4. P. 941–944.

23. *Grebennikov G.A., Rabotnov V.T., Spektor V.B.* K stratigrafii verhnego dokembria Selenyyskogo kryga // Dokembrii i paleozoi Severo-Vostoka SSSR. Tezisi dokladov megvedomstvennogo stratigraficheskogo soveshchaniya. Magadan, 1974. P. 12.

24. *Dgenkins H.K.* Pelagicheskie facialnie obstanovki // Obstanovki osadkonakopleniya i facii. Vol. 2. M.: Mir, 1990. P. 74–140.

25. *Natapov L.M., Surmilova E. P.* Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:1000000 (novaya seria). List – 54,55. Honuu. Obyasnitelnyaya zapiska. L., 1986. 120 p.

26. *Oksman V.S., Suzdalova N.I., Kraev A.A.* Deformacionnie strukturi i dinamicheskie obstanovki formirovaniya porod Verhne-Indigirskogo raiona. Yakutsk: Izd-vo YNC SO RAN, 2005. 204 p.

27. *Kuznecov V.M.* Osobennosti stroeniya Sugoiskogo sinklinoria i ego pologenie v mezozoidah Severo-Vostoka SSSR // Tihookeanskaya geologia. 1983. No. 2. P. 105–109.

28. *Natapov L.M., Shulgina V.S.* Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:1000000 (novaya seria). List Q-56,57. Srednekolimsk. Obyasnitelnyaya zapiska. L., 1991. 111 p.

29. *Indolev K.N.* Daiki rudnih raionov Vostochnoi Yakutii. M.: Nauka, 1979. 196 p.

30. *Osipova Z.V.* Litologia verkhejurskogo peschanikovogo kompleksa Kondakovskogo ploskogoria // Novye dannye po metallogenii i geologicheskomy stroeniju Yano-Kolymskogo mezhdurechia. L., 1972. P. 43–50.

31. *Natapov L.M., Surmilova E.P.* Geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1:1000000 (novaya seria). List R-53-(55) Deputatskiy. Obyasnitelnyaya zapiska. SPb., 1992. 105 p.

32. *Mitchell A.H.G., Reding H.G.* Osadkonakoplenie i tektonika // Obstanovki osadkonakopleniya i facii. Vol. 2. M.: Mir, 1990. P. 227–283.

33. *Kuznecov V.M.* Verhnepaleozoiskie otlogeniya vostochnogo krila Prikolimskogo podnyatia // Materialy po geol. i polezn. iskop. Severo-Vostoka SSSR. Magadan: Kn. izd-vo. 1980. Iss. 25. P. 3–9.

34. *Bulgakova M.D., Kolodeznikov I.I.* Srednepaleozoiski riptogenezy na Severo-Vostoke SSSR: osadkonakoplenie i vulkanizm. M.: Nauka, 1990. 256 p.

35. *Natapov L.M., Zonenshain L.P., Shulgina V.S., Surmilova E.P., Degtyarev V.S., Savosina A.K., Artemov A.V., Kats A.G., Stavsky A.P.* Geologicheskoe razvitiye Kolyimo-Indigirskogo regiona i problema Kolymskogo massiva // Geotektonika. 1977. No. 4. P. 18–31.

36. *Ingersoll R.V.* Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature // Tectonics of sedimentary basins: Recent Advances. / Edited by Cathy Busby and Antonio Azor. Blackwell Publishing Ltd, 2012. P. 3–43.

37. *Konstantinovskiy A.A.* Drevnye glibi v jurskikh otlogeniakh khrebta Chersky (Severo-Vostok SSSR) // Geotektonika. 1975. No. 6. P. 61–67.

38. *Terehov M.I., Dilevskiy E.F.* Geologia hrebta Arga-Tas. Preprint. Magadan: SVNKII DVO AN SSSR, 1988. 49 p.

39. *Arhipov J.V., Agafonov G.E., Sonin G.S.* Olisostromi Ulahan-Tasskogo gorst-antiklinoria // Bull. nauchn.-tehn. informatsii. Voprosi regionalnoi i neftynoi geology Yakutia. YF SO AN SSSR. Yakutsk, 1980. P. 17–20.

40. *Gedko M.I.* Uyundino-Yasachnenskaya pozdnejrs-kaya ostrovnaya duga (severo-vostok SSSR) // Geotektonika. 1988. No. 3. P. 88–100.

41. *Surnin A.A.* Pozdnejrskie ultrasnovnye i osnovnye kompleksi Kolymskogo massiva. Novosibirsk: Nauka, 1990. 160 p.

42. *Dilevskiy E.F.* Zonalnost Uyundino-Yasachnenskogo vulkanicheskogo poyasa i ego tektonicheskaya priroda // Geotektonika. 1994. No. 4. P. 52–62.

Ф.Ф. ТРЕТЬЯКОВ

43. Akinin V.V., Prokopiev A.V., Toro H., Miller E.K., Wuden Dg., Gorychev N.A., Alshevsky A.V., Bakharev A.G., Trunilina V.A. U-PB SHRIMP-vozrast granitoidov Glavno-
go batolitovogo poysa (SeveroVostok Asia) // Dokl. RAN. 2009. Vol. 426, No. 2. P. 216–221.

Submitted 25.02.2022

Revised 24.03.2022

Accepted 14.04.2022

About the author

TRETYAKOV, Felix Filaretovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-3911-2491>, e-mail: tretyakov_ff@mail.ru

For citation

Tretyakov F.F. Tectonics of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoid system (Eastern Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 181–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-181-194>

Роль фоскоритов в минерагии Томторского рудного поля

Л.Н. Баранов^{1,*}, А.В. Толстов^{2,**}

¹НАЦ ВГРЭ АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

²ИГАБМ СО РАН, Якутск, Россия

*Baranovln@alrosa.ru

**Tols61@mail.ru

Аннотация. Массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) Томтор, расположенный на северо-востоке Сибирской платформы, является одним из крупнейших в мире, с которым связано одноименное уникальное месторождение Nb и REE с колоссальными ресурсами. В его пределах выявлено месторождение апатит-магнетитовых руд (фоскоритов) Онкучах, с ресурсами суммарного железа – более 1 млрд т и P_2O_5 – около 500 млн т при высоких концентрациях в них REE. Томтор – важный экономический и стратегический объект, один из ключевых при освоении Российской Арктики. В настоящей работе показан вклад фоскоритов в минерагию уникального оруденения, для чего приведена геолого-геохимическая характеристика карбонатитового комплекса и фоскоритов, методами РФА и ИСП АЭС изучен их состав в сравнении с карбонатитовым комплексом и горизонтами латеритной коры выветривания, образующими оруденение. Общепризнанное мнение, что месторождение сформировалось при выветривании рудных карбонатитов дополнено убедительными фактами, доказывающими весомое участие фоскоритов в образовании Nb–REE-оруденения в гипергенном комплексе.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Томтор, карбонатит, фоскорит, кора выветривания, ниобий, редкие земли

Введение

Массив ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (УЩК) Томтор площадью 250 км², расположенный на северо-востоке Сибирской платформы, обнаружен в 1958–1959 гг. при геологической съемке масштаба 1:200 000. В 1964 г. появились первые сведения в научной литературе [1]. В 1970-е гг. силами НИИГА на массиве проведены общие поиски, в ходе которых установлено уникальное фосфорно-редкометалльное оруденение в карбонатитах и их корах выветривания. В начале 1980-х гг. сотрудниками НИИГА (г. Ленинград) была выполнена первая экономическая оценка [2]. Позже, в 1990-е гг. при поисково-оценочных работах в пределах массива выявлены три участка эпигенетически измененных ниобий-редкоземельных руд: Южный, Буранный и Северный [3, 4]. В результате разведочных работ в 1999 г. установлено ниобий-редкоземельное Томторское месторождение, которое по ресурсам Nb и REE и их концентрациям превосходит известные аналоги и является уникальным [4]. Основные полезные компоненты руд, связанные с массивом Томтор: REE, нио-

бий, иттрий, скандий. Попутные компоненты: титан, ванадий, алюминий, фосфор, цирконий, стронций, уран, торий. Концентрации Nb₂O₅ в богатых рудах месторождения 4,5 % (максимальные – 24 %), что значительно превышает содержания в рудах бразильского месторождения Араша [5, 6]. Содержания REE сопоставимы с мировыми аналогами редкоземельных месторождений (в среднем в рудах 7–10 %, достигая участками 40 %). Руды отличаются высоким содержанием Y₂O₃ (до 2,5 %, в среднем – 0,75 %) и Sc₂O₃ (до 0,16 %, в среднем – 0,06 %) [8]. Изучению Томтора посвящено множество работ [3, 4, 8–18; и др.], однако, принимая во внимание высокую стратегическую и экономическую значимость массива, а также в связи с неизбежным освоением Арктики, изучение минерагии массива весьма актуально по настоящее время. Целью работы является определение вклада апатит-магнетитовых пород (фоскоритов) в минерагию массива Томтор.

Материалы и методы исследования

Фактическим материалом исследований послужил керн скважины № 801 (177 пог. м, место-

рождение Онкучах), пробуренной в 2015 г., а также результаты многолетних исследований карбонатитов и образований гипергенного комплекса, полученные авторами.

Химический состав пород определен методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС). Анализ проводился на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP по методике, используемой в ЦКП, научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН, аналитик – Карманова Н.Г. Анализ проб и препаратов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭС) выполнен авторами на базе лаборатории рентгеновских и спектральных методов НИГП АК (ПАО) «АЛРОСА», г. Мирный. Использовалась методика БГРЭ-МП5мод (III категория точности). Измерения проводились на приборе iCAP 6300Duo, производитель Thermo Scientific (США).

Результаты исследования

Томторский массив входит в состав Уджинской провинции ультраосновных щелочных пород и карбонатитов, приуроченной к одноименному поднятию на северо-востоке Сибирской платформы, в восточной части Анабарской антеклизы. По генезису это вулканоплутонический комплекс концентрически-зонального строения: внешнее кольцо сложено щелочными и нефелиновыми сиенитами, внутреннее неполное кольцо, обрамляющее карбонатитовое ядро с востока и запада, представлено породами семейства фойдитов. На территории массива, к С-В от карбонатитового ядра (Р–Fe-месторождение Онкучах) в пределах карбонатитового ядра (уч. Южный, уч. Буранный) установлены проявления апатит-магнетитовых пород (фоскоритов, камафоритов, нельсонитов) [2, 9, 19]. По карбонатитам массива развиты коры выветривания, мощность которых, в зависимости от субстрата, может достигать 400 м. Породы массива традиционно разделялись на карбонатитовый и силикатный комплексы, при этом фоскориты были отнесены к карбонатитовому [2].

Собственно, месторождение Nb и REE, включающее участки Южный, Буранный и Северный, представлено переотложенными эпигенетически измененными корами выветривания, выполняющими мульдообразные впадины в пределах кар-

бонатитового ядра. В гипергенном комплексе, связанном с карбонатитами, выделяются четыре горизонта (сверху вниз): каолинит-крандаллитовый, сидеритовый, гетитовый и франколитовый [7]. Образование впадин вызвано неравномерной усадкой коры при формировании [3], соответственно, субстратом богатых руд является латеритная кора выветривания. Рудоносные коры, согласно последним представлениям, сформированы исключительно по карбонатитам, однако, по нашим данным, карбонатиты были не единственным источником их формирования.

Карбонатитовое ядро массива представлено совокупностью полиминеральных рудных и безрудных карбонатитов (рис. 1). Породы безрудной группы, занимающие более 20 км², слагают западную часть ядра массива. В пределах их распространения, на границе силикатного комплекса и карбонатитового ядра широко распространены кальцит-микроклин-слюдистые породы, преобразованные карбонатитовым расплавом (флогопит, биотит – 5–55 и серицит – 2–30 %), хлорит (2–45), микроклин (5–35), эгирин (5–20), кальцит (5–30), доломит (или реже анкерит – 1–15), рутил или анатаз (2–5), магнетит (1–5), гематит (1–4), апатит (1–5 %). По нашему мнению, наиболее вероятно, данные образования являются щелочными апосиенитами. Карбонатиты безрудной группы (кальцитовые и доломит-кальцитовые) слагают субмеридиональную полосу шириной до 1 км к востоку от кальцит-микроклин-слюдистых пород. С востока, северо-востока и юга эти породы граничат с карбонатитами рудной стадии.

Образования рудной группы подразделяются на фосфорно-редкометалльную и редкометалльную подгруппы. Основой разделения является содержание минералов группы апатита, анкерита и рудных минералов в исходных породах, что, в конечном счете, обуславливает их различное поведение в последующем гипергенном процессе. На границе рудных карбонатитов с силикатным комплексом распространены апатит-микроклин-слюдистые породы, окаймляющие карбонатитовое ядро полукольцевой полосой шириной до 2 км в северной, восточной и южной частях. По минеральному составу и внешнему облику среди них выделяются три подтипа: собственно апатит-микроклин-слюдистые породы, собственно микроклиновые породы и слюдиты. В их состав входят биотит (20–50 %), хлорит (5–30), серицит (5–30), микроклин (20–30), апатит (5–

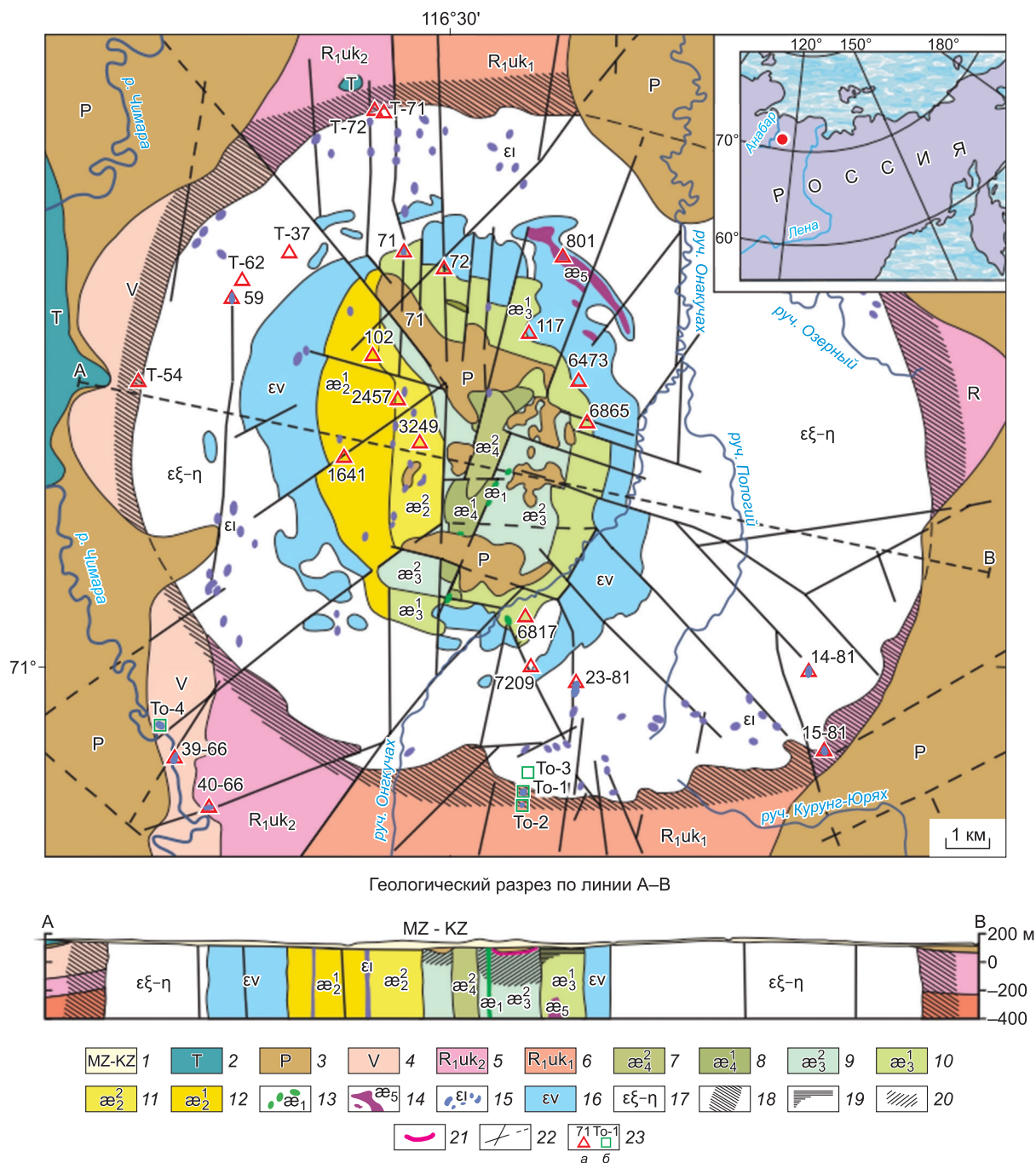


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Томторского массива. Построена на основе геологической карты доюрских образований массива Томтор по [3, 20]: 1–6 – вмещающие породы; 7–13 – карбонатитовый комплекс: 7–10, 13 – рудная группа, 11, 12 – безрудная группа; 14 – фоскориты; 15 – альеиты, щелочные пикриты; 16 – фойдолиты; 17 – щелочные и нефелиновые сиениты; 18 – зоны мраморизации и скарнирования; 19–21 – гипергенный комплекс; 22 – тектонические нарушения; 23 – места отбора образцов.

Fig. 1. Schematic geological map of the Tomtor massif on the basis of the geological map of pre-Jurassic formations of the Tomtor massif according to [3, 20]: 1–6 – host rocks; 7–13 – carbonatite complex: 7–10, 13 – ore group; 11, 12 – oreless group; 14 – phoscorites; 15 – alneites, alkaline picrites; 16 – foidolites; 17 – alkaline and nepheline syenites; 18 – zones of marbling and skarning; 19–21 – supergene complex; 22 – tectonic disturbances; 23 – sampling sites.

20), кальцит (5–20), анкерит (5–20). Подтипы тесно и незакономерно перемежаются с постепен-

ными взаимопереходами. Аналогично кальцит-микроклин-слюдистым породам апатит-микро-

клин-слюдистые образования являются результатом преобразования щелочных пород силикатного комплекса (вероятно, фойдолитов) карбонатитовым расплавом.

Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (кальцитовые и поликарбонатные) занимают центральный и восточный секторы внутренней карбонатитовой части ядра, образуя серповидную в плане полосу. На востоке, юге и севере они граничат с апатит-микроклин-слюдистыми породами, на западе – с карбонатитами безрудной группы. Общая площадь их составляет около 10 км². От безрудных карбонатитов отличаются главным образом повышенными содержаниями P_2O_5 и Nb_2O_5 (см. таблицу).

Апатит-магнетитовые породы (фоскориты) (рис. 2, 1) массива Томтор представлены двумя разновидностями. Первая – апатит-магнетит-пироксен-оливинового состава с вкрапленным и прожилково-вкрапленным оруденением. Они слагают преимущественно небольшие крутопадающие штоки, штокообразные тела, маломощные дайки, жилы или брекчированные зоны, обломки которых имеют различный петрографический состав, в зависимости от преобладания одного из главных минералов. Мощность образуемых ими тел не превышает 1–2 м [2]. Вторая разновидность фоскоритов представлена апатит-магнетитовыми рудами, слагающими рудные тела месторождения Онкучах в северо-восточной части массива [2]. Площадь распространения оценивается как блок длиной 3,5 км и шириной 75–100 м. Руды представлены серией жильно-линзовидных тел, падающих под углом 75–80° к центру массива. Мощность их достигает 10–30 м при протяженности до 3 км. Блоки массивных магнетитовых руд чередуются с блоками прожилково-вкрапленных руд, породами якупирангит-ийолитовой серии и карбонатитами. Окисленные апатит-магнетитовые руды данной разновидности встречены на участке Южный при оценочных работах [2, 7].

Среди изученных интервалов фоскоритов выделяются отдельные участки с преобладанием одного из главных петрогенных минералов (до практически полной мономинеральности участка породы) – магнетита, апатита, биотита или кальцита [19].

Гипергенный комплекс массива Томтор включает линейную, площадную, плащевую и латеритную коры выветривания. Месторождение Томтор приурочено к латеритной коре выветри-

вания, которая в пределах массива Томтор сложена специфическими образованиями, в значительной мере сходными с большинством типичных латеритных кор выветривания карбонатитовых массивов, достаточно полно охарактеризованных в отечественной литературе [21, 22]. Важным отличием томторской коры выветривания является наличие признаков перемыыва и переотложения гипергенного материала. В латеритной коре в пределах карбонатитового комплекса выделяются четыре горизонта (сверху вниз): каолинит-крандаллитовый, сидеритовый, гетитовый и франколитовый.

Каолинит-крандаллитовый горизонт залегает на разнообразных отложениях латеритной коры выветривания в пределах впадин и сложен слоистыми, горизонтально-слоистыми, косослоистыми, волнисто-слоистыми пелитовыми, алевроитовыми, редко песчаными породами различной окраски. Мощность отдельных слойков от долей миллиметра до 1 см, редко более. Изредка текстура пород массивная, еще реже они имеют дресвяно-щебнистую структуру. Уникальный набор рудных минералов: монацит, пироксор, рутил, группа крандаллита (флоренсит, гоэит и горсейксит), выступающих, как правило, в ранге «породообразующих», обуславливающих чрезвычайно богатые содержания REE, выделяет этот горизонт как «рудный пласт».

Сидеритовый горизонт развит повсеместно, за редким исключением, где он, вероятно, эродирован. Породы сидеритового горизонта преимущественно представляют собой светло-серые, пепельно-серые, буровато-серые, рыхлые, комковатые, зернистые массы однородной нечетко полосчатой, пятнистой текстуры. Наличие в составе пород лимонита окрашивает их в бурый тон. В переходных разностях к гидрослюдыстым разностям они приобретают зеленоватую окраску за счет хлоритов и гидрослюды, унаследованных, очевидно, от исходных пород.

Гетитовый и франколитовый горизонты сложены рыжими, красновато-бурыми, кирпично-красными, табачно-желтыми и желтоватыми окристыми образованиями, от рыхлых до весьма крепких, от слоистых до массивных и брекчиевидных, встречающихся совместно (рис. 2, 5).

Гетитовый горизонт отличается наиболее простым строением, при котором гетит и франколит слагают свыше 70 % объема горизонта при явном преобладании первого. Франколитовый горизонт сложен более чем наполовину породами

РОЛЬ ФОСКОРИТОВ В МИНЕРАГЕНИИ ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Химические составы пород массива Томтор (мас.%)*

Chemical compositions of the rocks from the Tomtor massif (wt.%)*

Породы, количество анализов Rocks, number of analyses	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^{tot}	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	LOI	Σ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Кальцит-микроклин-слюдистая порода (n = 87) Calcite-microcline-micaceous rock	29,39	3,04	8,20	12,68	0,76	6,24	13,28	6,46	0,28	2,59	0,05	13,95	96,92
Апатит-микроклин-слюдистая порода (n = 143) Apatite-microcline-micaceous rock	28,24	3,43	9,58	19,43	1,41	5,44	9,30	5,08	0,21	5,58	0,18	5,71	93,59
Карбонатиты безрудные (n = 55) Oreless carbonatites	7,89	0,77	2,08	7,57	1,32	6,17	35,08	1,06	0,16	1,62	0,09	33,62	97,43
Карбонатиты фосфорно-редкометалльные (n = 194) Phosphorus-rare metal carbonatites	6,10	0,47	1,17	7,00	1,26	4,17	39,22	0,90	0,17	3,87	0,21	32,43	96,97
Карбонатиты редкометалльные (n = 37) Rare metal carbonatites	9,90	1,54	2,00	11,94	3,20	8,75	24,22	2,08	0,17	1,13	0,19	27,71	92,83
Фоскориты (n = 36) Phoscorites	23,59	2,63	9,22	19,52	0,56	5,10	16,36	3,90	1,14	4,08	0,03	He опр.	86,12
Магнетитовые руды фоскоритов (n = 6) Magnetite ores of phoscorites	14,92	4,48	6,11	51,23	0,92	4,99	2,98	2,81	0,28	0,65	0,08	He опр.	89,45
Апатитовые руды фоскоритов (n = 4) Apatite ores of phoscorites	5,19	0,25	1,53	3,01	0,43	1,50	47,03	1,04	0,26	25,03	0,01	He опр.	85,27
Сидеритовый горизонт (n = 260) Siderite horizon	9,89	2,75	6,06	38,36	2,76	1,19	3,69	0,51	0,11	4,90	0,70	17,83	88,75
Гетитовый горизонт (n = 125) Goethite horizon	6,73	1,85	2,89	51,43	5,37	0,97	4,74	0,25	0,13	4,21	0,84	8,99	88,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Франколит-гетитовый горизонт ($n = 113$) Francolite-goethite horizon	10,87	1,26	1,89	28,02	2,99	1,19	23,73	0,49	0,25	16,26	0,73	5,52	93,20

* Химические анализы выполнены в ГУП ЦГАЛ, г. Якутск, аналитики Л. Холодова, Т. Забуга и в НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, аналитик Т.В. Степанова. Низкие суммы объясняются недоопределением летучих компонентов, а также высоким содержанием рассеянных элементов, не представленных в таблице.

* Chemical analyses were performed at the State Unitary Enterprise TsGAL, Yakutsk by assayer L. Kholodova, T. Zabuga, and Research and Production Institute of PJSC ALROSA (PJSC), Mirny by assayer T. Stepanova. The low amounts are explained by the underdetermination of volatile components, and high content of trace elements not presented in the table.

смешанного (силикатно-фосфатного) состава, доля собственно франколитовых пород составляет, как правило, более 40–80 %, иногда дости-

гая 90 % объема горизонта [7]. Визуально выделение франколитового и гетитового горизонтов весьма затруднительно и возможно лишь по результатам геофизических исследований скважин, а более уверенно – по химическому анализу, поэтому здесь они рассматриваются нами в едином гетит-франколитовом горизонте.

Образования гетит-франколитового горизонта распространены локально на восточном фланге Северного участка на глубинах от 100 м и ниже (скв. 603, 414, 242). На Южном участке они распространены более широко: глубины их залегания варьируют от 30 до 200 м и более. При этом немаловажно отметить, что породы данного горизонта залегают локально на различных уровнях коры выветривания и в пределах изученных участков не имеют площадного развития, как, например, образования гидрослюдистого и сидеритового горизонтов. Более того, на участках распространения пород франколитового горизонта зачастую наблюдаются брекчирование, катаклаз и милонитизация, крутопадающий кливаж, что свидетельствует о значительных тектонических и усадочных процессах при их формировании.

При выполнении исследований проведен анализ распределения REE в фоскоритах и в карбонатитовом комплексе (по данным авторов) и в гипергенных образованиях (по [7, 12]).

Сравнение редкоземельных спектров перетолженных (эпигенетически измененных) кор выветривания, на примере руд участка Буранный, с фоскоритами и рудными карбонатитами массива Томтор не позволяет считать, что коры сформированы исключительно по единственному субстрату (рис. 3, а). Содержания редкозе-

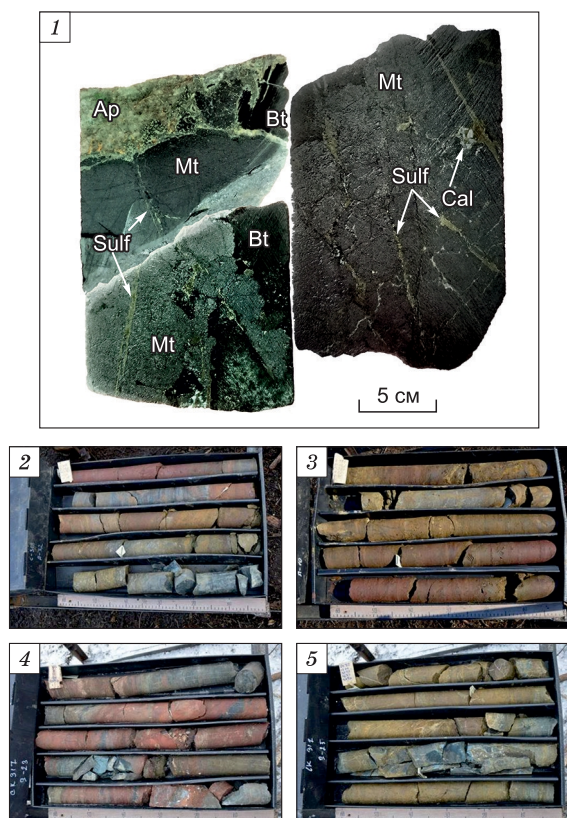


Рис. 2. Образцы апатит-магнетитовых пород (1) и гетит-франколитового горизонта уч. Южный (2–5): 2 – скв. 308 (инт. 98–101 м), 3 – скв. 338 (инт. 32–35 м), 4 – скв. 317 (инт. 68–71 м), 5 – скв. 317 (инт. 74–77 м).

Fig. 2. Samples of apatite-magnetite rocks (1) and goethite-francolite horizon at the Yuzhny site (2–5): 2 – well 308 (int. 98–101 m), 3 – well 338 (int. 32–35 m), 4 – well 317 (int. 68–71 m), 5 – well 317 (int. 74–77 m).

мельных элементов в рудах участка Буранный образуют наклонный спектр с повышенными концентрациями легких лантаноидов относительно тяжелых, без ярко выраженных аномалий. Фоскориты, ввиду наличия участков существенно различного минерального состава, образуют более широкую полосу. Наиболее интересны спектры апатитовых и карбонат-биотитовых участков фоскоритов.

Апатитовые участки имеют субгоризонтальное распределение редкоземельных элементов, с ярко выраженным минимумом по Се. При этом спектры содержаний тяжелых лантаноидов близки к таковым в рудах участка Буранный. Аналогичное распределение с минимумом по Се характерно и для рудных карбонатитов, однако содержание в них тяжелых лантаноидов на порядок ниже.

Карбонат-биотитовые участки фоскоритов характеризуются общими содержаниями REE на два порядка ниже, чем для собственно апатитовых руд, однако такие участки имеют выраженную положительную аномалию по Се. Таким образом, распределение содержаний REE указывает на то, что для получения концентраций, характерных для эпигенетически измененных переотложенных кор выветривания, в качестве субстрата должны были выступать не только рудные карбонатиты, но и фоскориты. Положительные и отрицательные аномалии по Се, в сочетании с низкими и высокими содержаниями La, соответственно, объясняются спецификой REE-минерализации, характерной для разных процессов рудообразования.

В отношении Y и Sc (см. рис. 3, а) каолинит-крандаллитовый горизонт показывает на их прямую зависимость по концентрациям (от 0,42 до 1,18 мас. % для Y и 0,02–0,12 Sc) с достаточно высокой видимой положительной корреляцией. Составы пород карбонатитового и гипергенного комплексов расположены в области содержаний $Y < 0,1$ % и $Sc < 0,01$ %. Исключением являются апатитовые руды фоскоритов, содержание итрия в которых может превышать 0,2 %.

Обсуждение

Предшественниками были выдвинуты различные генетические концепции образования уникально богатого оруденения. Кравченко С.М., Беяков А.Ю. и Покровский Б.Г. [15, 16] предполагали, что латеритные коры выветривания были сформированы по фоскоритам, прежде слагав-

шим центральное ядро массива Томтор, а уникально богатые руды образовались при гидротермальной переработке сформированного гипергенного комплекса с выносом и переотложением рудных элементов в верхнем горизонте, на контакте с перекрывающими осадочными отложениями [3, 8].

Вторая гипотеза разработана сотрудниками Института геологических наук СО РАН (г. Якутск) А.Р. Энтиным и О.А. Тяном, по мнению которых, уникально богатый верхний рудный горизонт представлен выветрелыми и нацело измененными рудоносными туфами поздних карбонатитов взрывной фации, отложившихся на дно раннепермского водоема [4, 7, 24].

Согласно третьей гипотезе, детально разработанной А.Д. Коноплевым (ВИМС), богатый рудный горизонт представлен делювиально-озерной россыпью ближнего переноса [8]. При этом породы, слагающие уникально богатый рудный горизонт, являются осадочными образованиями мелких озер и обрамляющих их склонов, сформировавшимися в результате действия терригенных и последующих хемогенных процессов при седиментации и эпигенезе за счет близко расположенной области питания, представленной латеритными корами выветривания карбонатитов.

Впоследствии было показано [7], что данные концепции по отдельности не могут в полной мере объяснить все особенности Nb–REE-оруденения Томторского рудного поля. Установлено, что в геолого-генетическом отношении эти руды связаны с корами выветривания рудоносных карбонатитов и по сути являются переотложенными (эпигенетически измененными) образованиями зоны гипергенеза [3]. Однако в работе по исследованию вещественного состава и генезиса руд месторождения Томтор [12] было доказано, что, с учетом широкой вариативности химических составов, данные образования не могли формироваться из единого источника.

На существенное участие апатит-магнетитовых руд в формировании франколит-гетитового горизонта указывает ряд характерных особенностей:

- 1) локальное распространение геологических тел, сопровождающихся тектоническими нарушениями;
- 2) аналогичный вещественный состав – как химический (см. таблицу), так и минералогический, с учетом гипергенных преобразований;

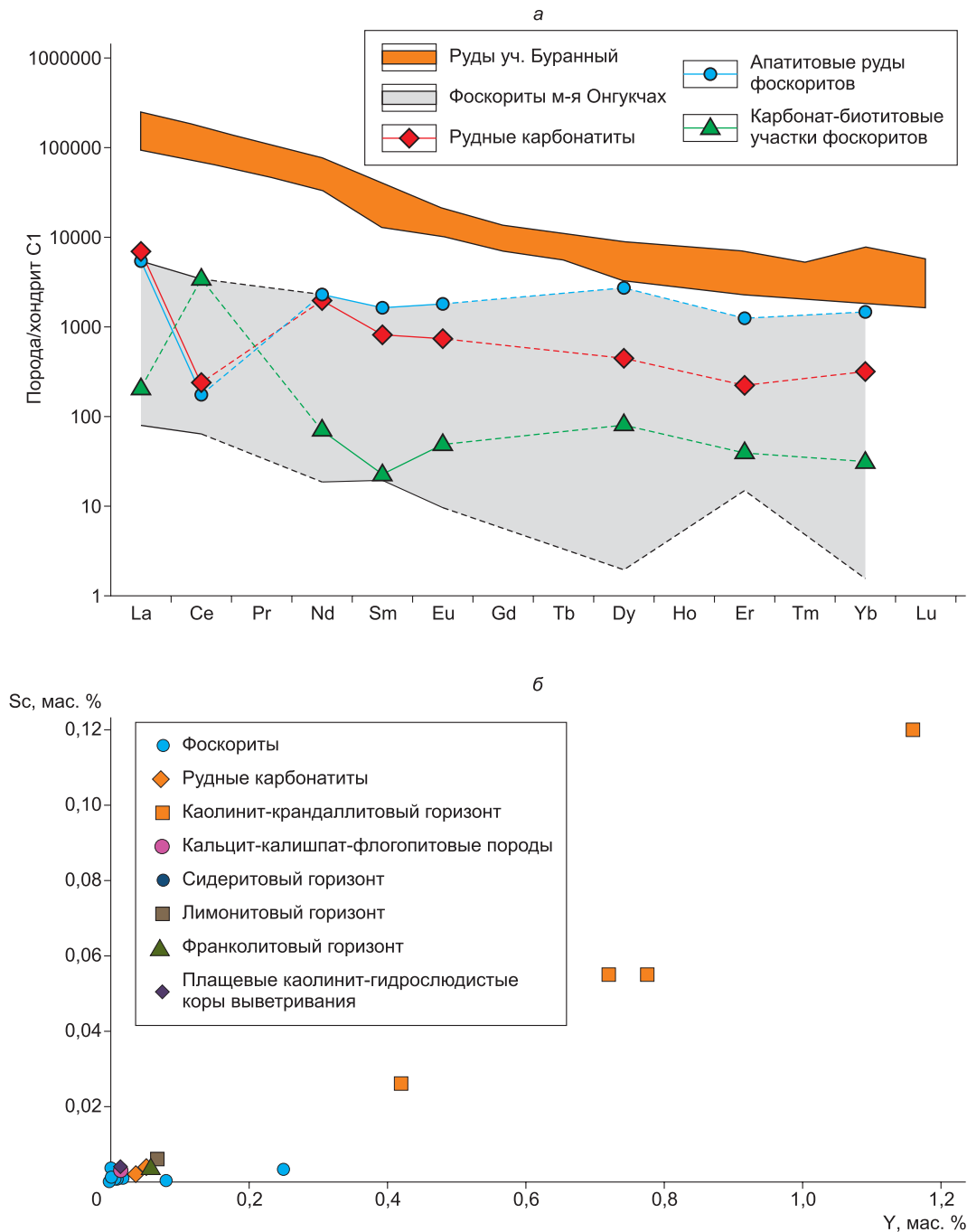


Рис. 3. Редкоземельные спектры комплексных редкометалльных руд участка Буранный, рудных карбонатитов и фоскоритов. Нормирование по [23] (а). Вариационная диаграмма в координатах Sc–Y (мас. %) для фоскоритов, карбонатитового и гипергенного комплексов (б).

Fig. 3. Rare earth spectra of complex rare metal ores at the Buranny site, ore carbonatites and phoscorites. Normalization according to [23] (a). Variation diagram in Sc–Y coordinates (wt %) for phoscorites, carbonatite and supergene complexes (b).

3) мономинеральные участки разного состава, ассоциирующие друг с другом в пределах одного рудного тела.

Таким образом, при формировании гипергенного комплекса массива Томтор за счет рудонос-

ных карбонатитов широкое участие принимали фоскориты. Рудные полиминеральные карбонатиты, являющиеся субстратом гипергенного комплекса, существенно отличаются от него по химическому составу и рудным компонентам. Осо-

бенно это касается баланса железа и фосфора, что подтверждает широкое участие фоскоритов, помимо рудоносных карбонатитов, в его формировании. В свою очередь, гипергенный комплекс латеритной коры выветривания послужил исходным материалом и субстратом уникально богатых руд – переотложенной эпигенетически измененной коры выветривания (каолинит-крандаллитового горизонта).

Заключение

Новые данные по сравнительной минералогическо-геохимической характеристике горизонтов коры выветривания Томторского месторождения и апатит-магнетитовых пород (фоскоритов) свидетельствуют, что рудные коры выветривания сформированы при совместном участии рудных полиминеральных карбонатитов и существенном вкладе фоскоритов, однако его количественная оценка требует дополнительных исследований.

Литература

1. Эрлих Э.Н. Новая провинция щелочных пород на северо-востоке Сибирской платформы // Зап. ВМО. 1964. Т. 90, вып. 6. С. 682–693.
2. Толстов А.В. Особенности минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор (Северо-Западная Якутия) // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 9. С. 91–100.
3. Лапин А.В., Толстов А.В. Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудных месторождений. 1991. Т. 33, № 4. С. 81–91.
4. Толстов А. В., Гунин А. П. Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2001. Т. 11. С. 144–160.
5. Cordeiro P.F.D.O., Brod J.A., Palmieri M., De Oliveira C.G., Barbosa E.S.R., Santos R.V., Assis L.C. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: resources, geology and pyrochlore chemistry // Ore Geol. Rev. 2011. Vol. 41, No. 1. P. 112–121.
6. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л., Толстов А.В., Щербов Б.Л., Карманов Н.С., Герасимов Е.Ю., Брянская А.В. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 6. С. 1080–1115.
7. Толстов А.В. Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. М.: ИМГРЭ, 2006. 212 с.
8. Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелустов 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. Сб. науч. тр. М.: ВИМС, 1995. С. 223–241.
9. Слепцов А.П., Толстов А.В., Баранов Л.Н. Новый взгляд на полезные ископаемые Томторского рудного поля // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. М-лы VI Всерос. науч.-практ. конф. Якутск. 2016. С. 271–275.
10. Delitsyn L.M., Melent'ev G.B., Batenin V.M., Tolstov A.V. Coexistence of two immiscible liquid phases in a niobium-rareearth element-silicate-salt system // Doklady Chemistry. 2015. Vol. 462, No. 2. P. 165–168.
11. Слепцов А.П., Толстов А.В., Томашев А.В., Самсонов Н.Ю., Баранов Л.Н. Новое в методике подсчета запасов многокомпонентных руд (на примере Томторского рудного поля) // Разведка и охрана недр. 2019. № 6. С. 38–46.
12. Лапин А.В., Толстов А.В., Куликова И.М. Особенности распределения лантаноидов, иттрия, скандия и тория в уникальных комплексных редкометалльных рудах месторождения Томтор // Геохимия. 2016. № 12. С. 1104–1121.
13. Skublov S.G., Tolstov A.V., Baranov L.N., Melnik A.E., Levashova E.V. First data on the geochemistry and U-Pb age of zircons from the kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // Geochemistry. 2020. Vol. 89, No. 3. P. 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>
14. Кравченко С.М., Беляков А.Ю., Покровский Б.Г. Геохимия и генезис Томторского массива (север Сибирской платформы) // Докл. РАН. 1992. Т. 322, № 5. С. 966–972.
15. Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // Econ. Geol. 1995. Vol. 71 (7). P. 676–689.
16. Энштейн Е.М., Данильченко Н.А., Постников С.А. Геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) // Геология рудных месторождений. 1994. Т. 36, № 2. С. 83–110.
17. Багдасаров Ю.А. Геохимические особенности карбонатитов и сопровождающих их силикатных пород щелочно-карбонатитового массива Томтор (Восточное Прианбарье, Якутия) // Геохимия. 1997. № 1. С. 10–20.
18. Владыкин Н.В., Котов А.Б., Борисенко А.С. и др. Возрастные рубежи формирования щелочно-ультраосновного массива Томтор: результаты геохронологических U-Pb и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ исследований // Докл. РАН. 2014. Т. 454, № 2. С. 195–199.
19. Баранов Л.Н., Толстов А.В., Округин А.В., Слепцов А.П. Баранов Л.Н. Новое в минералогии и геохимии апатит-магнетитовых руд массива Томтор, Северо-Восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 42–54.
20. Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н. Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных-щелочных пород и карбонати-

тов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24, № 4.

21. Лапин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. М.: Наука, 1995. 208 с.

22. Толстов А.В., Черенков В.Г., Баранов Л.Н. Генезис и возраст рудной толщи Томторского месторождения ниобия и редких земель, Северо-восток Сибирской платформы // Руды и металлы. 2020. № 4. С. 32–44.

23. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical geology. 1995. Vol. 120, No. 3-4. P. 223–253.

24. Энтин А.Р., Зайцев А.И., Ненашев Н.И., Василенко В.Б., Орлов А.И., Тянь О.А., Ольховик Ю.А., Ольштынский С.И., Толстов А.В. О последовательности геологических событий, связанных с внедрением Томторского массива ультраосновных щелочных пород и карбонатитов (Северо-западная Якутия) // Геология и геофизика. 1990. Т. 31, № 12. С. 42–51.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Поступила после рецензирования 22.04.2022

Принята к публикации 29.04.2022

Об авторах

БАРАНОВ Леонид Николаевич, научный сотрудник, Научный аналитический центр, Вилуйская геологоразведочная экспедиция, Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 678174, Мирный, ул. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, e-mail: BaranovLN@alrosa.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик АН РС(Я), главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: Tols61@mail.ru

Для цитирования

Баранов Л.Н., Толстов А.В. Роль фоскоритов в минерации Томторского рудного поля // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 195–206. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206

The role of phoscorites in the minerageny of the Tomtor ore field

L.N. Baranov^{1,*}, A.V. Tolstov^{2,**}

¹NAC VGRE PJSC «ALROSA», Mirny, Russia

²Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

*Baranovln@alrosa.ru

**Tols61@mail.ru

Abstract. The Tomtor massif of ultrabasic alkaline rocks and carbonatites (UAC) is located in the north-east of the Siberian Platform. The massif is one of the largest UAC in the world and is associated with the unique deposit Tomtor with colossal resources of Nb and REE. Moreover, the Ongkuchakh deposit with apatite-magnetite ores (phoscorites) is located within the massif. The deposit contains more than 1 billion tons of iron in total and about 500 million tons of P_2O_5 with high concentrations of REE. The Tomtor massif represents an important economic and strategic facility for the development of the Russian Arctic. In this paper we demonstrate the contribution of phoscorites to the minerageny of the unique mineralization. We have provided geological and geochemical characteristics of the carbonatite complex and phoscorites. XFA and ICP AES methods were used to study their compositions in comparison with the carbonatite com-

plex and horizons of the lateritic weathering crust that form the mineralization. The generally accepted opinion that the deposit was formed during the weathering of ore carbonatites is supported by the convincing facts proving the significant participation of phoscorites in the formation of Nb-REE mineralization in the supergene complex.

Keywords: Siberian Platform, Tomtor, carbonatite, phoscorite, weathering crust, niobium, rare earths

References

1. Erlich E.N. The new province of alkali rocks on the north of Siberian platform and its geological aspects // *Zapisky Vsesoiuznogo Mineralogicheskogo Obshestva*. 1964. Vol. 93. P. 682–693 (in Russian).
2. Tolstov A.V. Mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor Massif (Northwestern Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 1994. Vol. 35, No. 9. P. 76–84.
3. Lapin A.V., Tolstov A.V. The oxidation and reduction stages of formation of the supergene zone of carbonatite and its ore-bearing // *Geol. Ore Deposits*, 1991. No. 4. P. 81–91 (in Russian).
4. Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive assessment of the Tomtorskoye deposit // *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*. 2001. No. 11. P. 144–160 (in Russian).
5. Cordeiro P.F.D.O., Brod J.A., Palmieri M., De Oliveira C.G., Barbosa E.S.R., Santos R.V., Assis L.C. The Catalão I niobium deposit, central Brazil: resources, geology and pyrochlore chemistry // *Ore Geol. Rev.* 2011. Vol. 41, No. 1. P. 112–121.
6. Lazareva E.V. et al. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia) // *Russian geology and geophysics*. 2015. Vol. 56, No. 6. P. 844–873.
7. Tolstov A.V. The main ore formations of the North of the Siberian platform. M.: IMGRE, 2006. 212 p.
8. Konoplev A.D., Tolstov A.V., Vasiliev A.T., Nejablubov G.N., Kuzmin V.I., Sklyadneva V.M., Dubinchuk V.T., Konopleva E.V., Sidorenko G. BUT. Features of localization of rare-metal mineralization at the Tomtor deposit // *Rare-metal-uranium ore formation in sedimentary rocks. Sat. scientific tr. M.: VIMS*, 1995. P. 223–241.
9. Sleptsov A.P., Tolstov A.V., Baranov L.N. A new look at the minerals of the Tomtor ore field // *Geology and mineral resources of the North-East of Russia. M-ly VI Vseros. Scientific-practical. conf. Yakutsk*, 2016. P. 271–275.
10. Delitsyn L.M., Melent'ev G.B., Batenin V.M., Tolstov A.V. Coexistence of two immiscible liquid phases in a niobium-rareearth element-silicate-salt system // *Doklady Chemistry*. 2015. Vol. 462, No. 2. P. 165–168.
11. Sleptsov A.P., Tolstov A.V., Tomashev A.V., Samsonov N.Y., Baranov L.N. New in the methodology for calculating the reserves of multicomponent ores (on the example of the Tomtor ore field) // *Exploration and protection of mineral resources*. 2019. No. 6. P. 38–46 (in Russian).
12. Lapin A.V., Tolstov A.V., Kulikova I.M. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit // *Geochemistry International*. 2016. Vol. 54, No. 12. P. 1061–1078.
13. Skublov S.G., Tolstov A.V., Baranov L.N., Melnik A.E., Levashova E.V. First data on the geochemistry and U-Pb age of zircons from the kamaphorites of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif, Arctic Yakutia // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80, No. 3. P. 125505. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.001>
14. Kravchenko S.M., Belyakov A.Y., Pokrovsky B.G. Geochemistry and Genesis of the Tomtor Massif (Northern Siberian Platform) // *Dokl. RAN*. 1992. Vol. 32, No. 5. P. 966–972 (in Russian).
15. Kravchenko S.M., Pokrovsky B.G. The Tomtor alkaline ultrabasic massif and related REE-Nb deposits, northern Siberia // *Econ. Geol.* 1995. Vol. 71 (7). P. 676–689.
16. Epstein E.M., Danilchenko N.A., Postnikov S.A. Geology of the Tomtor Unique Deposit of Rare Metals (North of the Siberian Platform) // *Geology of Ore Deposits*. 1994. Vol. 36, No. 2. P. 83–110 (in Russian).
17. Bagdasarov Y.A. Geochemical features of carbonatites and accompanying silicate rocks of the Tomtor alkaline-carbonatite massif (Eastern Anabar region, Yakutia) // *Geochemistry*. 1997. No. 1. P. 10–20 (in Russian).
18. Vladykin N.V., Kotov A.B., Borisenko A.S. et al. Age boundaries of the formation of the Tomtor alkaline-ultrabasic massif: results of geochronological U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar studies // *Dokl. RAN*. 2014. Vol. 454, No. 2. P. 195–199.
19. Baranov L.N., Tolstov A.V., Okrugin A.V., Sleptsov A.P. New in the mineralogy and geochemistry of apatite-magnetite ores of the Tomtor massif, North-East of the Siberian platform // *Ores and metals*. 2018. No. 2. P. 42–54 (in Russian).
20. Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N. Petrochemical features of the association of ultrabasic-alkaline rocks and carbonatites of the Tomtor massif and interpretation of possible trends in their evolution // *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*. 2019. Vol. 24, No. 4 (in Russian).
21. Lapin A.V., Tolstov A.V. Deposits of weathering crusts of carbonatites. M.: Nauka, 1995. 208 p. (in Russian).
22. Tolstov A.V., Cherenkov V.G., Baranov L.N. Genesis and the age of the ore strata of the Tomtor deposit of niobium and rare earths, northeast of the Siberian platform // *Ores and metals*. 2020. No. 4. P. 32–44 (in Russian).
23. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chemical geology*. 1995. Vol. 120, No. 3-4. P. 223–253.

24. *Entin A.R., Zaitsev A.I., Nenashev N.I., Vasilenko V.B., Orlov A.I., Tyan O.A., Olkhovik Y.A., Olshtynsky S.I., Tolstov A.V.* On the sequence of geological events associated

with the emplacement of the Tomtor massif of ultramafic alkaline rocks and carbonatites (Northwestern Yakutia) // *Geology and Geophysics*. 1990. Vol. 31, No. 12. P. 42–51.

Submitted 30.03.2022

Revised 22.04.2022

Accepted 29.04.2022

About the authors

BARANOV, Leonid Nikolaevich, scientific researcher, Vilyuyskaya Geological Exploration Expedition Public Joint Stock Company «ALROSA», 39 Lenina st., Mirny 678174, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, e-mail: BaranovLN@alrosa.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilievich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), chief scientific researcher, Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: Tols61@mail.ru

For citation

Baranov L.N. Tolstov A.V. The role of phoscorites in the minerageny of the Tomtor ore field // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 195–206. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-195-206>

Вещественный состав и геолого-структурная позиция золотоносных гидротермально-метасоматических образований бассейна р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы)

Б.Б. Герасимов

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
Gerasimov@yandex.ru

Аннотация. Изучены минералогические особенности золотоносных гидротермально-метасоматических образований Анабарского района. Основным первичным субстратом для них являются трещиноватые приразломные доломиты анабарской свиты кембрийского возраста. Наряду с этим впервые в кернах разведочных скважин обнаружены гидротермалиты, развитые по слабоцементированным мелкогалечным кварцевым конгломератам раннепермского возраста. Выделено два типа метасоматических пород: кварц-калциспатовый и джаспероидный. Выявлено, что главными рудными минералами являются галенит и пирит с различными соотношениями по участкам. На участках «Биллях» и «Курунг Юрях» главным рудным минералом является вкрапленный галенит, а на участке «Средний Маят» – пирит. На участке «Истоки Маят», где изучены сульфидизированные породы с глубины более 25 м, основным рудным минералом служит пирит, который имеет прожилковый и сплошной характер развития. Золото выявлено в виде мелких выделений в карбонатном и кремнистом субстрате гидротермально-метасоматических образований на всех изученных участках. В качестве одного из ведущих благоприятных факторов для рудообразования установлен литологический фактор – наличие приразломных высокопроницаемых трещиноватых карбонатных и слабоцементированных терригенных горных пород. Структурный контроль изученных рудных проявлений определяется их локализацией в Маят-Догойском и Догой-Куойском разломах Молодо-Попигайской системы разрывных нарушений. Предполагается двухэтапное формирование золоторудных проявлений: в первый этап происходило образование рудного вещества в виде первичных гидротермально-осадочных руд в приразломных зонах. Второй этап связан с процессами мезозойской тектономагматической активизации, когда при внедрении базитовых даек происходила мобилизация рудного вещества и в результате кремнекалиевого метасоматоза кембрийских карбонатных и пермских терригенных пород в приразломной зоне образовались золотосульфидные проявления.

Ключевые слова: Анабарский рудно-россыпной район, гидротермально-метасоматические образования, калциспатизация, джаспероиды, рудная минерализация, зона разломов, рудное золото, сульфиды

Благодарности. Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и частично в рамках хоздоговорных работ с АО «Алмазы Анабара».

Введение

Бассейн р. Анабар относится к одноименному рудно-россыпному району, который расположен на северо-восточной части Сибирской платформы и относится к Лено-Анабарской полиминеральной россыпной субпровинции [1]. Проблема установления коренных источников весьма мелкого россыпного золота, широко распространенного на территории Анабарского района, до сих пор остается актуальной. Большинство исследователей связывали россыпную золотоносность исследуемой территории с докембрийскими кварцевыми и кварц-карбонатными жилами [2–4].

А.П. Смелов с соавторами [5] прогнозировали в Котуйканской и Билляхской зонах тектонического меланжа Анабарского щита месторождения Au, Cu, Mo, Ag медно-порфирового типа, связанных с массивами магматических пород диорит-гранодиорит-монцитонитовой натриево-калиевой и диорит-гранодиорит-гранитной калиевой формаций. З.С. Никифоровой с соавторами на основании изучения минералого-геохимических особенностей самородного золота было обосновано два основных этапа рудообразования для всего востока Сибирской платформы, в том числе и исследуемой территории – докембрийский

и мезозойский [6]. Однако, немногочисленные поисковые работы до последнего времени не привели к обнаружению коренных источников россыпей.

За последние годы в результате поисковых маршрутов нами обнаружены и изучены гидротермально-метасоматические образования с золотосульфидной минерализацией, локализованные в зонах разломов [7].

Методы и материалы исследования

Продолжаются работы по выявлению новых участков с золоторудными проявлениями исследуемого района. Были опробованы гидротермально измененные доломиты анабарской свиты среднего кембрия в плотике отработанной комплексной золото-алмазоносной россыпи реч. Курунг-Юрях и обнажения этих же доломитов в среднем течении реч. Маят. Кроме этого изучены керновые образцы с разведочных буровых

линий, пройденных в истоках реч. Маят (рис. 1). Результаты этих исследований приводятся в данном сообщении.

Поисковые маршруты проводились на участках искусственных (руслоотводные каналы, полигоны отработанных россыпей, площадки дорожных расчисток) и природных обнажений гидротермально измененных доломитов анабарской свиты среднего кембрия. Штуфы и образцы горных пород отбирались главным образом в зонах дробления, приуроченных к разрывным нарушениям. Вес штуфов составлял от 5 до 10 кг.

Отбор и описание керновых образцов производились на кернохранилище прииска «Маят» АО «Алмазы Анабара». Изучен керн из разведочных линий колонкового бурения, пройденных в водораздельной части рек Маят и Моргогор (см. рис. 1).

Химический состав минералов определялся при помощи энергетического спектрометра

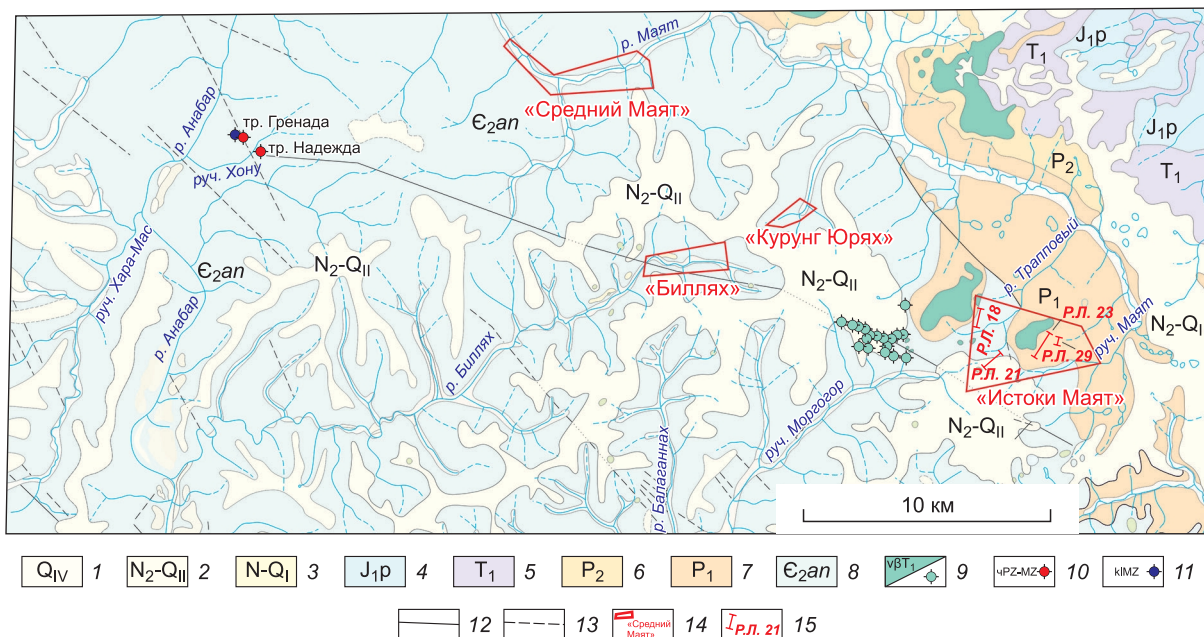


Рис. 1. Схематическая геологическая карта бассейна среднего течения р. Анабар [3]. 1 – четвертичные отложения; 2 – верхнеплиоценовые-среднечетвертичные суглинки, пески, галечники; 3 – неоген-нижнечетвертичные реликтовые галечники; 4 – юрские песчаники, алевролиты; 5 – триасовые базальты и их туфы; 6 – верхнепермские песчаники; 7 – нижнепермские песчаники, конгломераты; 8 – доломиты анабарской свиты кембрия; 9 – мезозойские интрузивные образования; 10 – трубки кимберлитов; 11 – дайки щелочных пикритов; 12 – тектонические нарушения установленные; 13 – тектонические нарушения предполагаемые; 14 – участки работ; 15 – разведочные линии колонкового бурения.

Fig. 1. Schematic geological map of the basin of the middle course of the Anabar river [3]. 1 – Quaternary deposits; 2 – Upper Pliocene – Middle Quaternary loams, sands, pebbles; 3 – Neogene–Lower Quaternary relict pebbles; 4 – Jurassic sandstones, siltstones; 5 – Triassic basalts and their tufts; 6 – Late Permian sandstones; 7 – Early Permian sandstones, conglomerates; 8 – dolomites of the Anabar formation of the Cambrian; 9 – Mesozoic intrusive formations; 10 – kimberlite pipes; 11 – dikes of alkaline picrites; 12 – determined tectonic disturbances; 13 – assumed tectonic disturbances; 14 – areas of work; 15 – exploratory core drilling lines.

«OXFORD» INCA-sight фирмы «JEOL», оснащенного аналитическими приставками Oxford Instruments (волновой и энергодисперсионный спектрометры). Съемки проводились при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ; ток зонда 1,09 нА; время измерения 7 с; аналитические линии: Au – Ма, Ag – а, другие элементы – Ка.

Краткая геологическая характеристика района работ

В геологическом строении рассматриваемой территории принимают участие карбонатные породы кембрийского, терригенные отложения пермского и вулканогенные образования триасового возраста, перекрытые рыхлыми неогеновыми и четвертичными осадками (см. рис. 1). Магматические породы представлены интрузивными телами основного и щелочно-ультраосновного состава триасового возраста [8]. По данным предшественников, большое значение в развитии района имели дизъюнктивные нарушения, среди которых выделяются глубинные разломы и разрывные нарушения осадочного чехла. Они образуют ряд систем северо-западного, северо-восточного, широтного и меридионального направления, сопровождающихся зонами повышенной трещиноватости. Важно подчеркнуть, что на исследуемой территории в период мезозойской тектономагматической активизации произошло омоложение древних систем глубинных разломов (Молодо-Попигайская, Анабаро-Экитская), что привело к образованию целой серии новых разрывных нарушений [9, 10]. Следует отметить, что большинство современных рек унаследовали палеодолины мезозойских водотоков, заложенных по тектоническим нарушениям.

Результаты исследования

Под гидротермально-метасоматическими образованиями нами, вслед за Е.В. Плющевым с соавторами [11], понимаются эпигенетические по отношению к исходным породам образования – вещественные производные гидротермальной деятельности как результат взаимодействия гидротермальных растворов с вмещающей средой, представленные метасоматическими телами или телами выполнения открытых полостей. При слабом проявлении они представляют собой в той или иной степени рассеянную вкрапленность гидротермальных минералов и их

агрегатов, метасоматически замещающих первичные минералы или выполняющих трещины, пустоты и т. д. в исходной породе [11, 12].

Исходным субстратом для гидротермально-метасоматических образований в Анабарском районе являются, главным образом, приразломные трещиноватые светло-желтые доломиты анабарской свиты среднего кембрия. Кроме этого в керне разведочных скважин впервые обнаружены гидротермалиты, развитые по слабоцементированным мелкогалечным кварцевым конгломератам перми. С интервала 39,7–40 м скважины А-3 линии 21 отобран образец 21-А3-5 длиной 7 см, представляющий собой обильно пиритизированную породу. На данном интервале наблюдаются мелкогалечные слабоцементированные конгломераты перми. Цемент карбонатно-глинистый. При сильном давлении керн превращается в рыхлую массу. Галька представлена мелким (от 1 до 4 см) хорошо окатанным серым кварцем.

По эпигенетическим минеральным ассоциациям выделяются кварц-калишпатовые и кремнисто-кварцевые (джаспероиды) гидротермально-метасоматические образования [7].

Кварц-калишпатовые гидротермально-метасоматические образования – желтоватого и ржавобурого оттенка. Текстура их преимущественно полосчатая, сетчато-прожилковая, обусловленная развитием различно ориентированных прожилков гидроокислов железа – продуктов разложения сульфидов (рис. 2). Наряду с ними обнаружены породы с рассеянной вкрапленностью эпигенетических минералов, визуально практически не отличимые от типичных доломитов.

Калиевый полевой шпат в апокарбонатных гидротермалитах представлен весьма мелкими (1–5 мкм) кристаллами в основном ромбовидной формы, имеет рассеянный характер распространения по всей матрице породы (рис. 3, а, б) или развит в маломощных (до 150 мкм) прожилках кварц-железисто-алюмосиликатного состава, пронизывающих доломит (рис. 3, в, г). В терригенных породах перми этот минерал характеризуется более крупными размерами (до 1 мм) и прямоугольными формами (рис. 3, д, е). Распределение компонентов в полевых шпатах показано в табл. 1.

Джаспероиды представляют собой апокарбонатные породы с содержанием SiO_2 от 81 до 96,5 % (табл. 2). Их характерной особенностью

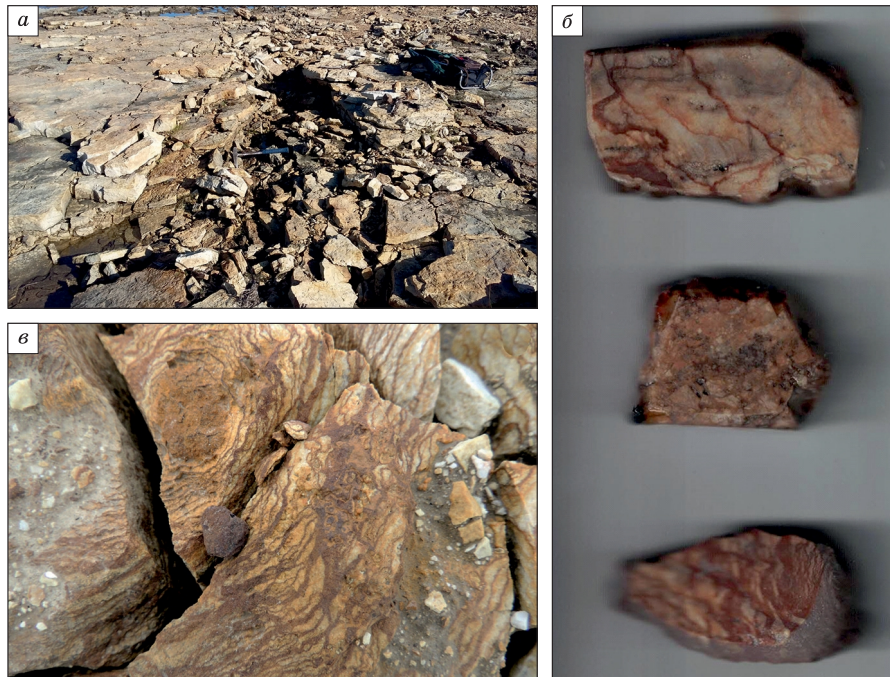


Рис. 2. Апокарбонатные кварц-калишпатовые метасоматиты: *а* – зона катаклаза в плотике отработанной россыпи, где развиты гидротермалиты; *б* – кварц-калишпатовые метасоматиты (общий вид аншлифов); *в* – полосчатый кварц-калишпатовый метасоматит.

Fig. 2. Apocarbonate quartz- potassium feldspar metasomatites: *a* – the cataclase zone in bedrock of the worked placer, where hydrothermalites are developed; *б* – quartz-potassium feldspar metasomatites (general view of polished sections); *в* – banded quartz-potassium feldspar metasomatite.

является оолитовая структура. В этих образованиях халцедоновидный кварц практически полностью замещает доломиты (рис. 4). Наблюдаются лишь весьма мелкие их реликты в центральных частях оолитов.

Рудная минерализация представлена сульфидами, золотом и серебром. Основными сульфидными минералами являются галенит и пирит, соотношения которых разнятся по различным участкам. На данном этапе исследований не выявлено каких-либо различий в составе рудных компонентов в вышеназванных типах гидротермально-метасоматических образований.

Галенит характеризуется весьма мелкими (первые мкм) изометричными зернами (рис. 5, *а, б*).

Пирит в измененных доломитах встречается в виде мелких вкрапленников (см. рис. 5, *а*), а в гидротермально-метасоматических образованиях, сформированных по пермским конгломератам, имеет прожилковый и сплошной характер распространения, проникая в промежутки между кварцевыми гальками, местами полностью замещая цемент конгломератов и иногда кварцевую гальку (рис. 5, *в, г*).

Сульфид серебра (акантит?) имеет довольно широкое распространение в апокарбонатных образованиях и представлен кристаллами и их агрегатами крупностью до 30 мкм (рис. 5, *д*).

Крупные зерна *сфалерита* (около 5 мм) обнаружены в кальцитовом прожилке калишпатизированного доломита на участке «Курунг Юрях» (рис. 6, *а*). По периферийным областям и трещинам он замещается цинкитом. В виде включений в сфалерите определены также весьма мелкий галенит и относительно крупный пирит (рис. 6, *б, в*). Кроме этого на других участках редко встречаются весьма мелкие зерна сфалерита.

Единичные мельчайшие (первые мкм) выделения *халькопирита*, *антимонита* и *арсенопирита* отмечаются в гидротермально измененных доломитах всех изученных участков.

Самородное золото выявлено в виде весьма мелких (до 15 мкм) изометричных зерен в микро-трещинах карбонатного или кремнистого субстрата (рис. 7, *а, б*). Мельчайшее выделение золота размером около 4 мкм удалось обнаружить на границе срастания пирита и калиевого полевого шпата в оруденелом конгломерате перми

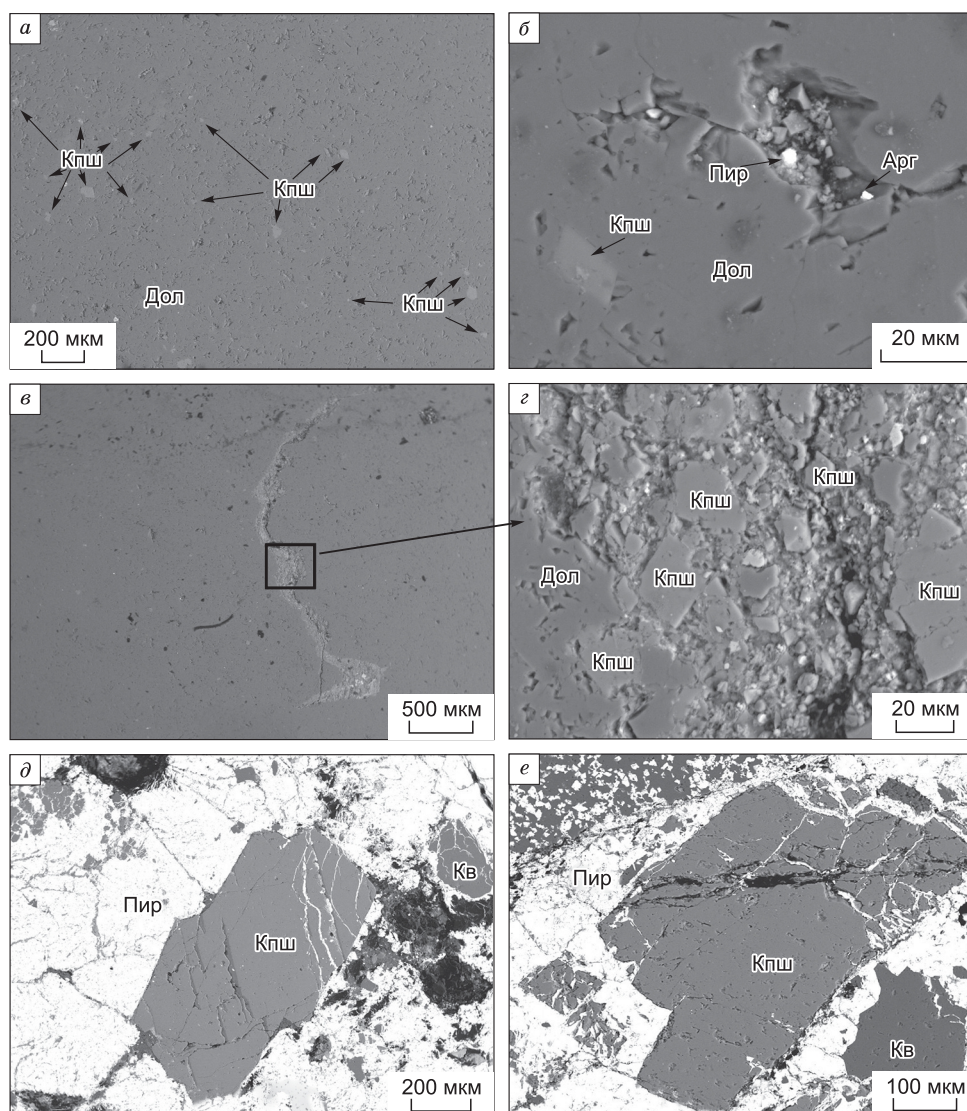


Рис. 3. Калиевые полевые шпаты в измененных доломитах кембрия и терригенных породах перми: *а, б* – рассеянная вкрапленная калишпатовая минерализация; *в, г* – калиевые полевые шпаты в прожилках переменного кварц-железо-алюмосиликатного состава; *д, е* – пиритовая и калишпатовая минерализация в пермских кварцевых конгломератах. Кпш – калиевый полевой шпат; Пир – пирит; Кв – кварц; Дол – доломит.

Fig. 3. Potassium feldspars in altered dolomites of the Cambrian and terrigenous rocks of the Permian: *a, б* – dispersed disseminated potassium feldspar mineralization; *в, г* – Potassium feldspars in veinlets of alternate quartz- quartz-iron-aluminosilicate composition; *д, е* – pyrite and potassium feldspar mineralization in the Permian quartz conglomerates. Кпш – potassium feldspar; Пир – pyrite; Кв – quartz; Дол – dolomite.

(рис. 7, *в, г*). В качестве элементов-примесей в золоте определены Hg и Cu. Максимальное содержание Hg в золоте достигает 2,4 %, что установлено на участке «Биллях» (рис. 8, *а*). На участке «Истоки Маят» в обильно пиритизированном доломите кернового образца обнаружена весьма мелкая золотина с примесью Cu с содержанием до 18 % (рис. 8, *б*).

Самородное серебро встречается в кварцевых прожилках и микротрещинах доломита, от-

личается агрегатным строением и более крупными размерами (до 60 мкм) по сравнению с золотом (рис. 9).

Обсуждение

Изучение рудного минерального состава гидротермально-метасоматических образований показало, что он представлен в основном вкрапленниками галенита и пирита с разными соотношениями по участкам. Так, на участках «Биллях» и

Таблица 1
**Распределение компонентов
 в калиевых полевых шпатах (по данным
 микрорентгеноспектрального анализа)**

Table 1
**Distribution of components in potassium feldspars
 (according to X-ray microanalysis data)**

Номер пробы Sample number	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Сумма Sum
M-1a	17,30	66,17	16,80	100,27
M-15	18,68	66,07	16,92	101,67
M-19-2	18,38	63,39	17,12	98,89
КЮ-3	18,79	63,85	15,86	98,49
КЮ-5	18,61	63,15	16,48	98,24
КЮ-19-3	18,53	64,23	16,33	99,10

«Курунг Юрях» главным рудным минералом является вкрапленный галенит, а на участке «Средний Маят» – пирит.

На участке «Истоки Маят», где изучены сульфидизированные породы с глубины более 25 м, основным рудным минералом служит пирит, который имеет прожилковый и сплошной характер развития. Важно подчеркнуть, что этот участок находится в непосредственной близости от интрузий долеритов триасового возраста. Появление галенита и других сульфидов на других участках связано, вероятно, со сменой геохимического спектра элементов при отдалении гидротермальных растворов от интрузий. Не исключается также наличие вертикальной геохимической зональности, поскольку опробование на участках «Биллях», «Курунг Юрях» и «Средний Маят»

Химический состав джаспероидов

Таблица 2

Chemical composition of jasperoids

Table 2

Компонент Component	Номера проб Sample numbers						
	КЮ-19-3/3	КЮ-19-5/1	КЮ-19-5/4	КЮ-19-3/1	ГБИ-2	Б-19-2/1	Б-19-5/1
SiO ₂	96,3	96,52	92,16	95	92,53	81,83	86,81
TiO ₂	0,15	0,21	0,15	0,14	0,13	0,13	0,15
Al ₂ O ₃	0,47	0,47	0,54	0,9	0,3	0,42	0,41
Fe ₂ O ₃	0,12	0,03	0,39	0,31	0,43	2,62	0
FeO	2,06	1,25	1,25	1,27	1,43	0	1,85
MnO	0,02	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03
MgO	0	0,25	0,62	0,08	0	0,17	1,29
CaO	0,15	0,32	1,53	1,02	1,91	1,03	2,25
Na ₂ O	0,04	0,03	0,03	0,01	0,08	0,02	0,06
K ₂ O	0,03	0,04	0,03	0,01	0,04	0,01	0,03
H ₂ O ⁻	0,56	0,34	0,22	0,26	0,44	1,14	0,38
H ₂ O ⁺	0,64	0,22	1,3	0,45	0,11	0,37	4,08
PPP	0	0,23	0	0,19	0,6	12,25	0
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0
CO ₂	0,03	0,64	1,98	0,82	1,83	0,46	3,36
Li ₂ O	0,0012	0,0007	0,0018	0,0011	0,0012	0,0002	0,0015
Rb ₂ O	0	0,0002	0	0	0	0	0
S	0,01	0	0,01	0,01	0	0,01	0
F	0	0	0	0	0	0	0
Сумма Sum	100,03	100,26	100,05	100,25	99,41	99,34	100,32

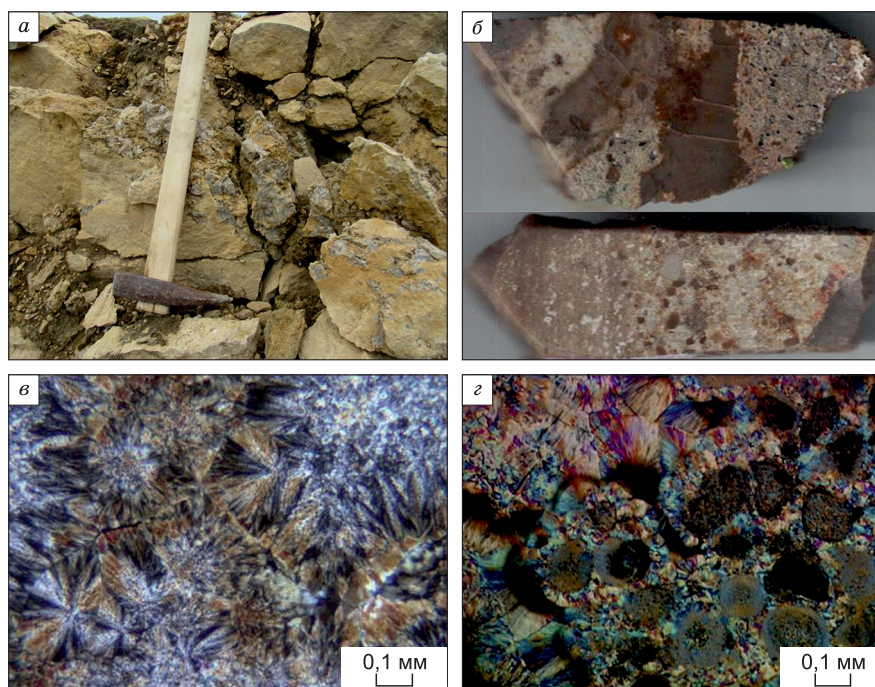


Рис. 4. Особенности джаспероидов: *а* – жилы джаспероидов, развитые в зоне катаклаза на участке «Биллях»; *б* – аншлифы, изготовленные из джаспероидов; *в* – халценовидный кварц (прозрачный шлиф); *г* – прожилки халцедоновидного кварца и кремнистые оолиты (прозрачный шлиф).

Fig. 4. Features of jasperoids: *a* – jasperoid veins developed in the cataclase zone on the «Billah» site; *b* – polished sections made of jasperoids; *v* – chalcenoid quartz (thin section); *z* – veinlets of chalcedony quartz and siliceous oolites (thin section).

производилось практически с дневной поверхности, а на участке «Истоки Маят» – с более глубоких горизонтов.

Значительную роль при формировании золотого оруденения имеют литологические факторы. В первую очередь это относится к степени проницаемости среды рудоотложения, которую определяет наличие пустот и пор в горных породах. В нашем случае благоприятными для рудоотложения явились приразломные проницаемые зоны тектонической трещиноватости карбонатных горных пород кембрия и слабо цементированных терригенных отложений перми.

Важное значение имеет тектонический фактор контроля оруденения. Установлена отчетливая приуроченность изученных гидротермально-метасоматических образований к Догой-Маятскому и Догой-Куойскому разломам Молодо-Поппайской системы разрывных нарушений (рис. 10). В пределах Догой-Куойского разлома локализованы дайки основных пород мезозойского возраста (см. рис. 1). Последние могли являться или собственно источниками оруденения, или же катализатором для мобилизации рассеянного пер-

вично гидротермально-осадочного рудного вещества. В пользу первого предположения свидетельствуют находки пирита и халькопирита в долеритах (рис. 11), а также обнаружение золота с примесью Cu (до 18 %) в апокарбонатных гидротермалитах керновых образцов (см. рис. 8, б). Согласно А.В. Округину с соавторами, наличие в магматических породах сульфидных минералов свидетельствует о насыщенности магматических расплавов сульфидами и их потенциальной рудности [13]. Кроме того, по данным Н.Е. Саввы, происхождение высокомедистого золота может быть связано с базитовым магматизмом [14].

Предположительно можно выделить два этапа формирования оруденения. В первый этап в приразломной зоне происходило формирование рудного вещества в виде первичных гидротермально-осадочных руд. Второй этап связан с процессами мезозойской тектономагматической активизации, когда по зонам разломов внедрились дайки основного состава, и при этом происходило переотложение рудного вещества, а также, возможно, дополнительная подпитка за счет насыщенных сульфидами магматических распла-

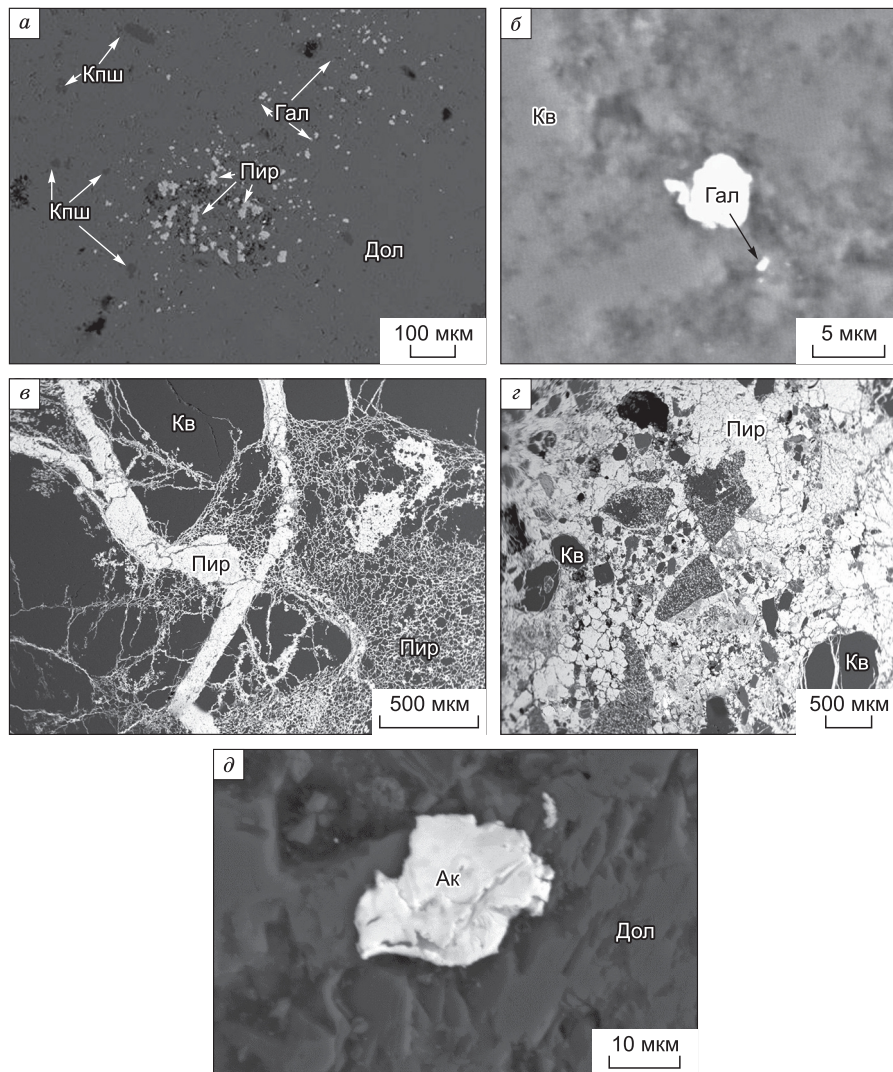


Рис. 5. Сульфидная минерализация гидротермально-метасоматических образований: *а* – галенит-пиритовая вкрапленная минерализация в калишпатизированном доломите; *б* – зерна галенита в кварцевом субстрате; *в* – прожилково-сетчатый характер пиритовой минерализации в кварцевом пермском конгломерате; *г* – сплошной характер пиритовой минерализации в кварцевом пермском конгломерате; *д* – акантит в апокарбонатном метасоматите. Кпш – калиевый полевой шпат; Пир – пирит; Кв – кварц; Дол – доломит; Ак – акантит.

Fig. 5. Sulfide mineralization of hydrothermal-metasomatic formations: *a* – galena pyrite disseminated mineralization in hydrothermally altered dolomite; *б* – galena grains in quartz substrate; *в* – veinlet-net-like nature of pyrite mineralization in quartz Permian conglomerate; *г* – continuous nature of pyrite mineralization in quartz Permian conglomerate; *д* – acanthite in apocarbonate metasomatite. Кпш – potassium feldspar; Пир – pyrite; Кв – quartz; Дол – dolomite; Ак – acanthite

вов. В результате этих процессов золотосульфидные гидротермы распространялись по оперяющим разрывным нарушениям в зоны разгрузки, образуя золотоносные гидротермально-метасоматические образования.

Масштабы золотосульфидной минерализации пока не определены. Однако, по всей видимости, приразломные гидротермально-метасоматические образования имеют довольно широкое распространение на территории северо-востока Сибир-

ской платформы. Об этом свидетельствует обнаружение схожих по составу и строению окремненных карбонатных пород с сульфидной и благороднометалльной минерализацией в районе юго-восточного фланга Молодо-Попигайской системы разломов (см. рис. 10). Здесь в результате изучения петрографических особенностей галек аллювиальных отложений бассейна р. Молодо обнаружены окремненные породы с оолитовой структурой с включениями пирита, серебра и

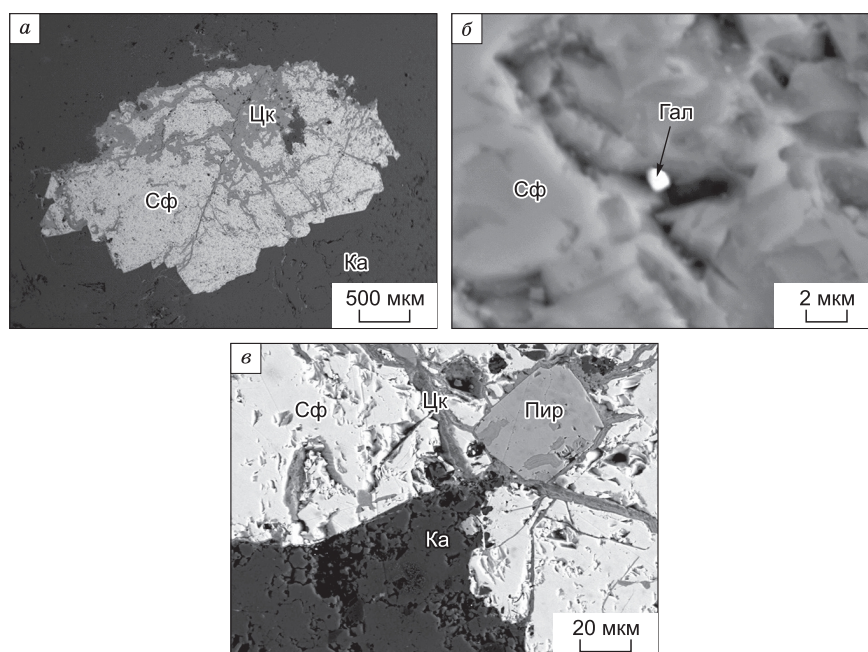


Рис. 6. Особенности сфалерита апокарбонатных гидротермально-метасоматических образований: *а* – крупный сфалерит, развитый в кальцитовом прожилке, замещенный по трещинам и периферии цинкитом; *б, в* – включения галенита (*б*) и пирита (*в*) в сфалерите. Ка – кальцит; Сф – сфалерит; Цк – цинкит; Гал – галенит; Пир – пирит.

Fig. 6. Features of sphalerite of apocarbonate hydrothermal-metasomatic formations: *a* – large sphalerite developed in calcite veinlet, replaced by red zinc ore along cracks and at the edges; *б, в* – inclusions (*б*) of galena and (*в*) pyrite in sphalerite. Ка – calcite; Сф – sphalerite; Цк – red zinc ore; Гал – galena; Пир – pyrite.

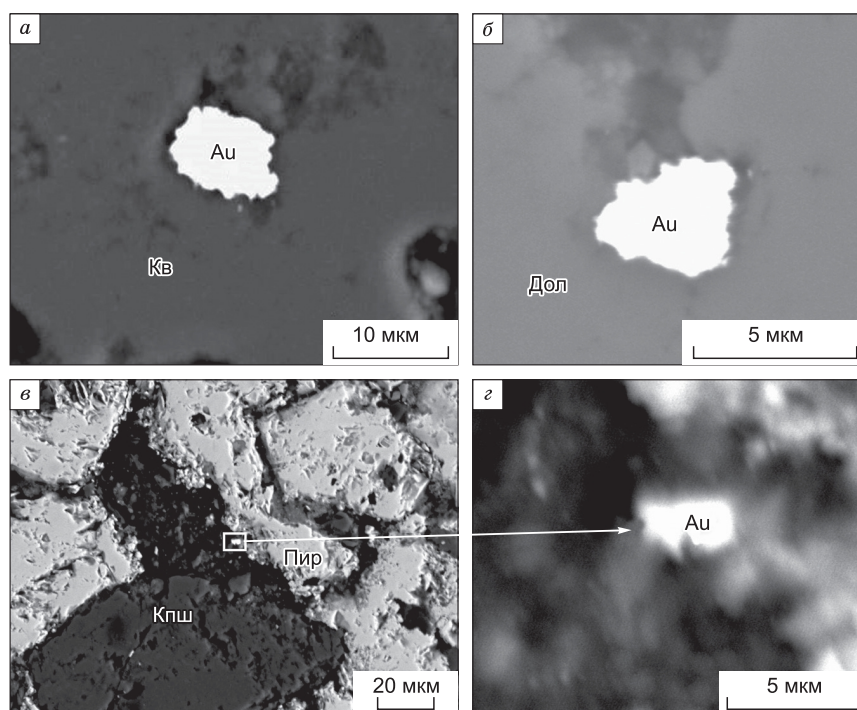


Рис. 7. Мелкие выделения золота в джаспероиде (*а*), апокарбонатном (*б*) кварц-калишпатовом метасоматите и оруденелом (*в, з*) конгломерате.

Fig. 7. Fine gold particles in (*a*) jasperoid, (*б*) apocarbonate quartz-potassium feldspar metasomatite and (*в, з*) mineralized conglomerate.

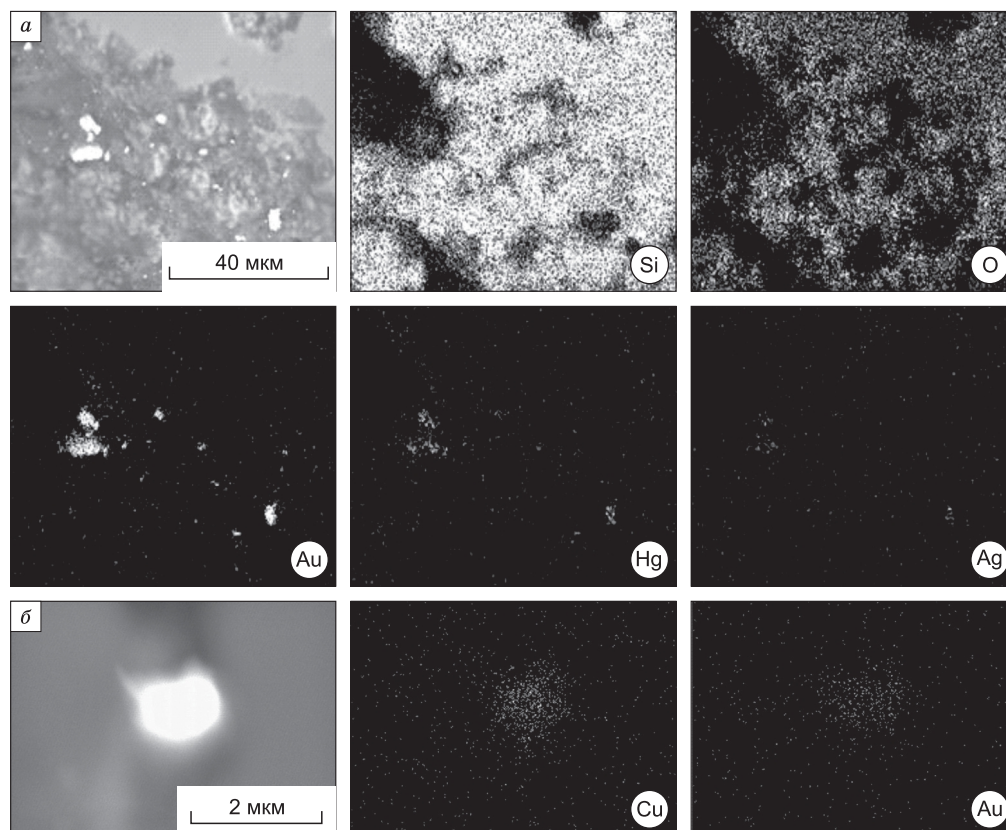


Рис. 8. Элементы-примеси в золоте (снято в рентгеновском излучении Si, O, Au, Hg, Ag и Cu): *a* – ртутьсодержащее золото (Hg – 2,4 %) в джаспероиде; *б* – медистое золото (Cu – 18 %) в апокарбонатном кварц-калишпатовом гидротермально-метасоматическом образовании.

Fig. 8. Elements-impurities in gold (taken in X-ray radiation Si, O, Au, Hg, Ag и Cu): *a* – mercury-containing gold (Hg – 2.4 %) in jasperoid; *б* – copper gold (Cu – 18 %) in the apocarbonate quartz- potassium feldspar hydrothermal-metasomatic formation.

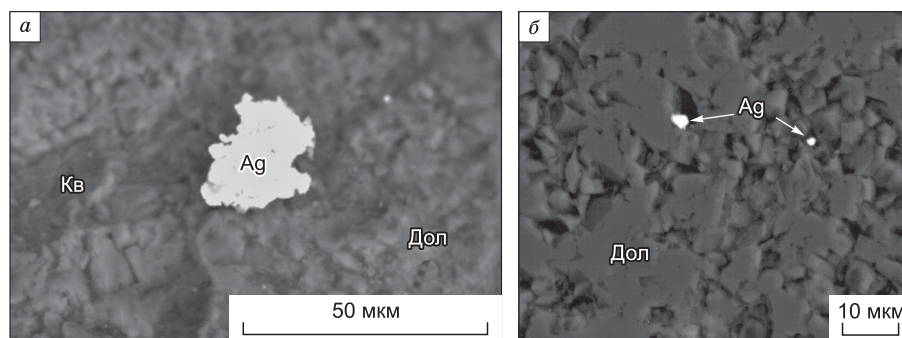


Рис. 9. Мелкие выделения серебра в кварцевом прожилке (*a*) и микротрещине (*б*) калишпатизированного доломита.

Fig. 9. Fine silver particles in (*a*) quartz veinlet and (*б*) microcrack of hydrothermally altered dolomite.

золота [15]. Кроме того, золотосодержащие гидротермально-метасоматические образования, сформированные по терригенным породам, выявлены в зоне динамического влияния Анабаро-Экитской системы разрывных нарушений в центральной части Лено-Анабарского прогиба (бассейн р. По-

ловинная) и Сололийского поднятия Оленекского свода (бассейн р. Экикт) (см. рис. 10).

Краткие выводы

Основным исходным субстратом для гидротермально-метасоматических образований Ана-

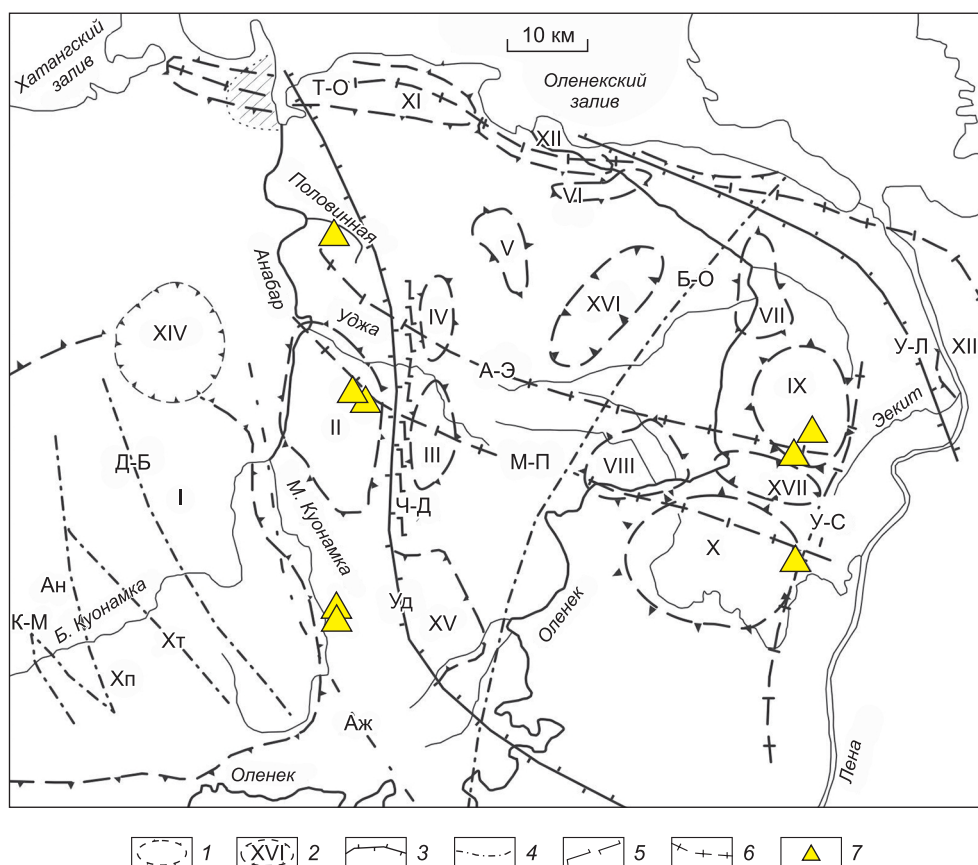


Рис. 10. Распространение гидротермально-метасоматических образований на северо-востоке Сибирской платформы (тектоническая схема по [2]):

1 – поднятия: I – Анабарское, II – Эбеляхское, III – Уджинское, IV – Билирское, V – Буолкалахское, VI – Чарчыкское, VII – Тюмятинское, VIII – Куойское, IX – Сололийское, X – Далдынское, XI – Тигяно-Оленекское, XII – Усть-Оленекское, XIII – Хараулахское; 2 – прогибы и впадины: XIV – Попигайский грабен, XV – Суханская впадина, XVI – Ары-Онгорбутская впадина, XVII – Кютюндинский прогиб; 3–6 – зоны разломов: 3 – предположительно позднеархейского заложения (Уд – Уджинская, У-Л – Усть-Ленская); 4 – предположительно среднепротерозойского заложения (К-М – Котуйкан-Монхолинская, Ан – Анабарская, Хп – Харапская, Д-Б – Дьегес-Биригиндинская, А-Ж – Анабаро-Жиганская, Б-О – Буро-Оленекская); 5 – предположительно нижнепалеозойского заложения (Ч-Д – Чымара-Джелинджинское); 6 – предположительно среднепалеозойского заложения (М-П – Молодо-Попигайская, А-Э – Анабаро-Экитская, Т-О – Тигяно-Оленекская, У-С – Усунку-Сюнгюдинская); 7 – золотосодержащие гидротермально-метасоматические образования.

Fig. 10. Distribution of hydrothermal-metasomatic formations in the northeast of the Siberian Platform (tectonic scheme by [2]): 1 – uplifts: I – Anabar, II – Ebelyakh, III – Udzhin, IV – Bilir, V – Buolkalakh, VI – Charchyk, VII – Tyumyatin, VIII – Kuoyk, IX – Sololiy, X – Daldyn, XI – Tygyano-Olenek, XII – Ust-Olenek, XIII – Kharaulakh; 2 – troughs and basins: XIV – Popigai graben, XV – Sukhansk basin, XVI – Ary-Ongorbut basin, XVII – Tyutyungdin trough; 3–6 – fault zones: 3 – presumably of the Late Archean origin (Ud – Udzhin, U-L – Ust-Lena); 4 – presumably of the Middle Proterozoic origin (K-M – Kotuykan-Monkholin, An – Anabar, Hp – Kharap, D-B – Dieges-Birigindin, A-Zh – Anabar-Zhigansk, B-O – Buro-Olenek); 5 – presumably of the Lower Paleozoic origin (Ch-D – Chymara-Dzhelindzhin); 6 – presumably of the Middle Paleozoic origin (M-P – Molodo-Popigai, A-E – Anabar-Eekit, T-O – Tyigano-Olenek, U-C – Usunku-Syungyudin); 7 – gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations.

барского района являются доломиты анабарской свиты среднего кембрия.

Впервые в керне разведочных скважин изучены гидротермалиты, развитые по слабоцементированным мелкогалечным кварцевым конгломератам перми.

Выделяется два типа приразломных гидротермально-метасоматических образований – кварц-калишпатовый и джаспероидный.

Главными рудными минералами являются галенит и пирит с различными соотношениями по участкам.

Золото выявлено в виде мелких выделений в карбонатном и кремнистом субстрате гидротермально-метасоматических образований.

Благоприятным фактором для рудообразования явилось наличие приразломных прони-

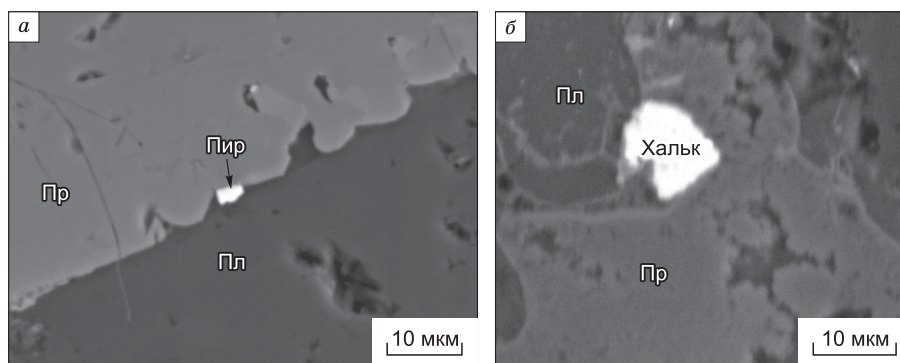


Рис. 11. Сульфидная минерализация долеритов истоков р. Маят: а – микрокристалл пирита на границе сростания пироксена и плагиоклаза; б – зерно халькопирита в зоне сростания плагиоклаза и пироксена. Пр – пироксен; Пл – плагиоклаз; Пир – пирит; Хальк – халькопирит.

Fig. 11. Sulfide mineralization of dolerite of the sources of the Mayat river: а – pyrite microcrystals at the border of pyroxene and plagioclase growth; б – chalcopyrite grain in the zone of plagioclase and pyroxene growth. Пр – pyroxene; Пл – plagioclase; Пир – pyrite; Хальк – chalcopyrite.

цаемых зон тектонической трещиноватости карбонатных и терригенных горных пород.

Структурный контроль изученных рудных проявлений определяется их локализацией в Маят-Догойском и Догой-Куойском разломах Молодо-Пописайской системы разрывных нарушений.

Предполагается двухэтапное образование золоторудных проявлений: в первый этап происходило формирование рудного вещества в виде первичных гидротермально-осадочных руд. Второй этап связан с процессами мезозойской тектономагматической активизации, когда при внедрении базитовых даек произошла мобилизация рудного вещества и в результате кремнекалийевого метасоматоза кембрийских карбонатных и пермских терригенных пород в приразломной зоне образовались золотосульфидные проявления.

Литература

1. Патык-Кара Н.Г. Минерогения россыпей: типы россыпных провинций. М.: ИГЕМ РАН. 2008. 528 с.
2. Шпунт Б.Р. Типоморфные особенности и генезис россыпного золота на севере Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1974. № 9. С. 77–88.
3. Толстов А.В. Перспективы золотоносности Анабарской антеклизы // Вестник Госкомгеологии. 2002. № 1(2). С. 44–49.
4. Додин Д.А. Металлогения Таймыро-Норильского региона. СПб., 2002. 822 с.
5. Смелов А.П., Амузинский В.А., Зедгенизов А.Н., Березкин В.И., Коваль С.Г. Перспективы коренной золотоносности метаморфических и магматических комплексов Анабарского щита // Золото Сибири и Дальнего Востока. Улан-Удэ, 2004. С. 279–281.
6. Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г. Каженикина А.Г. Золотоносность востока Сибирской платформы: россыпи – коренные источники // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55, № 4. С. 305–319.
7. Герасимов Б.Б., Желонкин Р.Ю., Земнухов А.Л. Типоморфизм мелкого россыпного золота и потенциальные коренные источники Анабарского россыпного района (северо-восток Сибирской платформы) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. № 4. С. 37–47.
8. Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А., Кычкин В.Р., Сулейманов А.М. Россыпи алмазов России. Новосибирск: Гео, 2007. 457 с.
9. Милашев В.А. Структуры кимберлитовых полей. Л., 1979. 183 с.
10. Рубенчик И.Б., Борщева Н.А., Зарецкий Л.М. Геологическая карта масштаба 1: 200 000. Серия Анабарская. Лист R-50-VII, VIII. Объяснительная записка. Л.: ВСЕГЕИ, 1980. 72 с.
11. Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. 2012. Т. 354 560 с.
12. Петров О.В., Плющев Е.В., Шатов В.В., Молчанов А.В., Соловьев Н.С., Кашин С.В., Соболев А.Е., Терехов А.В. Гидротермально-метасоматические формации России // Региональная геология и металлогения. 2016. № 66. С. 5–19.
13. Округин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Медно-никелевое сульфидное рудопоявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 4. С. 16–28. Doi 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28.
14. Савва Н.Е., Шилыева Н.А., Алевская Н.Л. Топо-минералогия конституционных особенностей самородного золота Нижне-Амурского россыпного района. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 173 с.

15. Герасимов Б.Б., Кравченко А.А. Рудные проявления Анабарского россыпного района – потенциальные коренные источники золота // Вестник СВФУ.

Науки о Земле. 2020. № 4. С. 17–28. DOI 10.25587/SVFU.2020.20.4.008.

Поступила в редакцию 20.04.2022

Поступила после рецензирования 12.05.2022

Принята к публикации 17.05.2022

Об авторе

ГЕРАСИМОВ Борис Борисович, старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, Researcher ID: L-6369-2018, Scopus ID: 14063438000, e-mail: BGerasimov@yandex.ru

Для цитирования

Герасимов Б.Б. Вещественный состав и геолого-структурная позиция золотоносных гидротермально-метасоматических образований бассейна р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 207–220. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-207-220>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-207-220

**Material composition and geological-structural position
of gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations
of the Anabar river basin (northeast of the Siberian Platform)**

B.B. Gerasimov

*Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
BGerasimov@yandex.ru*

Abstract. We study mineralogical features of the gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations of the Anabar region. Their main substrate is represented by fractured near-fault dolomites of the Anabar formation of the Cambrian age. We have found, for the first time, hydrothermalites developed on the slightly cemented fine-pebble quartz conglomerates of the Early Permian age in the core of exploration wells. Furthermore, we have identified two types of metasomatic rocks: quartz-potassium feldspar and jasperoid. We have revealed that the main ore minerals were galena and pyrite with different ratios by sites. The disseminated galena was the main ore mineral at the «Billyakh» and «Kurung Yuryakh» sites, and pyrite – at the «Sredny Mayat» site. At the «Sources of the Mayat» site, where sulfidized rocks were studied from a depth of more than 25 m, the main ore mineral was pyrite, which had a veinlet and continuous nature of development. Gold was identified in the form of small particles in the carbonate and siliceous substrate of hydrothermal-metasomatic formations at all sites. The lithological factor was one of the leading factors for the ore formation due to the presence of near-fault highly permeable fractured carbonate and slightly cemented terrigenous rocks. The structural control of the studied ore occurrences was determined by their localization in the Mayat-Logoy and Dogoy-Kuoy faults of the Molodo-Popigay system of discontinuous faults. We assume a two-stage formation of the gold ore occurrences. During the first stage, the ore components in the form of primary hydrothermal-sedimentary ores in the near-fault zones were formed. The second stage was related to the processes of the Mesozoic tectonic-magmatic activation when the intrusion of basite dikes initiated the mobilization of ore components. The gold-sulfide occurrences were formed in

the near-fault zone as a result of silicic-potassic metasomatism of the Cambrian carbonate and Permian terrigenous rocks.

Keywords: Anabar ore-placer area, hydrothermal-metasomatic formations, potassium feldspar formation, jasperoids, ore mineralization, fault zone, ore gold, sulfides

Acknowledgements. *The research was carried out according to the State Assignment of the Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS and partly within the framework of contract-based work with «Almazy Anabara» JSC.*

References

1. Patyk-Kara N.G. Mineralogy of placers: types of placer provinces. Moscow: IGM RAS. 2008. P. 528 (In Russ.)
2. Shpunt B.R. Typomorphic features and genesis of placer gold in the north of the Siberian platform // *Geology and Geophysics*. 1974. № 9. P. 77–88 (In Russ.)
3. Tolstov A.V. Prospects for the gold content of the Anabar antecline // *Bulletin of the State Committee for Geology*. 2002. No. 1 (2). P. 44–49 (In Russ.)
4. Dodin D.A. Metallogeny of the Taimyr-Norilsk region. SPb., 2002. 822 p. (In Russ.)
5. Smelov A.P., Amuzinsky V.A., Zedgenizov A.N., Bezrezkin V.I., Koval S.G. Prospects for the primary gold content of the metamorphic and magmatic complexes of the Anabar shield // *Gold of Siberia and Far East*. Ulan-Ude, 2004. P. 279–281 (In Russ.)
6. Nikiforova Z.S., Gerasimov B.B., Glushkova E.G., Kazhenkina A.G. Gold-bearing potential of the east of the Siberian platform: placers – primary sources // *Geology of ore deposits*. 2013. Vol. 55, No. 4. P. 305–319 (In Russ.)
7. Gerasimov B.B., Zhelonkin R.Y., Zemnukhov A.L. Typomorphism of fine placer gold and potential primary sources of the Anabar placer area (northeast of the Siberian platform) // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2019. No. 4. P. 37–47 (In Russ.)
8. Grakhanov S.A., Shatalov V.I., Shtyrov V.A., Kychkin V.R., Suleymanov A.M. Diamonds placers of Russia. N.: «Geo», 2007. P. 457 (In Russ.)
9. Milashev V.A. Structures of kimberlite fields. Leningrad. 1979. P. 183 (In Russ.)
10. Rubenchik I.B., Borshcheva N.A., Zaretsky L.M. Geologic map, scale 1: 200 000. Anabar Series. Sheet R-50-Vii, VIII. Explanatory note. L.: VSEGEI. 1980. P. 72 (In Russ.)
11. Plushev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V. Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations // *The works of VSEGEI. A new series*. 2012. Vol. 354. P. 560 (In Russ.)
12. Petrov O.V., Plushev E.V., Shatov V.V., Molchanov A.V., Soloviev N.S., Kashin S.V., Sobolev A.E., Terekhov A.V. Hydrothermal-metasomatic formations of Russia // *Regional geology and metallogeny*. 2016. No. 66. P. 5–19.
13. Okrugin A.V., Zemnukhov A.L., Zhuravlev A.I. Copper-nickel sulfide ore occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield // *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2021. Vol. 26, No. 4. P. 16–28. DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28 (In Russ.)
14. Savva N.E., Shilyaeva N.A., Aleevskaya N.L. Topomineralogy of constitutional features of native gold of the Lower Amur placer area. Magadan: SVKNII FEB RAS, 2004. P. 173 (In Russ.)
15. Gerasimov B.B., Kravchenko A.A. Ore manifestations of the Anabar alluvial area - potential primary sources of gold // *Bulletin of the NEFU. Earth Sciences*. 2020. No. 4. P. 17–28. DOI 10.25587/SVFU.2020.20.4.008 (In Russ.)

Submitted 20.04.2022

Revised 12.05.2022

Accepted 17.05.2022

About the author

GERASIMOV, Boris Borisovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0002-5112-536X>, Researcher ID: L-6369-2018, Scopus ID: 14063438000,
 e-mail: BGerasimov@yandex.ru

For citation

Gerasimov B.B. Material composition and geological-structural position of gold-bearing hydrothermal-metasomatic formations of the Anabar river basin (northeast of the Siberian platform) // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 207–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-207-220>

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 556.535, 551.583

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-221-232

Современная динамика количества твердых осадков и стока весеннего половодья на реках Сахалина

Д.А. Боброва^{1,*}, А.И. Казаков², А.И. Шевченко³

¹Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН,
Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

³Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Обнинск, Россия

*darya-kononova@yandex.ru

Аннотация. На основе данных о количестве осадков по 13 метеостанциям и данных о стоке половодья по 9 гидрологическим постам приводятся результаты исследований современной динамики слоя стока весеннего половодья и наибольшего срочного расхода воды на реках о. Сахалин и анализ изменения количества твердых осадков как основного стокоформирующего фактора. Также была исследована динамика других климатических параметров по метеостанции Александровск-Сахалинский, оказывающих влияние на сток весеннего половодья р. Арково – п. Арково, таких как суммы положительных среднесуточных температур воздуха от момента начала снеготаяния до конца половодья, средних за зиму высоты и плотности снежного покрова. Анализ показал, что на территории Сахалина наблюдается рост количества осадков за холодный период (ноябрь–март) на метеостанциях северной части острова за исключением метеостанции Погиби. Однако значимых трендов суммарного слоя стока весеннего половодья на реках Сахалина за исключением р. Тымь, где зафиксировано снижение стока, не выявлено. Таким образом, на Сахалине увеличение количества твердых осадков не привело к увеличению значений слоя стока половодья на реках.

Ключевые слова: Сахалин, твердые осадки, слой стока весеннего половодья, факторы формирования стока половодья

Благодарности. Представленные результаты получены при финансовой поддержке государственного задания АААА-А19-119051390002-3.

Введение

В последние десятилетия вопросам изменения климата посвящено множество работ, в том числе большое внимание уделяется влиянию меняющихся климатических параметров на человека и окружающую среду. Наблюдаются изменения в циркуляции воздушных масс, происходит рост среднегодовой температуры воздуха, меняются режим и количество выпадающих осадков [1]. Так, происходящие в настоящее время изменения климата в ряде крупных регионов уже привели среди прочего к изменениям гидрологического режима рек [2–4].

Основной фазой водного режима является весеннее половодье, характерное для всех рек Сахалина. Так как зимой выпадает сравнительно много осадков (20–40 % годовой суммы), то половодье обычно бывает высоким и продолжи-

тельным (от 45 до 80 дней). В формировании весеннего половодья принимают участие, главным образом, талые воды, поступающие с горных районов [5]. Основные факторы, определяющие условия формирования стока половодья, можно разделить на две группы: изменчивые климатические и относительно постоянные физико-географические. Физико-географические факторы определяются геологическим строением водосбора, морфологическими характеристиками бассейна и русла реки, а также характером их подстилающей поверхности. К основным климатическим факторам относятся запасы воды в снежном покрове, ход температуры воздуха во время снеготаяния и осадки во время половодья. В итоге, именно эти изменчивые климатические факторы и определяют количественные изменения стока половодья. Таким образом, оценка из-

менения климатических факторов и связанного с этим изменения характеристик половодья является необходимой задачей для расчета и прогноза весеннего стока.

Кроме того, климатические изменения на планете происходят неравномерно, в некоторых областях ощутимых изменений вовсе не наблюдается, что также отражается на неравномерности изменения гидрологического режима рек территории. Так, физико-географические особенности Сахалина, вытянутого в меридиональном направлении почти на 1000 км и отличающегося разнообразием ландшафтов, позволяют выя-

вить разнонаправленные тенденции изменений характеристик весеннего стока и основного стокоформирующего фактора – количества твердых осадков.

Таким образом, целью работы является изучение современной динамики слоя стока весеннего половодья рек о. Сахалин и анализ изменения климатических параметров как основных стокоформирующих факторов.

Методы и материалы исследования

Для оценки динамики количества твердых осадков были выбраны данные по 13 метеостанциям острова, которые находятся в открытом доступе на сайте ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [6]. Данные по остальным метеостанциям получить не представилось возможным.

Продолжительность наблюдения за осадками на метеостанциях Сахалина превышает 70 лет (ГМС Александровск-Сахалинский открыта в 1891 г.), однако по многим метеостанциям имеются большие пропуски данных, поэтому анализ динамики осадков был проведен за период с 1967 по 2015 г. (рис. 1). Для метеостанций Ноглики и Тымовское, имеющих наиболее полные данные, отдельно были проанализированы ряды с 1936 г.

Анализ других климатических параметров, оказывающих влияние на сток рек весеннего половодья (суммы положительных среднесуточных температур воздуха и средние за зиму высоты и плотности снежного покрова), был проведен по данным ГМС Александровск-Сахалинский, полученным также с сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [6].

Всего за время наблюдения за стоком рек во всей Сахалинской области было открыто более 200 гидропостов с продолжительностью наблюдений от нескольких месяцев до 95 лет (действующий гидропост на р. Тымь – свх. Красная Тымь открыт 01.03.1927 г.). В настоящее время насчитывается 30 действующих гидропостов, на которых ведутся наблюдения за расходами воды, однако для анализа были выбраны гидропосты с длительными и наиболее полными периодами наблюдений, сопоставимыми с периодами наблюдений за осадками на метеостанциях Сахалина (с 1967 по 2015 г.). Исключение составляет гидропост на р. Охинка (пост открыт в 1973 г.), расположенный в самом северном районе острова, поскольку другие посты с продолжительными рядами в этой части острова отсутствуют.



Рис. 1. Схема расположения метеостанций (1) и гидропостов (2) (о. Сахалин).

Fig. 1. Layout of weather stations (1) and hydro posts (2) (Sakhalin Island).

Таким образом, выявление тренда в многолетних рядах данных суммарного слоя стока весеннего половодья осуществлялось по данным девяти гидрологических постов, расположенных в разных районах острова, за период 1967–2015 гг.

Характеристики стока рек (наибольший срочный расход, суммарный слой стока за половодье, даты начала и окончания половодья) были взяты из гидрологических ежегодников, предоставленных ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД».

Ряды исходных данных были проверены на однородность по среднему и по дисперсии с помощью критериев Стьюдента и Фишера соответственно на 5%-м уровне значимости. Оценка значимости линейных трендов как рядов стока, так и рядов осадков произведена по коэффициенту корреляции R между значениями временного ряда и их порядковыми номерами.

Для исследования временной изменчивости исследуемых параметров, а также для оценки связи между параметрами в работе были использованы корреляционный и регрессионный анализ.

Описание объектов исследования

Территория Сахалина отличается большим разнообразием природных ландшафтов. Южная и центральная части острова заняты в основном горными хребтами, протянутыми с севера на юг (Западно-Сахалинские и Восточно-Сахалинские горы) и разделенными двумя относительно крупными речными долинами – Сусунайской и Тымь-Поронайской низменностями. В горной части острова прослеживается вертикальная зональность климата, почв и растительного покрова, что сказывается в том числе на характере водного режима рек острова. Северная часть Сахалина представляет собой равнину с сильно изрезанной поверхностью и остаточными возвышенностями в центральной части высотой 300–600 м (хребты Вагис, Даги). Растительность на территории острова также заметно различается: на севере тундровая, в центральной части преимущественно хвойные леса из лиственницы и ели, а в южной части произрастают смешанные леса с преобладанием лиственных пород.

Для климата исследуемого региона характерна активная циклоническая деятельность, которая обуславливает продолжительную пасмурную погоду с обильным выпадением осадков в виде дождя и снега. На всей территории области количество жидких осадков превышает количество твердых в 1,5 раза и более.

На Сахалине максимальных значений осадки достигают на метеостанциях Макаров и Долинск, расположенных в юго-восточной части острова, и на метеостанциях юго-западного побережья (Невельск и Холмск) (см. рис. 1). По данным наблюдений за осадками до 1989 г. наибольшее среднегодовое количество за холодный период зафиксировано в Долинске и составляет 348 мм, за теплый период в Макарове – 736 мм [7].

Речная сеть рассматриваемой территории насчитывает более 60 тысяч рек, 98 % от общего числа рек составляют реки, имеющие длину менее 10 км. Наиболее густая речная сеть отмечается на юго-западном и юго-восточном побережьях Сахалина, где коэффициент густоты речной сети острова составляет 1,50–2,0 км/км², в центральной части – 1,0–1,5 км/км², менее развита речная сеть на севере острова в пределах Северо-Сахалинской низменности – 1,0 км/км² [5].

В табл. 1 приводятся основные гидрографические характеристики бассейнов рассматриваемых рек.

Результаты и их обсуждение

Оценка динамики осадков за холодный период. На некоторых метеостанциях отмечается рост количества осадков с самого начала наблюдений. Так, в северо-восточной части Сахалина (пгт. Ноглики) и в Тымь-Поронайской низменности (Тымовское) прослеживается стабильный рост осадков холодного периода (ноябрь–март) с 1936 г., при этом основная доля прироста приходится на декабрь, январь и февраль (рис. 2).

В настоящей работе была проведена оценка трендов твердых осадков (ноябрь–март) за 1967–2015 гг. (табл. 2).

Согласно проведенной оценке, можно говорить о повышении количества осадков за холодный период преимущественно на метеостанциях северной части острова за исключением метеостанции Погиби. По югу Сахалина рост осадков показывает юго-западное побережье (Невельск). Также обнаружено снижение осадков по Ильинскому и м. Крильон. Наиболее высокий коэффициент линейного тренда наблюдается на метеостанции Невельск.

В разных районах Сахалина изменения количества осадков происходят в разных направлениях: одни метеостанции показывают значимый рост, а другие – снижение. В то же время по ряду метеостанций не происходит заметного изменения количества осадков за почти 50-летний пе-

Основные гидрографические характеристики исследуемых водотоков

Table 1

The main hydrographic characteristics of the studied watercourses

Река River	Длина водотока, км Length, km	Площадь водосбора, км ² Catchment area, km ²	Средняя высота водосбора, м Average height of the catchment area, m	Средний уклон водосбора, ‰ Average slope of the catchment area, ‰	Средневзвешенный уклон реки, ‰ Weighted average slope of the river, ‰
Тынь – свх. Красная Тынь	88,0	1390,0	460,0	–	4,8
Охинка – г. Оха	6,9	22,7	30,0	80,0	3,9
Арково – п. Арково	14,0	65,0	360,0	380,0	31
Макарова – г. Макаров	95,0	580,0	420,0	320,0	5,2
Найба – п. Быков	68,0	679,0	350,0	260,0	5,0
Новикова – п. Новиково	14,0	30,4	150,0	140,0	8,7
Кострома – с. Костромское	46,0	233,0	220,0	270,0	5,4
Томаринка – г. Томари	37,0	207,0	300,0	280,0	8,5
Б. Александровка – с. Корсаковка	31,0	167,0	290,0	260,0	9,7

риод, в том числе охватывающий и последние три десятилетия наблюдающегося изменения климата на планете.

При этом метеостанции расположены в одних климатических областях и даже климатических районах согласно карте климатического районирования Атласа Сахалинской области [8] и приложению А СП 131.13330.2020 [9].

Оценка динамики наибольшего срочного расхода воды и суммарного слоя стока за весеннее половодье. Традиционно принято считать, что основным стокоформирующим фак-

тором половодья является количество осадков, выпавших за холодный сезон. Вероятно, наблюдаемый рост количества твердых осадков должен приводить к увеличению стока весеннего половодья. Для оценки наличия (либо отсутствия) линейных трендов слоя стока весеннего половодья и наибольшего срочного расхода воды были проанализированы ряды имеющихся продолжительных наблюдений по девяти гидропостам о. Сахалин (табл. 3).

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показал, что значимых трендов суммарного слоя сто-

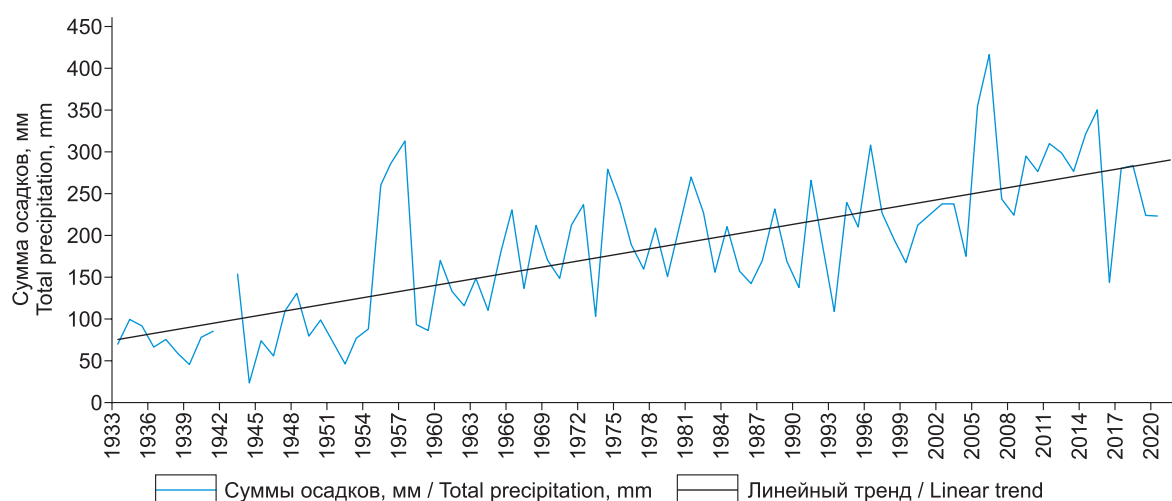


Рис. 2. Суммы осадков за холодный период года (ноябрь–март) по метеостанции Ноглики.

Fig. 2. Precipitation amounts for the cold period of the year (November–March) at the Nogliki weather station.

Таблица 2

Оценка значимости линейного тренда количества осадков за холодный период (ноябрь–март) по метеостанциям Сахалина за период 1967–2015 гг., где R^2 – коэффициент детерминации, R – коэффициент корреляции, σ_R – среднее квадратическое отклонение

Table 2

Assessment of the significance of the linear trend of precipitation over the cold period (November–March) at the weather stations of the Sakhalin region for the period 1967–2015, R^2 is the coefficient of determination, R is the correlation coefficient, σ_R is the standard deviation

Метеостанция Weather station	Уравнение тренда Trend equation	R^2	R	σ_R	$2\sigma_R$	$3\sigma_R$	Значимость тренда The significance of the trend
Тымовское	$y = 1,950x + 198,1$	0,20	0,45	0,12	0,23	0,35	+
Ноглики	$y = 2,678x + 155,4$	0,34	0,58	0,10	0,19	0,29	+
Александровск-Сахалинский	$y = 2,441x + 154,7$	0,38	0,61	0,09	0,18	0,27	+
Ильинский	$y = -1,617x + 353,1$	0,11	0,33	0,13	0,26	0,39	+
Мыс Крильон	$y = -3,178x + 486,5$	0,22	0,47	0,11	0,23	0,34	+
Москальво	$y = 2,147x + 139,2$	0,30	0,55	0,10	0,20	0,30	+
Мыс Терпения	$y = 2,214x + 132,7$	0,15	0,38	0,12	0,25	0,37	+
Невельск	$y = 4,342x + 217,0$	0,38	0,62	0,09	0,18	0,27	+
Погиби	$y = -0,627x + 166,6$	0,03	0,18	0,14	0,28	0,42	–
Пограничное	$y = 3,248x + 169,6$	0,24	0,49	0,11	0,22	0,33	+
Поронайск	$y = 1,066x + 161,0$	0,06	0,25	0,14	0,27	0,41	–
Углегорск	$y = 0,098x + 216,1$	0,00	0,00	0,14	0,29	0,43	–
Южно-Сахалинск	$y = 1,044x + 263,3$	0,04	0,20	0,14	0,28	0,42	–

ка весеннего половодья по исследуемым рекам Сахалина нет за исключением р. Тынь, где зафиксировано снижение стока. Значимых трендов наибольших срочных расходов воды не обнаружено ни по одной из исследуемых рек.

Таким образом, увеличение количества осадков не оказало влияние на сток весеннего половодья. Однако следует отметить, что в некоторых рядах данных стока есть пропуски в периоде между 1995 и 1999 гг., поэтому полученные оценки могут быть не совсем надежными.

Для выявления причин несогласованности изменений стока половодья и твердых осадков следует обратить внимание на динамику других стокоформирующих факторов, которые могут приводить к уменьшению стока, тем самым компенсируя роль увеличения осадков. Такими факторами, вероятнее всего, являются иные климатические, а также ботанические факторы как наиболее изменчивые во времени.

Так, увеличение испарения влаги с поверхности снега во время снеготаяния при наблюдающемся росте температур воздуха может приво-

дить к увеличению потерь стока. Выявлено, что за 1980–2020 гг. происходит статистически значимый рост среднемесячных температур воздуха в марте практически во всех районах острова за исключением Погиби и Углегорска (см. рис. 1) [10]. Вместе с тем температура воздуха весной определяет также интенсивность и продолжительность снеготаяния, и в связи с повышением температуры можно ожидать увеличение расходов воды, однако такого роста не наблюдается. С другой стороны, сокращение длительности половодья приводит к уменьшению объема осадков, выпавших за время половодья, и, соответственно, уменьшению стока.

Важное значение имеют осенне-зимнее увлажнение почв и глубина промерзания грунтов. Наблюдаемый рост температур воздуха в осенний период, особенно перед началом формирования снежного покрова в ноябре [10], влияет на глубину промерзания почв.

Большое влияние на потери стока оказывает транспирация. При этом рост транспирации связан с повышением температуры воздуха. Кроме

Таблица 3

Оценка значимости линейного тренда суммарного слоя стока весеннего половодья и наибольшего срочного расхода воды на реках о. Сахалин, где R^2 – коэффициент детерминации, R – коэффициент корреляции, σ_R – среднее квадратическое отклонение

Table 3

Assessment of the significance of the linear trend of the total runoff layer of the spring flood and the greatest urgent water consumption on the rivers of Sakhalin Island (R^2 – coefficient of determination, R – correlation coefficient, σ_R – the standard deviation)

Река – пост River – hydrological post	Период Period	Уравнение тренда Trend equation	R^2	R	σ_R	$2\sigma_R$	$3\sigma_R$	Значимость тренда The significance of the trend
Суммарный слой стока за половодье, мм Total runoff layer per flood, mm								
Тынь – свх. Красная Тынь	1967–2015	$y = -1,7857x + 318,08$	0,12	0,34	0,13	0,27	0,40	+
Охинка – г. Оха	1973–2015	$y = 1,2355x + 314,83$	0,02	0,15	0,16	0,32	0,48	–
Арково – п. Арково	1967–2015	$y = 0,9434x + 451,05$	0,01	0,11	0,14	0,29	0,43	–
Макарова – г. Макаров	1967–2015	$y = 2,5873x + 428,06$	0,07	0,27	0,14	0,28	0,43	–
Найба – п. Быков	1967–2015	$y = 2,5768x + 526,25$	0,06	0,24	0,14	0,29	0,43	–
Новикова – п. Новиково	1967–2015	$y = -0,0189x + 368,53$	0,00	0,03	0,15	0,30	0,46	–
Кострома – с. Костромское	1967–2015	$y = 0,7595x + 303,62$	0,02	0,12	0,15	0,30	0,45	–
Томаринка – г. Томари	1967–2015	$y = 1,1703x + 652,27$	0,01	0,11	0,15	0,30	0,45	–
Б. Александровка – с. Корсаковка	1967–2015	$y = 1,6919x + 442,41$	0,04	0,21	0,15	0,30	0,44	–
Наибольший срочный расход, м ³ /с The highest urgent consumption, m ³ /s								
Тынь – свх. Красная Тынь	1967–2015	$y = -0,2482x + 151,64$	0,01	0,09	0,15	0,30	0,45	–
Охинка – г. Оха	1973–2015	$y = -0,0145x + 4,7037$	0,02	0,14	0,16	0,32	0,48	–
Арково – п. Арково	1967–2015	$y = -0,0458x + 21,999$	0,01	0,09	0,14	0,29	0,43	–
Макарова – г. Макаров	1967–2015	$y = 0,8716x + 147,62$	0,04	0,20	0,15	0,29	0,44	–
Найба – п. Быков	1967–2015	$y = -1,3309x + 334,07$	0,03	0,16	0,15	0,30	0,45	–
Новикова – п. Новиково	1967–2015	$y = -0,1305x + 13,499$	0,07	0,27	0,14	0,28	0,42	–
Кострома – с. Костромское	1967–2015	$y = -0,0657x + 44,984$	0,00	0,05	0,15	0,30	0,46	–
Томаринка – г. Томари	1967–2015	$y = -0,9999x + 128,91$	0,07	0,27	0,14	0,28	0,43	–
Б. Александровка – с. Корсаковка	1967–2015	$y = 0,3208x + 51,121$	0,04	0,21	0,15	0,29	0,44	–

того, объемы испаряющейся влаги связаны с размером и возрастом деревьев: так, проходя определенный возрастной порог, дерево начинает потреблять все меньше воды [11]. Таким образом, наличие древесной растительности, ее состав и возраст могут во многом определять величину стока. На Сахалине нередки лесные пожары, также встречаются упоминания об уничтожении больших площадей леса вредителями,

такими как сибирский шелкопряд. В советское время активно развивалась лесная промышленность, вырубки велись также и в верховьях бассейнов рек. Все эти факторы могут менять структуру водного баланса.

Важным является и расположение метеостанций – они не характеризуют климат в горах. Метеостанции преимущественно расположены в прибрежной или долинной частях бассейнов рек.

Тем не менее средняя высота водосборов рассматриваемых водотоков составляет 30–460 м.

Так, например, количество выпадающих осадков увеличивается с высотой, а среднее значение вертикального градиента прироста высоты снежного покрова на Сахалине составляет 35 см/100 м, среднее значение годовой суммы твердых осадков – 70 мм/100 м [12]. Распределение осадков, снежного покрова и солнечной радиации, в свою очередь, зависит от морфометрических и морфологических параметров водосбора, экспозиции склонов, глубины расчленения рельефа и т. д. Отсутствие метеостанций в горных частях острова не позволяет проследить динамику климатических факторов в верховьях бассейнов рек. Вероятно, влияние ландшафтных характеристик является одной из причин, по которой отсутствуют значимые тренды суммарного слоя стока весеннего половодья. Однако оценка влияния ландшафтов на сток рек является сложнейшей задачей и требует наличия большого количества данных и в рамках настоящей работы не рассматривается.

Одна из особенностей малых рек – их более тесная связь с ландшафтом. Таким образом, процессы, происходящие на водосборе, быстрее отражаются на состоянии реки, ее стоке, в то время как факторы, определяющие формирование стока большой реки, в силу разновременности воздействия на растянутой в пространстве территории, носят взаимно сглаживающий характер [13].

Корреляционный анализ климатических факторов весеннего половодья. С целью выявления иных факторов, оказывающих влияние на сток половодья, был проведен статистический анализ данных о суммах положительных среднесуточных температур воздуха от момента начала снеготаяния до конца половодья, средних за зиму высот и плотностях снежного покрова (рис. 3, табл. 4). Анализ проводился для р. Арково–п. Арково, а климатические параметры определялись по данным метеостанции Александровск-Сахалинский, расположенной в 10 км южнее исследуемого водотока и характеризующей климат в районе водосборного бассейна (см. рис. 1). Выбор реки и метеостанции обусловлен их близостью. Данные по другим близко расположенным друг к другу метеостанциям и гидропостам, позволяющим сравнивать климатические факторы и характеристики стока рек, отсутствуют. Ряды наблюдений за климатическими

характеристиками и стоком были разбиты на два равных периода (табл. 4).

На графике видно, что исследуемые параметры, за исключением суммы осадков и высоты снежного покрова, которые между собой хорошо коррелируют, не демонстрируют заметного роста.

Согласно табл. 4, линейная корреляция слоя стока половодья с осадками во втором периоде (1993–2018 гг.) больше по сравнению с предыдущим периодом, а с суммами положительных температур воздуха во время снеготаяния – меньше.

Плотность снежного покрова, несмотря на увеличение его высоты, не обнаруживает статистически значимого изменения, а ее вклад в величину слоя стока половодья остается относительно стабильным в разных периодах.

Таким образом, анализируемые факторы по отдельности не являются решающими в формировании стока весеннего половодья на р. Арково. Полученные результаты согласуются с ранее проведенным анализом стока половодья по р. Тымь, где несмотря на существенный рост твердых осадков наблюдается заметное снижение стока [14].

Заключение

Оценка трендов твердых осадков (ноябрь–март) за период 1967–2015 гг. показала следующее: по девяти метеостанциям наблюдается значимое изменение количества твердых осадков, при этом их рост наблюдается на метеостанциях северной части острова за исключением метеостанции Погиби, и на юго-западном побережье (Невельск), снижение осадков происходит по Ильинскому и м. Крильон. Наиболее высокий коэффициент линейного тренда наблюдается на метеостанции Невельск. Таким образом, можно говорить о разнонаправленности трендов твердых осадков на Сахалине.

Анализ данных суммарного слоя стока весеннего половодья по исследуемым рекам Сахалина показал отсутствие трендов за исключением р. Тымь, где зафиксировано снижение стока. Значимых трендов наибольших срочных расходов воды не обнаружено ни по одной из исследуемых рек.

Таким образом, можно сказать, что рост и снижение количества твердых осадков не оказали значимого влияния на значение слоя стока и наибольших срочных расходов воды за поло-

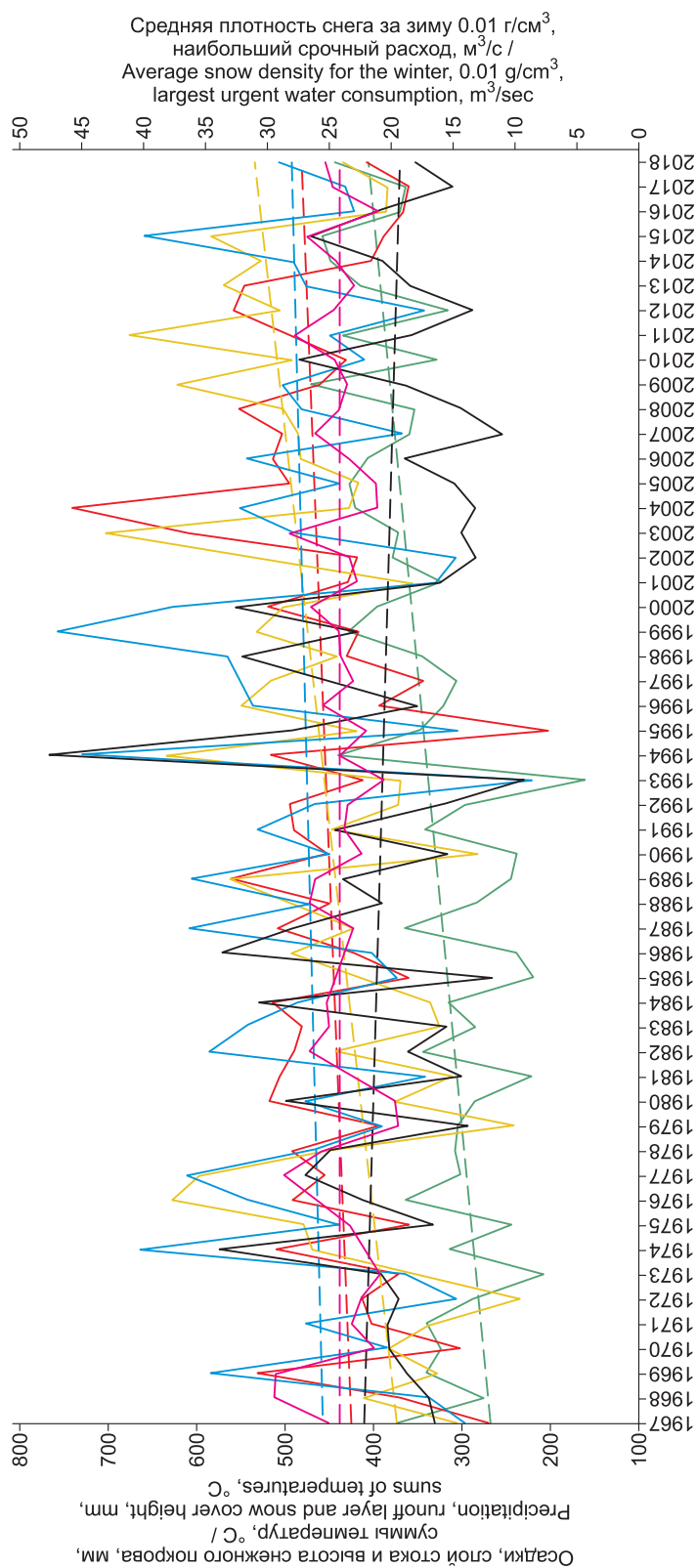


Рис. 3. Динамика суммарного слоя стока за половодье и наибольшего срочного расхода (р. Арково – п. Арково) и основных климатических факторов их формирования (ГМС Александровск-Сахалинский).

Fig. 3. Dynamics of the total runoff layer during the flood and the largest urgent expense (Arkovo river – Arkovo village) and the main climatic factors of its formation (Alexandrovo-Sakhalinsky weather station).

**Коэффициенты линейной корреляции суммарного слоя стока за половодье
на р. Арково – п. Арково и климатических параметров
по данным ГМС Александровск-Сахалинский**

Table 4

**Coefficients of the linear correlation of the total runoff layer for high water
on the Arkovo River – Arkovo village and climatic parameters
according to the data of the Alexandrovsk-Sakhalinsky weather station**

Период наблюдения Observation period	Климатические параметры Climatic parameters			
	Суммы положительных температур воздуха, °C Sums of positive air temperatures, °C	Плотность снежного покрова, г/см ³ Snow cover density, g/cm ³	Суммы осадков, мм Precipitation amounts, mm	Высота снежного покрова, мм Snow cover height, mm
1967–1992	0,72	0,29	0,38	0,52
1993–2018	0,21	0,33	0,59	0,44
1967–2018	0,39	0,30	0,44	0,44

водье. В то же время в долине Тымь-Поронайской низменности в бассейне р. Тымь при росте количества осадков наблюдается снижение слоя стока.

В результате анализа стокоформирующих метеорологических факторов для р. Арково – п. Арково по данным метеостанции Александровск-Сахалинский выявлено, что суммы положительных среднесуточных температур воздуха от момента начала снеготаяния до конца половодья и плотность снежного покрова не демонстрируют заметного изменения за весь период наблюдений.

Корреляция слоя стока половодья с осадками во втором периоде (1993–2018 гг.) больше по сравнению с предыдущим периодом (1967–1992 гг.), а с суммами положительных температур воздуха во время снеготаяния – меньше.

Исследование показало, что для оценки связи стокоформирующих факторов и стока рек необходимо рассматривать совокупность этих факторов, оценивать их взаимовлияние друг на друга. Значимое изменение отдельных параметров может не приводить к изменениям стока либо же начнет оказывать влияние позже при дальнейшей динамике. Проведение такой работы является важной задачей и требует большего количества данных, в том числе последних лет.

Литература

1. *Доклад* о климатических рисках на территории Российской Федерации / Е.М. Аментьева, Е.И. Александров, Г.В. Алексеев [и др.]. СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2017. 106 с.

2. *Влияние* изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России / В. В. Коваленко, Е. В. Гайдукова, Н. В. Викторова [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2010. № 14. С. 14–19.

3. *Трансформация* стока весеннего половодья и паводков в бассейне Верхней Волги под влиянием климатических изменений / А.В. Горбаренко, Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 4. С. 6–28. DOI 10.35567/1999-4508-2021-4-1.

4. *География* распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России / В. А. Семенов, Е. В. Гниломедов, Р. С. Салугашвили [и др.] // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. 2015. № 179. С. 108–120.

5. *Ресурсы* поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 4. Сахалин и Курилы / под ред. Е.Э. Булаховской и Г.Г. Доброумова. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 264 с.

6. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коришкова Н.Н., Швеиц Н.В.* Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394.

7. *Научно-прикладной справочник* по климату СССР (Сахалинская область) / под ред. Пильниковой З. Н. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. Серия 3, части 1–6, вып. 34. 351 с.

8. *Атлас* Сахалинской области / Под ред. П. А. Леонова. М.: ГУГК, 1967. 144 с.

9. *СП 131.13330.2018. СНиП 23-01-99** «Строительная климатология». М., 2018.

10. Боброва Д.А., Казаков А.И. Многолетняя динамика температуры воздуха на о. Сахалин и Курильских островах // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 24–31. DOI 10.25791/esip.11.2021.1261.

11. Губарева Т.С., Луников С.Ю., Гарцман Б.И., Шамов В.В., Рубцов А.В., Кожевникова Н.К. Возможности оценивания бассейновой транспирации на основе измерения стволового сокодвижения: постановка задачи // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. № 4. С. 504–532. DOI 10.34753/HS.2019.1.4.504.

12. Генсировский Ю.В. Экзогенные геологические процессы и их влияние на территориальное планирование городов (на примере о. Сахалин): Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2011. 19 с.

13. Гареев А.М., Зайцев П.Н., Комиссаров А.В. Некоторые особенности изменчивости максимальных расходов воды весеннего половодья в зависимости от влияния стокоформирующих факторов (на примере бассейнов рек Башкирского Предуралья) // Вестник Башкирского государственного университета. 2015. Т. 20, № 2. С. 478–484.

14. Анализ изменения количества осадков и гидрологического режима рек на территории Сахалинской области / Д. А. Боброва, А. И. Казаков // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 г. СПб.: ООО «Издательство ВВМ», 2020. С. 567–572.

Поступила в редакцию 16.12.2021

Поступила после рецензирования 16.03.2022

Принята к публикации 28.04.2022

Об авторах

БОБРОВА Дарья Андреевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований, Дальневосточное отделение Российской академии наук, 693023, Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-0823-2418>, e-mail: darya-kononova@yandex.ru

КАЗАКОВ Артем Иванович, ведущий инженер, Институт морской геологии и геофизики, Дальневосточное отделение Российской академии наук, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия, e-mail: legn@inbox.ru

ШЕВЧЕНКО Артем Игоревич, зав. отделом, Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, 249035, Обнинск, ул. Королева, 6, Россия, e-mail: ashevchenko@meteo.ru

Для цитирования

Боброва Д.А., Казаков А.И., Шевченко А.И. Современная динамика количества твердых осадков и слоя стока весеннего половодья на реках Сахалина // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 221–232. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-221-232>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-221-232

Current dynamics of the amount of solid precipitation and the spring flood runoff on the Sakhalin rivers

D.A. Bobrova^{1,*}, A.I. Kazakov², A.I. Shevchenko³

¹Special Research Bureau for Automation of Marine Research FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of the Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

³All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, Obninsk, Russia

*darya-kononova@yandex.ru

Abstract. This paper presents the study of the current dynamics of the spring flood runoff layer and the highest water discharge on the Sakhalin Island rivers. We have analyzed the changes in the amount of solid

precipitation, which was the main factor in the formation of the river runoff layer. The study was based on the data for the precipitation amount as reported by 13 weather stations, and the flood runoff as reported by 9 hydrological posts. We have also investigated the dynamics of other climatic parameters (the sum of the positive average daily air temperatures from the beginning of snowmelt to the end of high water; the average winter height and density of snow cover). They influenced on the spring flood runoff on the River Arkovo – Arkovo village, and were registered at the Aleksandrovsk-Sakhalinsky weather station. The analysis showed that on the territory of Sakhalin Island an increase in the amount of precipitation was detected during the cold period (November-March) at the weather stations in the northern part of the island, except for the weather station Pogibi. However, there were no significant trends in the total spring flood runoff layer on the Sakhalin rivers, except of the River Tym', where a decrease in runoff was recorded. Thus, in Sakhalin, the increase in the amount of solid precipitation did not lead to an increase in the values of the flood runoff on its rivers.

Keywords: Sakhalin Island, solid precipitation, spring flood runoff, factors of flood runoff formation

Acknowledgements. The research was carried out within the State Assignment (project number AAAA-A19-119051390002-3).

References

1. *Doklad o klimaticheskikh riskah na territorii Rossijskoj Federacii* / edited by V. M. Kattsov. Sankt-Peterburg, 2017. 106 p.
2. *Vliyaniye izmeneniya klimata na mnogoletnij sloj stoka vesennego polovod'ya rek Arkticheskoy zony Rossii* / V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Viktorova [et al.] // Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2010. No. 14. P. 14–19.
3. *Transformatsiya stoka vesennego polovod'ya i pavodkov v bassejne Verhnej Volgi pod vliyaniem klimaticheskikh izmenenij* / A.V. Gorbarenko, N.A. Varentsova, M.B. Kireeva // Water management of Russia: problems, technologies, management. 2021. No. 4. P. 6–28. DOI 10.35567/1999-4508-2021-4-1.
4. *Geografiya raspredeleniya i genezis klimatoobuslovlennykh izmenenij ekstremal'nykh raskhodov vody, opasnykh navodnenij i malovodij na rekah Rossii* [Geography of distribution and genesis of climate-conditioned changes in extreme water flow, dangerous floods and low water on the rivers of Russia] / V.A. Semenov, E.V. Gnilomedov, R.S. Salugashvili [et al.] // Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information World Data Center. 2015. No. 179. P. 108–120.
5. *Resursy poverhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya yizuchennost'*. T. 18. Dal'nij Vostok. Vyp. 4. Sahalin i Kurily [Surface water resources of the USSR: Hydrological studies. Vol. 18. Far East. Issue 4. Sakhalin and the Kuriles]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973. 264 p.
6. *Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvec N.V.* «Opisanie massiva dannykh mesyachnykh sum osadkov nastancyah Rossii» [«Description of the data array of monthly precipitation amounts at stations in Russia»] Certificate of state registration of the database No. 2015620394.
7. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR (Sahalinskaja oblast')* [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR (Sakhalin region)] // Pil'nikovoj 3. Z. (ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990, series 3, parts 1-6, no. 34. 351 p.
8. *Atlas Sahalinskoj oblasti* [Atlas of the Sakhalin region] / Edited by P. A. Leonov. M.: The Main Directorate of Geodesy and Cartography, 1967. 144 p.
9. *State Standard 131.13330.2018* «State Standard 23-01-99* Stroitel'naya klimatologiya [Construction climatology]», M, 2018.
10. *Bobrova D.A., Kazakov A.I.* *Mноголетняя динамика температуры воздуха на о. Сахалин и Курильских островах* [Long-term dynamics of air temperature on Sakhalin Island and Kuril Islands] / D.A. Bobrova, A.I. Kazakov // Environmental systems and instruments. 2021. No. 11. P. 24–31. DOI 10.25791/esip. 11.2021.1261.
11. *Gubareva T.S., Lupakov S.Y., Garmann B.I., Sharmov V.V., Rubcov A.V., Kozhevnikova N.K.* *Vozmozhnosti ocenivaniya bassejnovoj transpiracii na osnove izmereniy stvolovogo sokodvizheniya: postanovka zadachi* [Possibilities of catchment's transpiration assessment based on sap flow measurements: the problem statement] / T.S. Gubareva, S.Y. Lupakov, B.I. Garmann [et al.] // Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena. 2019. Vol. 1. Iss. 4. P. 504–532. DOI 10.34753/HS.2019.1.4.504.
12. *Gensiorovskij Y.V.* *Ekzogennye geologicheskie processy i ih vliyaniye na territorial'noe planirovaniye gorodov (na primere o. Sahalin)* [Exogenous geological processes and their impact on the territorial planning of cities (for example of Sakhalin Island)], Cand. philos. sci. diss. Irkutsk, 2011. 19 p.
13. *Gareev A.M., Zajcev P.N., Komissarov A.V.* *Nekotorye osobennosti izmenchivosti maksimal'nykh raskhodov vody vesennego polovod'ya v zavisimosti ot vliyaniya stokoformiruyushchih faktorov (na primere bassejnov rek Bashkirskego Predural'ya)* [Some features of the variability of the maximum water consumption of the spring flood depending on the influence of runoff-forming factors (on the example of river basins of the Bashkir Urals)] Bashkir State University, Vol. 20, No. 2. 2015. P. 478–484.

14. Bobrova D.A., Kazakov A.I. Analiz izmeneniya kolichestva osadkov i gidrologicheskogo rezhima rek na territorii Sahalinskoj oblasti [Analysis of changes in the amount of precipitation and the hydrological regime of rivers in the Sakhalin region]. IV Vinogradov Conference

«Hydrology: from Learning to Worldview» in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov, St. Petersburg, October 23-31, 2020. St. Petersburg State University. - Saint-Petersburg: OOO «VVM Publishing House», 2020. P. 567–572.

Submitted 16.12.2021

Revised 16.03.2022

Accepted 28.04.2022

About the authors

BOBROVA, Darya Andreevna, Cand. Sci. (Geography), senior researcher, head, Special Research Bureau for Automation of Marine Research, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 25 Gorky st., Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-0823-2418>, e-mail: darya-kononova@yandex.ru

KAZAKOV, Artem Ivanovich, leading engineer, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauka st., Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia, e-mail: legn@inbox.ru

SHEVCHENKO, Artem Igorevich, head of the Department, All-Russian RI of Hydrometeorological Information – World Data Centre, 6 Koroleva st., Obninsk 249035, Russia, e-mail: ashevchenko@meteo.ru

For citation

Bobrova D.A., Kazakov A.I., Shevchenko A.I. Current dynamics of the amount of solid precipitation and the spring flood runoff on the Sakhalin rivers // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 221–232. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-221-232>

Фтор в поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии

С.В. Федорова, Н.А. Павлова*

Институт мерзлотоведения им П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

*narpavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация. На основе обобщения результатов гидрохимических работ, выполненных сотрудниками ИМЗ СО РАН с 1984 по 2019 г., выяснено распределение фтора в пресных и слабосолоноватых поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии. Оптимальная концентрация фтора в питьевых водах, согласно санитарным требованиям, составляет 0,5–1,0 мг/л при предельно-допустимой 1,2–1,5 мг/л. Избыточное потребление фтора приводит к нарушениям в костно-мышечной, нейроэндокринной и сердечно-сосудистой системах, а недостаток – к формированию кариеса зубов. Для проведения исследований использованы химические анализы водных проб из поверхностных водотоков и водоемов (479 проб), а также из подземных вод зоны свободного водообмена (375 проб). Установлено, что в водах рек и в подземных водах подрусловых таликов среднее содержание фтора составляет не более 0,3 мг/л и не достигает оптимального уровня для питьевых вод. В водах озер и в таликах под водно-эрозионными и тукулановыми озерами также отмечается дефицит фтора. Однако, в непроточных озерах, в катионном составе воды которых более 50 % приходится на натрий-ион, содержание фтора может превышать 1,5 мг/л, а в водах таликов под непроточными термокарстовыми озерами его концентрация и вовсе достигает 3,2 мг/л. Насыщение надмерзлотных вод фтором может происходить на участках их разгрузки под влиянием процессов криогенной дезинтеграции водовмещающих пород и метаморфизации химического состава воды при фазовых переходах, которые приводят к выпадению из раствора кальцита, повышению его pH и накоплению фтора.

Ключевые слова: фтор, река Лена, малые реки, озера, талики, надмерзлотные воды, химический состав

Благодарности. Работа частично выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-05-00670. Авторы выражают искреннюю благодарность Бойцовой Л.Ю. и Шепелевой О.В. (ИМЗ СО РАН), выполнявшим аналитические исследования водных проб, Шепелеву В.В. (ИМЗ СО РАН) за ряд полезных замечаний.

Введение

Одним из химических элементов, количество которых регламентируется в питьевых водах, является фтор. Его предельно-допустимая концентрация в зависимости от климатической зоны составляет от 1,2 до 1,5 мг/л, а рекомендуемое содержание определено в количестве 0,5–1,0 мг/л [1–5]. Высокие концентрации потребления фтора оказывают токсическое воздействие на костно-мышечную, нейроэндокринную и сердечно-сосудистую системы, низкие – приводят к формированию кариеса зубов [1–4, 6–8].

При изучении фторсодержащих вод в разных регионах мира большинство исследователей связывают высокие концентрации этого элемента с растворением флюорита и его десорбцией из водовмещающих пород в условиях щелочной сре-

ды и низкой концентрации кальция [9–12]. Кроме этого, среди факторов, способствующих накоплению фтора в подземных водах, называют испарительное концентрирование, ионный обмен, антропогенное загрязнение подземных вод.

Фтор относительно широко распространен в природе. Среднее его содержание в литосфере составляет 400–800 мг/кг [13, 14]. Наиболее обогащены им гранитные породы, в которых концентрация фтора изменяется от 500 до 1400 мг/кг, составляя в среднем 810 мг/кг [15, 16]. В карбонатных осадочных образованиях, песках и песчаниках его среднее содержание 330 мг/кг [17]. Концентрация фтора в воде океанов составляет около 1,3 мг/л [18–20]. В пресных и слабосолоноватых природных водах его содержание изменяется от следовых значений в реках до 16 мг/л и

более в подземных водоносных комплексах [9, 10, 21, 22]. Превышенные концентрации фтора в подземных водах чаще всего отмечаются в регионах с тропическим климатом [9, 23–25].

Для территории криолитозоны сведения о содержании фтора в пресных подземных водах единичны. Известно, что в надмерзлотных грунтовых водах криолитозоны России среднее содержание фтора в среднем составляет 0,1–0,3 мг/л, а на территории Аляски и Канады – 0,08–0,1 мг/л [10, 26]. В области островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых пород в надмерзлотных водах количество фтора в Восточной Сибири на Алданском плато не превышает 0,4 мг/л, а в Западном Забайкалье изменяется от 0,1 до 0,6 мг/л [27–29]. На территории сплошной криолитозоны распределение фтора изучалось, в основном, в подмерзлотных водах Центральной Якутии [30–35]. Установлено, что в подмерзлотных водоносных горизонтах этого региона содержание фтора может в 1,5–10 раз превышать нормативы для питьевых вод. В связи со столь значительным его содержанием подмерзлотные воды могут использоваться для питьевых целей только после предварительной водоподготовки.

Цель данной работы – изучение распределения фтора в поверхностных водах и подземных водах зоны свободного водообмена на территории Центральной Якутии. Этот обширный регион Якутии наиболее населен. Несмотря на наличие многочисленных озер и крупных рек (Лена, Вилуй, Алдан и их притоки), вопросы питьевого водообеспечения здесь стоят весьма остро. Основными причинами этому служат: 1) отдаленность гарантированного поверхностного источника водоснабжения от населенных пунктов; 2) ограниченность ресурсов пресных подземных вод из-за наличия мощной толщи многолетнемерзлых пород, выступающей в роли регионального криогенного водоупора; 3) несоответствие отдельных показателей качества подземных вод действующим нормативам, в том числе по повышенному содержанию в них фтора.

Материалы и методы исследований

Материалом для написания данной работы послужили результаты гидрохимических анализов, выполненные в Центральной Якутии сотрудниками ИМЗ СО РАН с 1984 по 2019 г., а также фонды различных геологических организаций. При обработке данных использовались

результаты химических анализов водных проб из рек (183 пробы) и озер (296 проб). В выборку включены пробы воды, отобранные из скважин, вскрывших подрусловые талики (75 проб), подозерные талики термокарстовых и эрозийно-термокарстовых котловин (81 проба), подозерные талики, приуроченные к водно-эрозийным и тукулановым озерам (33 пробы). Также привлечены данные определения фтора в надмерзлотных водах сезонно-талого слоя (86 проб), надмерзлотных грунтовых и межмерзлотных водах субэдральных таликов (100 проб).

При обработке результатов химических анализов использовались пробы воды, минерализация которых не превышала 3 г/л. Определение в них суммарной концентрации фторидов проводилось потенциометрическим методом с использованием фторидного ионселективного электрода.

Природные условия территории и гидрохимическая характеристика поверхностных вод

Исследуемая территория расположена в пределах Якутского артезианского бассейна, 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 [35]. Горные породы проморожены, в среднем, до глубины 300–450 м [35]. Значительное снижение мощности мерзлых пород вплоть до образования сквозных таликов отмечается лишь под основным руслом р. Лена, ее крупными притоками и под отдельными крупными озерами. Распределение надмерзлотных таликов по площади неравномерное. Коэффициент таликовости, определяемый как отношение суммарной площади таликов к площади их распространения, изменяется от менее 0,5 до более 4 [35] (рис. 1). На гидродинамический и гидрохимический режим надмерзлотных грунтовых вод таликов оказывают влияние не только многолетние циклические изменения климата, но и краткосрочные колебания метеорологических параметров. В результате воздействия процессов многолетнего и сезонного промерзания-протаивания водовмещающих пород надмерзлотные грунтовые воды приобретают разнообразный химический состав с широким спектром микроэлементов.

Одной из особенностей региона является слабое развитие речной сети, густота которой изменяется от менее 0,1 до 0,3 км/км². Этому

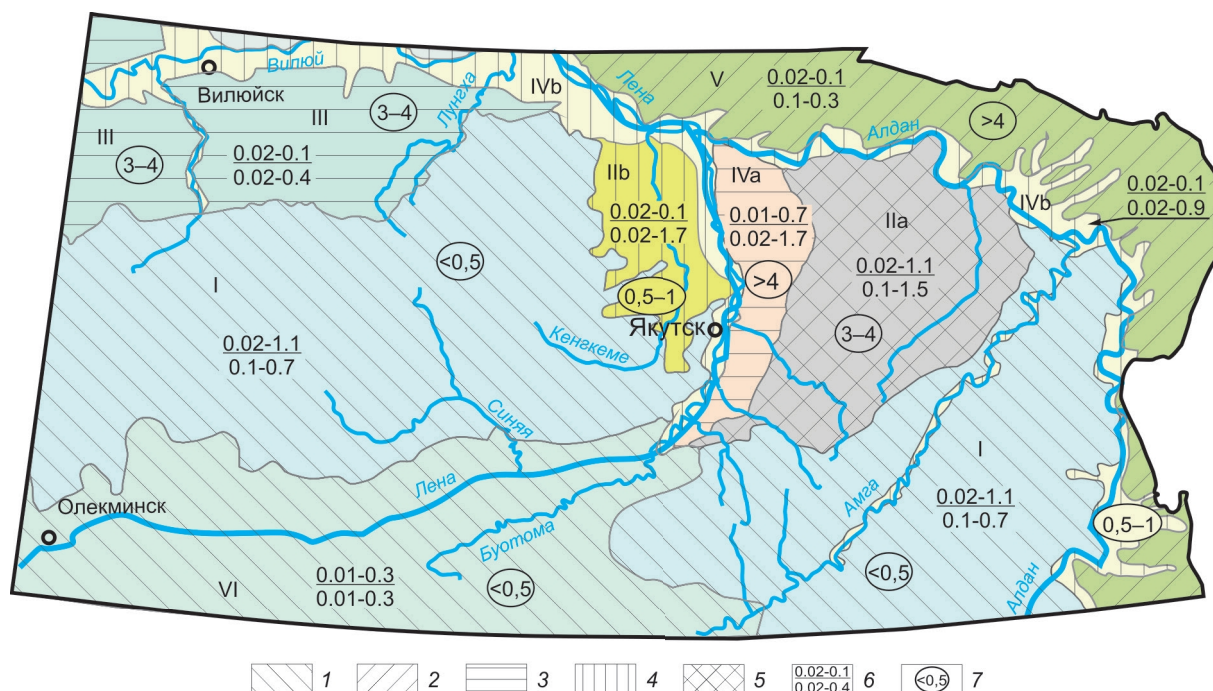


Рис. 1. Геоморфологическая схема района исследований.

Типы рельефа: I–V – равнины (I – денудационная; II – эрозионно-аккумулятивная: IIa – Абалахская, IIb – левобережье р. Лена; III – озерно-аллювиальная Лено-Вилуйская; IV – аллювиальная: IVa – средневысотные надпойменные террасы р. Лена (кердемская, бестяхская, тунгюлюнская), IVb – эрозионно-аккумулятивная на левобережье р. Лена, пойма и низкие надпойменные террасы рек Лена, Алдан, Вилуй и их притоков; V – предгорная ледниковая); VI – Приленское плато. 1–5 – преобладающий генезис озерных котловин: 1 – водно-эрозионный и эрозионно-термокарстовый, реже термокарстовый, 2 – термокарстовый и эрозионно-термокарстовый, 3 – водно-эрозионный и тукулановый, реже термокарстовый, 4 – водно-эрозионный, 5 – термокарстовый; 6 – коэффициент таликовости территории [35].

Fig. 1. Geomorphological scheme of the study area.

Relief types: I–V – plains: I – denudation plain; II – erosion-accumulative plain: IIa – Abalakhskaya plain, IIb – left bank of the Lena river; III – lacustrine-alluvial Lena-Vilyui plain; IV – alluvial plain: IVa – medium-height above-floodplain terraces of the Lena river (Keremskaya, Bestyakhskaya, Tyungyulyunskaya), IVb – erosion-accumulative plain on the left bank of the Lena river, floodplain and low above-floodplain terraces of the Lena, Aldan, Vilyui rivers and their tributaries; V – foothill glacial plain; VI – Prilenskoe plateau. 1–5 – predominant genesis of lake basins: 1 – water-erosion and erosion-thermokarst, less often thermokarst, 2 – thermokarst and erosion-thermokarst, 3 – water-erosion and tukulan, less often thermokarst, 4 – water-erosion, 5 – water-thermokarst; 6 – coefficient of talik area of the territory [35].

способствует равнинный рельеф, малое количество атмосферных осадков, слабо протекающие эрозионные процессы и наличие большого числа замкнутых озерно-аласных котловин, аккумулирующих сток с водосборных поверхностей.

Наиболее полноводны реки Лена, Алдан и Вилуй. Основную долю в формировании их стока составляют талые снеговые и дождевые воды. На подземное питание этих рек приходится около 13–17 % [36]. Большинство малых рек в регионе имеет непостоянный сток. Основной его годовой объем (80–90 %) приходится на период весеннего половодья. Летом питание малых рек происходит за счет атмосферных осадков и различных типов надмерзлотных вод. К концу теплого периода года отдельные водото-

ки пересыхают, а в зимний период на большинстве малых рек сток прекращается полностью. Минерализация воды в реках летом обычно не превышает 0,05–0,4 г/л, ее химический состав гидрокарбонатный магниево-кальциевый, реакция среды (pH) – нейтральная (табл. 1). Зимой при отсутствии атмосферного питания, минерализация воды р. Лена увеличивается до 0,3–0,7 г/л, а ее состав становится хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам [33]. В других реках рассматриваемой территории смены химического типа по сезонам не отмечается. Для всех опробованных водотоков характерен дефицит содержания фтора.

На территории исследований широко распространены озера различного генезиса. Большин-

Основные гидрохимические показатели рек и озер Центральной Якутии

Table 1

The main hydrochemical indicators of rivers and lakes in Central Yakutia

Водные объекты Water bodies	Минерализация, г/л Total dissolved solids, g/L	Химический тип воды (по преобладающим ионам) Chemical type of water (by predominant ions)	pH	Содержание фтора, мг/л Fluorine content, mg/L
Лена, Алдан, Вилюй ($n = 74$) Lena, Aldan, Vilyui rivers ($n = 74$)	0,1–0,3	HCO ₃ Mg–Ca Cl–HCO ₃ Ca–Mg–Na	6,5–7,3	0,02–0,1
Малые реки ($n = 109$) Small rivers ($n = 109$)	0,05–0,4	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	6,2–8,0	0,1–0,3
Водно-эрозионные и тукулановые озера ($n = 81$) Water-erosion and tukulan lakes ($n = 81$)	0,02–0,9	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg HCO ₃ Na–Mg–Ca	5,4–9,8	0,01–0,7
Эрозионно-термокарстовые и термокарстовые озера ($n = 215$) Erosion-thermokarst and thermokarst lakes ($n = 215$)	0,04–2,0	HCO ₃ Mg HCO ₃ Na–Ca–Mg HCO ₃ Na–Mg	6,0–9,8	0,2–1,1

ство из них относятся к термокарстовым и эрозионно-термокарстовым, они занимают 20–30 % территории [37, 38]. Это небольшие по площади (до 1 км²) озера с глубиной менее 2 м, полностью промерзающие в зимний период [39]. Реже встречаются термокарстовые водоемы глубиной 7–18 м [40]. Химический состав поверхностных вод в них зависит от стадии развития и проточности озерной котловины. В молодых полноводных термокарстовых водоемах вода слабоминерализована (0,6–0,8 г/л), имеет гидрокарбонатный, смешанный по катионам (обычно с преобладанием ионов кальция и магния) состав [31]. Соленость зрелых озер, как правило, превышает 1 г/л, среди анионов преобладают также гидрокарбонаты, а главными катионами становятся натрий и магний. Реакция водной среды в термокарстовых водоемах изменяется в широком диапазоне – от нейтральной до весьма щелочной, а содержание фтора – от 0,2 до 1,1 мг/л.

Водно-эрозионные озера развиты на поймах, а также на низких и средневысотных надпойменных террасах рек. Преобладающая глубина озер этого генезиса составляет 3 м, реже – до 6,3 м [41]. Химический состав их воды наследует состав поверхностных водотоков, с которыми они связаны. Вблизи г. Якутск в условиях слабой дренированности водосборной площади минерализация водоемов часто превышает 1 г/л, а в формировании их химического состава возрастает роль ионов хлора и натрия [42]. Величина

водородного показателя воды в озерах этого генезиса варьирует от слабокислой до щелочной, а содержание фтора близко к его концентрации в водотоках.

К своеобразным природным комплексам Центральной Якутии относятся массивы эоловых отложений (тукуланы). Область их распространения охватывает песчаные террасы древних и современных долин рек Вилюй, Лена и их крупных притоков. Эоловые отложения образуют дюны, как закрепленные растительностью, так и подвижные. Озера, приуроченные к древним котловинам выдувания, межгрядовым понижениям и навесным котловинам, преимущественно мелководны (глубина до 3 м). На территориях современных развееваемых песков встречаются озера глубиной до 15–25 м [43]. Часть водоемов имеет поверхностный сток или гидравлическую связь с водами межмерзлотных таликов. В бассейне р. Вилюй на площадях подвижных тукуланов озера весьма пресные (минерализация 0,02–0,03 г/л), состав гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, реакция водной среды слабо кислая и нейтральная. На Лено-Амгинском междуречье на участках закрепленных песчаных массивов количество растворенных веществ в водоемах на порядок выше (0,2–0,9 г/л), среди катионов также преобладают гидрокарбонат-ионы, катионный состав кальциево-магниевый или смешанный, по величине водородного показателя вода нейтральная или слабо щелочная. В тукула-

новых озерах в бассейне р. Вилюй содержание фтора незначительно – 0,02–0,05 мг/л, а на правобережье р. Лена при преобладании в составе воды катионов кальция изменяется от 0,05 до 0,7 мг/л, в натриевых водах – от 0,7 до 1,7 мг/л.

Распространение надмерзлотных вод и содержание в них фтора

В Центральной Якутии к зоне свободного водообмена приурочены надмерзлотные воды сезонно-талого слоя (СТС), надмерзлотные грунтовые воды и воды надмерзлотно-межмерзлотных таликов.

Надмерзлотные воды сезонно-талого слоя формируются в мае–июне на криогенном водоупоре и обычно в декабре–феврале промерзают [44]. Водовмещающими отложениями являются современные рыхлые образования различного генезиса. Глубина залегания надмерзлотных вод СТС летом составляет 1,5–1,9 м, а мощность обводненной части разреза 0,2–1,2 м. Питание их осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, и в меньшей степени – вытаивания льда из промерзших за зиму пород и конденсации водяных паров в зоне аэрации. На площадях распространения песчаных отложений надмерзлотные воды СТС ультрапресные (минерализация 10–28 мг/л), гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, по величине pH слабокислые или нейтральные. Содержание в них фтора 0,01–0,2 мг/л. Надмерзлотные воды СТС, которые формируются в супесчано-суглинистых отложениях, обычно более минерализованы (табл. 2). В их анионном составе преобладает гидрокарбонат-ион при повышенном содержании хлора, среди катионов превалирует натрий, реакция водной среды изменяется от нейтральной до щелочной. Содержание фтора в надмерзлотных водах СТС варьирует от следовых значений до 1,4 мг/л, а на урбанизированных территориях достигает 7,7–9,3 мг/л.

Формирование состава подземных вод субаквальных таликов происходит в тесном их взаимодействии с поверхностными водами и вмещающими породами. Так, в районе г. Якутск под протоками р. Лена мощность надмерзлотных таликов 30–53 м. Водоносные породы – аллювиальные песчаные и песчано-гравийные отложения четвертичного возраста и подстилающие их терригенные песчаники и алевролиты средней юры или мела. Химический состав подземных вод аллювиального водоносного горизонта схо-

ден с составом воды р. Лена. Минерализация подрусловых вод зимой 0,6–0,8, а летом она уменьшается до 0,4–0,5 г/л [45]. Их химический состав гидрокарбонатный или хлоридно-гидрокарбонатный смешанный по катионам. Содержание фтора в подземных водах, приуроченных к аллювию, как и в р. Лена, менее 0,2 мг/л. В подстилающих алевролитах и песчаниках, фильтрационные свойства которых уступают рыхлым четвертичным отложениям, минерализация воды увеличивается до 0,9 г/л, состав ее хлоридно-гидрокарбонатный натриевый, реакция водной среды слабощелочная, а содержание фтора достигает 1,0 мг/л.

Под малыми промерзающими до дна реками подрусловые отложения, представленные суглинистыми разностями, обычно промерзают в зимний период. При наличии хорошо фильтрующих песчано-галечниковых образований и трещиноватых карбонатных пород даже при периодическом отсутствии поверхностного стока зимой могут сохраняться надмерзлотные талики. Так, под правобережными притоками р. Лена бурением установлены подрусловые талики мощностью от 5–6 до 30–60 м [31, 33, 35, 42]. Минерализация воды в них составляет 0,2–0,4 г/л, ее состав гидрокарбонатный магниевый-кальциевый. Эти воды по величине водородного показателя нейтральные или слабощелочные, а содержание в них фтора менее 0,3 мг/л.

Под термокарстовыми озерами глубина таликов зависит от стадии развития озерной котловины, площади водной поверхности водоема, мощности донных биогенных илов и литологического состава подстилающих пород [46, 47]. Под промерзающими до дна озерами талые породы прослеживаются до глубины 5–10 м. Под крупными термокарстовыми водоемами мощность таликов может достигать 100 м и более. Для глубоких таликов типичен слоистый разрез. Верхнюю его часть слагают суглинки с маломощными прослоями супесей и песка, нижнюю – пески с прослоями супесей и суглинков. Эти отложения с глубиной сменяются глинами, алевролитами, аргиллитами и песчаниками либо известняками и доломитами. Химический состав воды в замкнутых таликах неоднороден по разрезу. В четвертичных отложениях минерализация воды около 0,5–1 г/л, состав гидрокарбонатный, смешанный по катионам, реакция водной среды нейтральная. С глубиной растет соленость воды, ее состав становится хлоридно-гидрокарбонат-

**Осредненные химические показатели надмерзлотных вод СТС
и надмерзлотных грунтовых вод субаэриальных таликов**

Table 2

**Averaged chemical indicators of the suprapermafrost waters of the active layer
and the suprapermafrost groundwaters of subaerial taliks**

Литологический состав водоносных пород Lithological composition of water-bearing rocks	Минерализация, г/л Total dissolved solids, g/L	Химический тип воды (по преобладающим ионам) Chemical type of water (by predominant ions)	pH	Содержание фтора, мг/л Fluorine content, mg/L
<i>Надмерзлотные воды сезонного слоя</i> <i>Suprapermafrost waters of the active layer</i>				
Пески (n = 10) Sand (n = 10)	0,01–0,05	HCO ₃ Mg–Ca	6,0–7,7	0,01–0,2
Супеси, пески (n = 76) Sandy loam, sands (n = 76)	1–3	Cl–HCO ₃ Ca–Mg–Na	6,9–9,2	0,01–1,4
<i>Надмерзлотные воды субаэриальных таликов</i> <i>Suprapermafrost groundwaters of subaerial taliks</i>				
Пески (n = 66) Sand (n = 66)	0,05–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,0–8,0	0,01–0,2
Пески при наличии в зоне аэрации супесчано-суглинистых разностей (n = 20) Sands in the presence of sandy-loamy varieties in the vadoze zone (n = 20)	0,09–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,0–8,3	0,3–1,1
<i>Межмерзлотные воды субаэриальных таликов</i> <i>Intrapermafrost groundwaters of subaerial taliks</i>				
Пески, гравийно-галечные отложения, известняки, доломиты (n = 9) Sands, gravel-pebble deposits, limestones, dolomites (n = 9)	0,1–0,2	HCO ₃ Mg–Ca HCO ₃ Ca–Mg	7,3–8,4	0,3–0,7
Пески, гравийно-галечные отложения, песчаники, алевролиты (n = 5) Sands, gravel-pebble deposits, sandstones, siltstones (n = 5)	0,2–0,5	HCO ₃ Na–Ca–Mg HCO ₃ Ca–Na–Mg	7,0–8,2	0,5–1,5

ным магниевно-натриевым, pH увеличивается до 7,8–8,7. Нередко в подобных таликах встречаются гидрохимические инверсии, причинами которых являются наличие в разрезе слабопроницаемых пород и разные условия их промерзания. При отсутствии водоупорных слоев состав и минерализация воды в таликах изменяются мало [46]. Содержание фтора в пресных подземных водах обычно составляет 0,1–0,7 мг/л, в солоноватых достигает 1,0–3,2 мг/л.

Под небольшими мелководными водно-эрозийными и тукулановыми озерами мощность таликов, как правило, ограничивается 10–20 м,

а при глубине воды 2–3 м и ширине 100–200 м она увеличивается до 30–40 м [46]. В долине р. Виллой на площади распространения подвижных песков мощность чаши протаивания под озерами достигает 80–100 м и более [44]. Под проточными водоемами в четвертичных и меловых терригенных отложениях минерализация подземных вод составляет 0,4–0,8 мг/л. Их химический состав обычно сходен с поверхностными водами, реакция водной среды слабокислая или нейтральная, а содержание фтора не превышает 0,4 мг/л. На Лено-Амгинском междуречье в подоцерных таликах четвертичный водо-

носный горизонт нередко гидравлически связан с кембрийским карбонатным комплексом. В нижних слоях разреза таких таликов подземные воды более минерализованы (до 0,6 г/л), их состав преимущественно гидрокарбонатный натриево-кальциевый или магниевый-натриевый, по величине pH воды нейтральные, реже слабощелочные, содержание в них фтора может достигать 1,2–1,7 мг/л (рис. 2).

В золотых отложениях средневысотных надпойменных террас рек Лена и Вилюй широко развиты субэральные водоносные надмерзлотные талики мощностью 4–15 м [44, 48–50]. Минерализация надмерзлотных грунтовых вод изменяется от 0,04–0,07 мг/л на водосборной площади р. Вилюй до 0,05–0,2 г/л в бассейне р. Лена. В составе подземных вод среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, среди катионов – ионы магния и кальция. Реакция водной среды изменяется от слабокислой до нейтральной. На участках, где надмерзлотный водоносный горизонт перекрывают пески, содержание фтора в водных пробах не превышает 0,1–0,2 мг/л, а при наличии в зоне аэрации супесчано-суглинистых отложений достигает 0,6 мг/л.

В областях транзита надмерзлотные грунтовые воды нередко преобразуются в межмерзлотные, а в областях разгрузки, изливаясь на поверхность, они формируют наледи [33, 48, 49]. Отличительной чертой источников, образованных водами субэральных надмерзлотно-межмерзлотных таликов, является их большая насыщенность фтором (0,5–1,5 мг/л) [51]. Важное значение в обогащении подземных вод этим элементом, помимо литологического состава водовмещающих отложений, вероятно, приобретают процессы криогенеза в очагах их разгрузки [31]. Многократные ежедневные фазовые переходы в пределах наледных долин в течение октября – мая приводят к криогенному дроблению водовмещающих горных пород и минералов на более мелкие обломки. Так, А.М. Аксюк [52], проводивший эксперименты по выщелачиванию фтора водой из раздробленных магматогенных горных пород, установил, что при комнатных температурных условиях уже в первые минуты взаимодействия раствора с порошковыми пробами пород концентрация галогена в воде увеличивается на 1,5–3,0 порядка. При этом наблюдается увеличение pH раствора от 6,2 до 7–8. Аналогичный процесс, возможно не такой интенсивности, вполне может протекать и в условиях Централь-

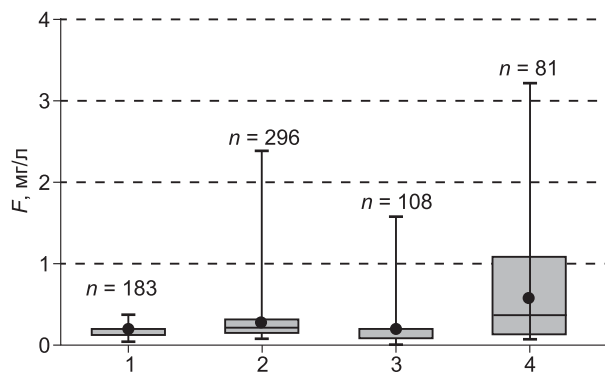


Рис. 2. Диаграмма изменения концентрации фтора в поверхностных и надмерзлотных грунтовых водах Центральной Якутии (n – количество точек опробования):

1 – в реках; 2 – в озерах; 3 – в подрусловых таликах и таликах под водно-эрозийными и тукулановыми озерами; 4 – в таликах под термокарстовыми и эрозийно-термокарстовыми озерами.

Fig. 2. Diagram of changes in fluorine concentration in surface and suprapermafrost groundwaters of Central Yakutia (n is the number of sampling points):

1 – in rivers; 2 – in lakes; 3 – in channel taliks and taliks under water-erosional and tukulan lakes; 4 – in taliks under thermokarst and erosion-thermokarst lakes.

ной Якутии. На границе с мерзлыми породами при сезонной кристаллизации пресной воды повышается вероятность выпадения из раствора в осадок карбонатов кальция, которые остаются в мерзлой породе или переносятся фильтрующей водой [31, 53, 54]. Осаждение кальцита сопровождается выделением углекислоты, которая участвует в гидролитическом расщеплении кварц-полевошпатовых песков, слагающих водоносный горизонт, и активизирует переход в раствор химически активных элементов, в число которых входит фтор.

Заключение

В Центральной Якутии в поверхностных водах среднее содержание фтора, в целом, незначительно отличается от среднего значения для рек вне криолитозоны и не достигает оптимального уровня для питьевых вод. Вместе с тем, в непроточных озерах, когда в катионном составе воды более 50 % приходится на натрий-ион, концентрация фтора может превышать 1,5 мг/л.

В подземных водах несквозных субаквальных таликов в четвертичных водоносных горизонтах содержание фтора близко к его концентрации в водоемах и водотоках, с которыми связаны эти талики. При ухудшении фильтрационных свойств с глубиной и смене литологического со-

става водовмещающих пород содержание фтора в воде таликов увеличивается до 1,0–3,2 мг/л. Такое же количество этого элемента обнаруживается в надмерзлотных грунтовых водах подозерных таликов, приуроченных к термокарстовым котловинам.

Надмерзлотные воды, изначально обедненные фтором, могут насыщаться им на участках их разгрузки. Активно развивающиеся здесь процессы криогенной дезинтеграции водовмещающих пород и метаморфизации химического состава воды при фазовых переходах приводят к выпадению из раствора кальцита, повышению его pH и накоплению фтора.

Литература

1. Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E., Povoroznik V., Toth G., Hope B.C., Iljinsky U., Baker J. A health risk assessment for fluoride in Central Europe // *Environ. Geochem. Health*. 2007. Vol. 29. P. 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9076-7>.
2. Ozsvath D.L. Fluoride and environmental health: a review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. Vol. 8. P. 59–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
3. Донских И.В. Влияние фтора и его соединений на здоровье населения (обзор литературных данных) // *Бюллетень ВШНЦ РАМН*. 2013. № 3 (91), ч. 1. С. 179–185.
4. WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, 2017. 631 p.
5. Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B., Ghaderpoury A., Dehghani M.H., Ghaderpoori M., Mohammadi A.A. Distribution of fluoride contamination in drinking water resources and health risk assessment using geographic information system, northwest Iran // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2019. Vol. 107. 104408. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.104408>.
6. *Fluoride in Drinking-water*. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization. 2004. 17 p. WHO/SDE/WSH/03.04/96. English only.
7. Aghapour S., Bina B., Tarrahi M.J., Amiri F., Ebrahimi A. Distribution and health risk assessment of natural fluoride of drinking groundwater resources of Isfahan, Iran, using GIS // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190. P. 137. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6467-z>.
8. Калужная Е.Э., Просеков А.Ю., Волобаев В.П. Генотоксические свойства фторид-иона (обзор литературы) // *Гигиена и санитария*. 2020. Т. 99, № 3. С. 253–258. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258>.
9. Шварцев С.Л., Рыженко Б.Н., Алексеев В.А., Дутова Е.М., Кондратьева И.А., Копылова Ю.Г., Лепкурова О.Е. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода. Т. 2: Система вода – порода в условиях гипергенеза. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.
10. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. М.: Недра, 1987. 237 с.
11. Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.А. Модель формирования фтороносных вод в каменноугольных отложениях Московского артезианского бассейна // *Геохимия*. 2007. № 9. С. 981–998.
12. Thapa R., Gupta S., Gupta A., Gupta A., Reddy D.V., Kaur H. Geochemical and geostatistical appraisal of fluoride contamination: An insight into the Quaternary aquifer // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641, No. 1. P. 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.360>.
13. Вернадский В.И. Избранные сочинения. Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 615 с.
14. Янин Е.П. Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // *Экологическая экспертиза*. 2007. № 4. С. 2–98.
15. Krauskopf K.B., Bird D.K. Introduction to Geochemistry. New York: McGraw-Hill, 1995. 647 p.
16. Wedepohl K.H. Handbook of geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1969. Vol. II-1. 442 p.
17. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
18. Turekian K.K. Chemistry of the Earth: Holf, Rinehart and Winston Inc. USA, 1972. 136 p.
19. Химия океана. Т. 1. Химия вод океана. М.: Наука, 1979. 518 с.
20. Гордеев В.В. Речной сток в океан и черты его геохимии. М.: Наука, 1983. 160 с.
21. Гордеев В.В. Новая оценка поверхностного стока растворенных веществ в океан // *Докл. АН СССР*. 1981. Т. 261, № 5. С. 1227–1230.
22. Аничкина Н.В. Исследования биогеохимии фтора в компонентах геосистем // *Научное обозрение. Биологические науки*. 2016. № 3. С. 5–23.
23. Brindha K., Elango L. Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures // Monroy S.D. (Ed.). *Fluoride Properties, Applications and Environmental Management*. Publisher Nova, 2011. P. 111–136.
24. Subba Rao N. Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10, No. 524. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3291-7>.
25. Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N. Fluoride Levels in Surface and Groundwater in Africa: A Review // *American Journal of Water Science and Engineer-*

- ing. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20170301.11>.
26. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.
27. *Филимонова Л.Г.* Геохимия фтора в зоне гипергенеза областей многолетней мерзлоты. М.: Наука, 1977. 152 с.
28. *Замана Л.В., Усманова Л.И., Усманов М.Т.* Эколого-геохимическая оценка подземных вод в окрестностях г. Чита, используемых жителями города для децентрализованного водоснабжения // Вода: химия и экология. 2011. № 12 (42). С. 105–109.
29. *Кашин В.К., Афанасьева Л.В., Убугунов Л.Л.* Фтор в компонентах ландшафтов Западного Забайкалья // Агрохимия. 2015. № 10. С. 38–49.
30. *Анисимова Н.П.* Фтор в питьевых водах Центральной Якутии // Труды Сев.-Вост. отд-ния Ин-та мерзлотоведения. Якутск. 1958. Вып. 1. С. 125–133.
31. *Анисимова Н.П.* Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
32. *Анисимова Н.П., Голованова Т.В.* Содержание фтора в подмерзлотных водах Центральной Якутии и методы снижения его концентрации // Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. Якутск: Кн. изд-во, 1972. С. 158–163.
33. *Анисимова Н.П., Павлова Н.А.* Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 189 с.
34. *Павлова Н.А., Федорова С.В.* Фтор в пресных и слабосолоноватых водах в области криолитозоны (Центральная Якутия) // Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 171–174. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-171-174>.
35. *Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И.* Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 137 с.
36. *Джамалов Р.Г., Кричевец Г.Н., Сафронова Т.И.* Современные изменения водных ресурсов в бассейне р. Лены // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 2. С. 147–160.
37. *Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 125 с.
38. *Жирков И.И.* Схема лимногенетической классификации озер Северо-Востока России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2014. № 34. С. 18–25.
39. *Ушницкая Л.А., Пестрякова Л.А., Субетто Д.А., Троева Е.И.* Морфометрическая характеристика озер Лено-Амгинского междуречья // Наука и образование. 2014. № 4. С. 71–76.
40. *Аржакова С.К., Жирков И.И., Кусатов К.И., Андросов И.М.* Реки и озера Якутии: краткий справочник. Якутск: Бичик, 2007. 136 с.
41. *Городничев Р.М., Ушницкая Л.А., Ядрихинский И.В., Спиридонова И.М., Колмогоров А.И., Фролова Л.А., Пестрякова Л.П.* Морфометрические и гидрохимические особенности водно-эрозионных озер северных рек Якутии // Вестник СВФУ. 2014. Т. 11, № 6. С. 30–37.
42. *Анисимова Н.П., Павлова Н.А., Стамбовская Я.В.* Химический состав подземных вод таликов долины среднего течения реки Лены // Наука и образование. 2005. № 4. С. 92–96.
43. *Шепелев В.В.* Подземные воды тукуланов Центральной Якутии // Эоловые образования Центральной Якутии. Якутск: Издание Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1981. С. 30–41.
44. *Шепелев В.В.* Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 169 с.
45. *Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M., Popov V.* Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia // Geosciences. 2020. Vol. 10(5). P. 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>.
46. *Анисимова Н.П.* Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере Центральной Якутии). М.: Наука, 1971. 195 с.
47. *Тишин М.И.* Геотермические условия формирования подошренных таликов в Центральной Якутии: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1982. 14 с.
48. *Бойцов А.В.* Особенности режима источников пресных вод Центральной Якутии в свете экологии транспортного строительства // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 2. Подземные воды и наледи. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1996. С. 46–62.
49. *Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Оберман Н.Г., Петченко М.Ф., Н.П. Анисимова и др.* Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2002. 172 с.
50. *Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.* Надмерзлотные субэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII, № 1. С. 40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).
51. *Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V.* Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web Conf. 2019. Vol. 98. 07024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807024>.
52. *Аксюк А.М.* Режим фтора в глубинных гидротермальных флюидах и приповерхностных водах

(экспериментальные исследования): Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: Институт экспериментальной минералогии РАН, 2007. 59 с.

53. Иванов А.В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих

и талых вод. Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1998. 164 с.

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

Поступила в редакцию 22.12.2021

Поступила после рецензирования 15.02.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Об авторах

ФЕДОРОВА Светлана Викторовна, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3175-0918>, Researcher ID: V-9524-2018, veta_f@mail.ru

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, na-pavlova@yandex.ru

Для цитирования

Федорова С.В., Павлова Н.А. Фтор в поверхностных и надмерзлотных водах Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 233–245. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245

Fluorine in surface and suprapermafrost waters in Central Yakutia

S.V. Fedorova, N.A. Pavlova*

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

*napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract. We studied the distribution of fluorine in fresh and slightly salty surface waters, and suprapermafrost waters in Central Yakutia. The study was based on the results of hydrochemical works carried out by employees of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS from 1984 to 2019. According to the sanitary requirements, the optimal concentration of fluorine in drinking water is 0.5–1.0 mg/L, with its maximum concentration 1.2–1.5 mg/L. Excessive intake of fluoride leads to disorders in the musculoskeletal, neuroendocrine and cardiovascular systems, while its deficiency leads to formation of dental caries. We used chemical analyzes of water samples from the surface streams and water bodies (479 samples), and underground waters of the vadoze zone (375 samples). The analyzes of water samples in the rivers and channel taliks showed that the average content of fluorine was no more than 0.3 mg/L, which did not reach the requirement for its optimal level for drinking water. The analyzes also showed a deficiency of fluorine in the waters of lakes and taliks under erosional and tukulan lakes. However, the fluorine content exceeded 1.5 mg/L in stagnant lakes, where more than 50 % of the cationic composition of water was sodium ion. Meanwhile fluorine concentration reached 3.2 mg/L in taliks under the stagnant thermokarst lakes. The saturation of suprapermafrost waters with fluorine can occur in the area of spring discharge under the influence of cryogenic disintegration of water-bearing rocks and metamorphization of the chemical composition of water during phase transitions. They lead to the precipitation of calcite from the solution, its pH increase, and accumulation of fluorine.

Keywords: fluorine, Lena river, small rivers, lakes, taliks, supraperafrost waters, chemical composition

Acknowledgements. The research was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant number 20-05-00670). The authors are grateful to L.Yu. Boitsova and O.V. Shepeleva (PI SB RAS) for carrying out the analytical studies of water samples, Shepelev V.V. (PI SB RAS) for helpful comments.

References

1. Fordyce F.M., Vrana K., Zhovinsky E., Povoroz-nuk V., Toth G., Hope B.C., Iljinsky U., Baker J. A health risk assessment for fluoride in Central Europe // *Environ. Geochem. Health*. 2007. Vol. 29. P. 83–102. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9076-7>.
2. Ozsvath D.L. Fluoride and environmental health: a review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. Vol. 8. P. 59–79. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9136-9>
3. Donskikh I.V. The influence of fluorine and its compounds on people's health (literature review) // *Byulleten' VSNTS RAMN* [Bulletin of the Eastern Siberian scientific center of the SB of the RAMS]. 2013. Vol. 1, No. 3 (91). P. 179–185.
4. WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Switzerland, Geneva, 2017. 631 p.
5. Yousefi M., Ghalehaskar S., Asghari F.B., Ghaderpoury A., Dehghani M. H., Ghaderpoori M., Mohammadi A.A. Distribution of fluoride contamination in drinking water resources and health risk assessment using geographic information system, northwest Iran // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2019. Vol. 107. 104408. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.104408>.
6. Fluoride in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, World Health Organization. 2004. 17 p. WHO/SDE/WSH/03.04/96. English only.
7. Aghapour S., Bina B., Tarrahi M.J., Amiri F., Ebrahimi A. Distribution and health risk assessment of natural fluoride of drinking groundwater resources of Isfahan, Iran, using GIS // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018. Vol. 190. P. 137. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6467-z>.
8. Kalyuzhnaya E.E., Prosekov A.Y., Volobaev V.P. Genotoxic properties of fluorines (review) // *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and Sanitation]. 2020. Vol. 99. No. 3. P. 253–258. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-3-253-258>.
9. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseyev V.A., Dutova E.M., Kondratyeva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda – poroda. T. 2: Sistema voda – poroda v usloviyakh gipergeneza [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. 389 p.
10. Kraynov S.R., Shvets V.M. Geokhimiya podzemnykh vod khozyaystvenno-pit'yevogo naznacheniya [Geochemistry of ground waters for household and drinking purposes]. Moscow: Nedra, 1987. 237 p.
11. Limantseva O.A., Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. Model for the formation of fluorine-bearing rocks in the carboniferous deposits of the Moscow artesian basin // *Geokhimiya* [Geochemistry international]. 2007. No. 9. P. 981–998.
12. Thapa R., Gupta S., Gupta A., Gupta A., Reddy D.V., Kaur H. Geochemical and geostatistical appraisal of fluoride contamination: An insight into the Quaternary aquifer // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 640–641, No. 1. P. 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.360>.
13. Vernadsky V.I. Izbrannyye sochineniya [Selected works]. Vol. 2. Moscow: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1955. 615 p.
14. Yanin E.P. Fluorine in the environment (prevalence, behavior, technogenic pollution) // *Ekologicheskaya ekspertiza* [Environmental Expertise]. 2007. No. 4. P. 2–98.
15. Krauskopf K.B., Bird D.K. Introduction to Geochemistry. New York: McGraw-Hill, 1995. 647 p.
16. Wedepohl K.H. Handbook of geochemistry. Berlin: Springer-Verlag, 1969. Vol. II-1. 442 p.
17. Grigoriev N.A. Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UB RAS, 2009. 382 p.
18. Turekian K.K. Chemistry of the Earth: Holf, Rinehart and Winston Inc. USA, 1972. 136 p.
19. Khimiya okeana. Vol. 1. Khimiya vod okeana [Ocean chemistry. Vol. 1. Chemistry of ocean waters]. Moscow: Nauka, 1979. 518 p.
20. Gordeev V.V. Rechnoy stok v okean i cherty yego geokhimii [River runoff into the ocean and features of its geochemistry]. Moscow: Nauka, 1983. 160 p.
21. Gordeev V.V. A new estimate of the surface runoff of dissolved substances into the ocean // *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1981. Vol. 261, No. 5. P. 1227–1230.
22. Anichkina N.V. Research of fluorine biogeochemistry in the ecosystem components // *Nauchnoye obozreniye*. Biologicheskkiye nauki [Scientific Review. Biological Science]. 2016. No. 3. P. 5–23.
23. Brindha K., Elango L. Fluoride in Groundwater: Causes, Implications and Mitigation Measures // Monroy S.D. (Ed.). Fluoride Properties, Applications and Environmental Management. Publisher Nova, 2011. P. 111–136.
24. Subba Rao N. Controlling factors of fluoride in groundwater in a part of South India // *Arabian Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 10, No. 524. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3291-7>.

25. *Malago J., Makoba E., Muzuka A.N.N.* Fluoride Levels in Surface and Groundwater in Africa: A Review // *American Journal of Water Science and Engineering*. 2017. Vol. 3, No. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20170301.11>.
26. *Shvartsev S.L.* *Gidrogeokhimiya zony gipergeneza* [Hydrogeochemistry of the hypergenesis zone]. Moscow: Nedra, 1978. 287 p.
27. *Filimonova L.G.* *Geokhimiya flora v zone gipergeneza oblasti mnogoletney merzloty* [Fluorine geochemistry in the hypergenesis zone of permafrost regions]. Moscow: Nauka, 1977. 152 p.
28. *Zamana L.V., Usmanova L.I., Usmanov M.T.* *Ecologic-geochemical assessment of ground waters in Chita city used for decentralized water-supply* // *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology]. 2011. No. 12 (42). P. 105–109.
29. *Kashin V.K., Afanasieva L.V., Ubugunov L.L.* *The fluoride in components of Western Transbaikalia landscapes* // *Agrokhimiya* [Eurasian Soil Science]. 2015. No. 10. P. 38–49.
30. *Anisimova N.P.* Fluorine in drinking waters of Central Yakutia // *Proceedings of the North-Eastern Branch of the Permafrost Institute*. Yakutsk: 1958. No. 1. P. 125–133.
31. *Anisimova N.P.* *Kriogidrogeokhimicheskiye osobennosti merzloy zony* [Cryohydrogeochemical features of the frozen zone]. Novosibirsk: Nauka, 1981. 153 p.
32. *Anisimova N.P., Golovanova T.V.* Fluorine content in permafrost waters of Central Yakutia and methods for reducing its concentration // *Geocryological and hydrogeological studies of Siberia*. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1972. P. 158–163.
33. *Anisimova N.P., Pavlova N.A.* *Gidrogeokhimicheskiye issledovaniya kriolitozony Tsentral'noy Yakutii* [Hydrogeoghemical studies of permafrost in Central Yakutia]. Novosibirsk: Academic Publishing House «Geo», 2014. 189 p.
34. *Pavlova N.A., Fedorova S.V.* Fluoride levels in fresh and slightly saline waters of permafrost zone (Central Yakutia) // *Proceedings Of The Fourth all-Russian Scientific Conference with International Participation «Water-rock interaction: geological evolution»*. Ulan-Ude: BSC SB RAS Publisher, 2020. P. 171–174. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0584-1-2020-171-174>.
35. *Balobaev V.T., Ivanova L.D., Nikitina N.M., Shepelev V.V., Lomovtseva N.S., Skutin V.I.* *Podzemnyye vody Tsentral'noy Yakutii i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Groundwaters in Central Yakutia and prospects of their use]. Novosibirsk: Publishing house of SB RAS branch «Geo», 2003. 137 p.
36. *Dzhamalov R.G., Krichevets G.N., Safronova T.I.* *Current changes in water resources in Lena river basin* // *Water resources*. 2012. Vol. 39, No. 2. P. 147–160.
37. *Ivanov M.S.* *Kriogennoye stroyeniye chetvertichnykh otlozheniy Leno-Aldanskoy vpadiny* [Cryogenic structure of the Quaternary deposits of the Lena-Aldan depression]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 125 p.
38. *Zhirkov I.I.* *Classification scheme of limnological genetic lakes North-East* // *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2014. No. 34. P. 18–25.
39. *Ushnitskaya L.A., Pestryakova L.A., Subetto D.A., Troeva E.I.* *Morfometricheskaya kharakteristika ozer Leno-Amginskogo mezhdurech'ya* [Morphometric characteristics of the lakes of the Lena-Amga interfluvium] // *Nauka i obrazovaniye*. 2014. No 4. P. 71–76.
40. *Arzhakova S.K., Zhirkov I.I., Kusatov K.I., Androsov I.M.* *Reki i ozera Yakutii: kratkiy spravochnik* [Rivers and lakes of Yakutia: a short guide]. Yakutsk: Bichik, 2007. 136 p.
41. *Gorodnichev R.M., Ushnitskaya L.A., Yadrikhinskiy I.V., Spiridonova I.M., Kolmogorov A.I., Frolova L.A., Pestryakova L.A.* *Morphometrical and Hydrochemical Features of Fluvial-Erosion Lakes of Basins of the Northern Rivers of Yakutia* // *Vestnik of the North-Eastern Federal university named after M.K. Ammosov*. 2014. Vol. 11, No. 6. P. 30–37.
42. *Anisimova N.P., Pavlova N.A., Stambovskaya Y.V.* *Khimicheskiy sostav podzemnykh vod talikov doliny srednego techeniya reki Leny* [Chemical composition of groundwater taliks in the middle reaches of the Lena River] // *Nauka i obrazovaniye*. 2005. No. 4. P. 92–96.
43. *Shepelev V.V.* *Podzemnyye vody tukulanov Tsentral'noy Yakutii* [Underground waters of tukulans of Central Yakutia] // *Eolovyye obrazovaniya Tsentral'noy Yakutii* [Aeolian formations of Central Yakutia]. Yakutsk: Published by the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1981. P. 30–41.
44. *Shepelev V.V.* *Nadmerzlotnyye vody kriolitozony* [Suprapermafrost waters of the permafrost zone]. Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», 2011. 169 p.
45. *Pavlova N., Ogonerov V., Danzanova M., Popov V.* *Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia* // *Geosciences*. 2020. Vol. 10(5). P. 192. <https://doi.org/10.3390/geosciences10050192>.
46. *Anisimova N.P.* *Formirovaniye khimicheskogo sostava podzemnykh vod talikov (na primere Tsentral'noy Yakutii)* [Formation of the chemical composition of groundwater taliks (by the example of Central Yakutia)]. Moscow: Nauka, 1971. 195 p.
47. *Tishin M.I.* *Geothermal conditions for the formation of suspect taliks in Central Yakutia*: Avtoref. diss. ... kand. geol.-min. nauk. Moscow, 1982. 14 p.
48. *Boytsov A.V.* *Osobennosti rezhima istochnikov presnykh vod Tsentral'noy Yakutii v svete ekologii transportnogo stroitel'stva* [Features of the regime of fresh water sources in Central Yakutia in the light of the ecology of transport construction] // *Kriolitozona i podzemnyye vody Sibiri. CH. 2. Podzemnyye vody i naledi* [Cryolithozone and underground waters of Siberia. Part 2. Groundwater and ice]. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS, 1996. P. 46–62.
49. *Monitoring podzemnykh vod kriolitozony* [Monitoring of ground waters of the permafrost zone] // *V.V. Shepelev*

pelev, A.B. Boytsov, N.G. Oberman, N.P. Anisimova. Yakutsk: Publishing House of the Permafrost Institute SB RAS, 2002. 172 p.

50. *Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V., Makarieva O.M.* Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin // *Earth's Cryosphere*. 2019. Vol. XXIII, No. 1. P. 40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50)).

51. *Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V.* Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // *E3S Web Conf.* 2019. Vol. 98. 07024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807024>.

52. *Aksyuk A.M.* Fluorine regime in deep hydrothermal fluids and near-surface waters (experimental studies): Avtoref. diss. ... doktora geol.-min. nauk. Moscow: Institute of Experimental Mineralogy RAS, 2007. 59 p.

53. *Ivanov A.V.* Kriogennaya metamorfizatsiya khimicheskogo sostava prirodnykh l'dov, zamerzayushchikh i talykh vod [Cryogenic metamorphization of the chemical composition of natural ice, freezing and melt water]. Khabarovsk, Vladivostok: Dalnauka, 1998. 164 p.

54. *Fotiyev S.M.* Kriogennyy metamorfizm porod i podzemnykh vod (usloviya i rezul'taty) [Cryogenic metamorphism of rocks and groundwater (conditions and results)]. Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», 2009. 279 p.

Submitted 22.12.2021

Revised 15.02.2022

Accepted 30.03.2022

About the authors

FEDOROVA, Svetlana Viktorovna, researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3175-0918>, Researcher ID: V-9524-2018, veta_f@mail.ru

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, na-pavlova@yandex.ru

For citation

Fedorova S.V., Pavlova N.A. Fluorine in surface and suprapermafrost waters in Central Yakutia // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 233–245. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-233-245>

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 581.526.55.551.34 : 581.6

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257

Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений

Т.А. Турчина*, З.А. Янченко

НИИ сельского хозяйства и экологии –
филиал «ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН», Норильск, Россия

*tatturchina@mail.ru

Аннотация. Изменение путей миграции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) актуализировало проблему использования пастбищных угодий Авамской тундры (юг полуострова Таймыр) для развития домашнего оленеводства. Оно возможно лишь при условии безопасности ресурса кормовых растений. Объектом исследований явилась вегетирующая надземная фитомасса наиболее используемых в пищу растений (лишайники, пушица, осока, кустарники). Методом пиролиза на атомно-абсорбционном анализаторе РА-915+ установлены элементный состав и концентрация тяжелых металлов. Оценка безопасности пастбищ дана на основе сравнения полученных данных с установленным значением временного максимально допустимого уровня (МДУ) содержания химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Выявленная высокая вариабельность концентраций элементов ($v = 21,8\text{--}96,6\%$) обусловлена биологическими особенностями исследуемых видов. Максимальное содержание элементов I класса опасности (As, Hg, Pb) выявлено в талломе лишайников (род *Cladonia*). Независимо от таксономического положения вида, на долю трех химических элементов – Mn, Cu, Ni – приходится от 96,88 до 99,97 % от валового содержания их водорастворимых форм. Из исследуемого перечня элементов в растениях фактическая концентрация никеля (за исключением травянистых видов) и хрома (за исключением кустарников) превышает максимально допустимый уровень содержания, установленный для кормов сельскохозяйственных животных, в 1,1–1,9 и 1,1–2,1 раза соответственно. С учетом особенностей регионального геохимического фона, фактическое содержание тяжелых металлов в кормовых растениях не является опасным, территория Авамской тундры пригодна для развития домашнего оленеводства.

Ключевые слова: олени пастбища, растения, тяжелые металлы, концентрация, максимально допустимый уровень содержания, безопасность кормов

Введение

Авамская тундра – территория площадью более 1,5 млн га (15,2 тыс. км²) расположена в южной части полуострова Таймыр (юг Северо-Сибирской низменности), включает водоразделы рек Хета и Дудыпта (правый приток р. Пясины). Исследуемый район находится на границе природных зон – южной тундры и лесотундры Восточной Сибири (рис. 1) и на протяжении длительного времени использовался таймырской популяцией дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) в качестве пастбищных угодий.

С начала XXI в. вследствие меняющихся климатических условий, возрастающего хозяйственного освоения устья р. Енисей (строительство газопровода, новых автомобильных дорог с твердым покрытием, продление навигации с помощью ледокольного флота) и браконьерского промысла миграционные потоки стад сдвинулись к югу и юго-востоку – в Эвенкию, Западную Якутию [1, 2]. «Освободившиеся» таким образом пастбищные угодья с достаточно высоким ресурсом кормовых растений можно адаптировать для тех же целей, но при контролируемом использовании, – домашнего оленеводства.

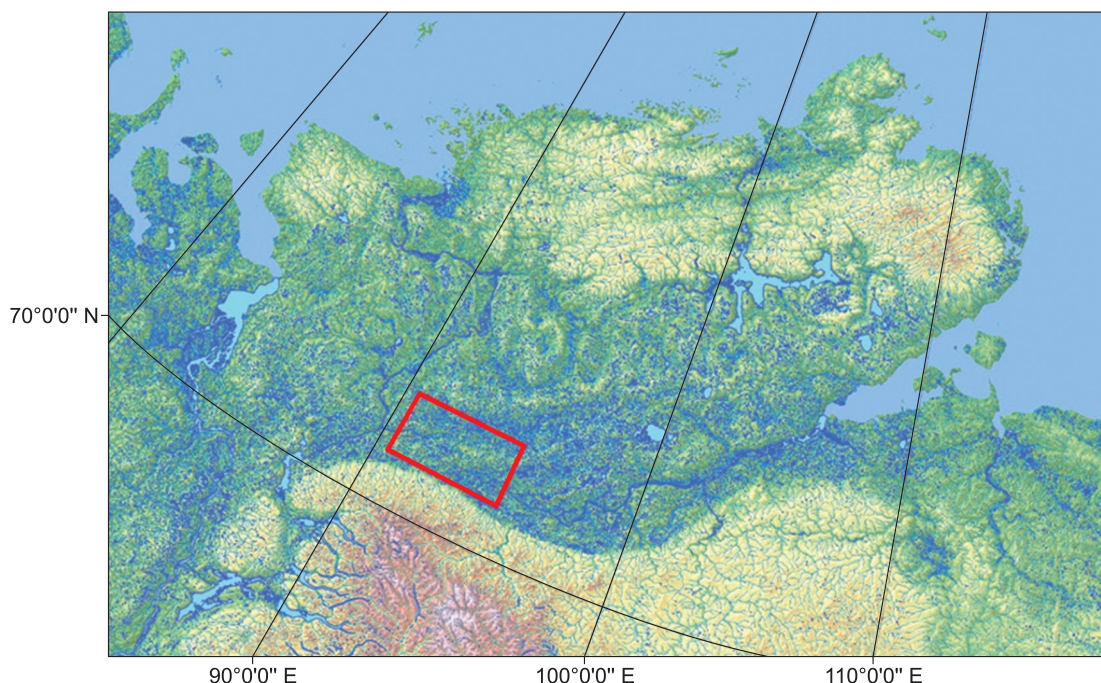


Рис. 1. Территория Авамской тундры на карте полуострова Таймыр.

Fig. 1. The territory of the Avam tundra on the map of the Taimyr Peninsula.

Последнее как отрасль сельского хозяйства играет существенную роль в обеспечении населения северных регионов мясом и продуктами его переработки. Безопасность продукции зависит, в первую очередь, от безопасности кормов и, прежде всего, содержания тяжелых металлов – элементов, способных изменять направление биохимических процессов в растительных тканях.

Цель работы – на основе данных об элементном составе тяжелых металлов и их концентраций в кормовых растениях обосновать возможность безопасного использования территории Авамской тундры для домашнего оленеводства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявить элементный состав тяжелых металлов в вегетативных органах основных кормовых растений, определить валовое содержание и концентрацию каждого элемента;
- установить таксономические и межвидовые особенности накопления тяжелых металлов в растениях;
- сравнить фактическое содержание тяжелых металлов в растениях с нормированными показателями;
- дать заключение о возможности использования ресурса кормовых растений Авамской тундры для целей домашнего оленеводства.

Объект и методика исследования

Из порядка 40 видов растений, составляющих рацион питания северного оленя, предпочтительными являются лишайники, пушица, осока, кустарники [1]. Их вегетирующая надземная фитомасса явилась объектом исследования. Отбор проб растительности произведен на трех ключевых участках, расположенных в разных частях Авамской тундры и охватывающих наиболее типичные растительные сообщества (табл. 1).

Участок 1 (АВАМ 1) расположен в верховьях р. Нерпалах (бассейн р. Хета) на водоразделе рек Хета и Авам с преобладающим типом растительности – лиственничная лесотундра. Местоположение участка 2 (АВАМ 2) – водосбор р. Дудыпта между местом впадения в нее рек Батайка и Авам в подзоне южных тундр. Участок 3 (АВАМ 3) расположен на водосборной площади р. Кыстыктах недалеко от места впадения ее в р. Дудыпта; также относится к южным тундрам, но, в отличие от предыдущего участка, с более высоким разнообразием сосудистых растений [3].

В зависимости от принадлежности вида к определенному таксону и с учетом преимущественного использования в рационе оленей для аналитических целей использовалась вегетирующая надземная часть (травянистые растения),

Т а б л и ц а 1

Характеристика объекта исследования

T a b l e 1

Characteristics of the study object

Река (бассейн) River (basin)	Шифр объекта, географические координаты угловых точек Object code, geographic coordinates of corner points	Растительное сообщество Plant community	Характеристика видов растений Characteristics of plant species		
			Русское название вида Russian name of the species	Латинское название вида Latin name of the species	Наименование вегетативных органов для анализа Name of vegetative organs for analysis
Кыстыктах (Дудыпта в устьевой части) Kystyktakh (Dudypta in the mouth part)	АВАМ 3 N70° 56' – 70° 58' E91° 14' – E91° 19' АВАМ 3	Тундра пятнистая	Ива красивая	<i>Salix pulchra</i>	Лист
		Тундра пятнистая	Береза карликовая	<i>Betula nana</i>	Лист
		Болото полигональное	Лишайники рода Кладония	<i>Cladonia arbuscula</i> <i>Cladonia rangiferina</i>	Слоевище (таллом)
		Болото полигональное	Пушица влагалищная	<i>Eriophorum vaginatum</i>	Надземная фитомасса (вегетирующая)
Батайка (Дудыпта в среднем течении) Bataika (Dudypta in the middle course)	АВАМ 2 N71° 12' – 71° 13' E92° 35' – E92° 41' АВАМ 2	Тундра пятнистая	Осока арктико-сибирская	<i>Carex arctosibirica</i>	Надземная фитомасса (вегетирующая)
		Тундра ивовая злаково- осоковая	Осока буроватенькая	<i>Carex fuscicula</i>	Лист
		Тундра кустарничково- лишайниковая	Ива сизая	<i>Salix glauca</i>	Слоевище (таллом)
Нерпалах (Хета) Nerpalkh (Kheta)	АВАМ 1 N71° 03' – 71° 04' E93° 41' – E93° 44' АВАМ 1	Ерник хвощово-злаковый	Ива мохнатая	<i>Salix lanata</i>	Лист
		Ерник хвощово-осоковый	Береза карликовая	<i>Betula nana</i>	Лист

Общая характеристика тяжелых металлов

Table 2

General characteristics of heavy metals

Характеристика Characteristic	Мышьяк Arsenic	Ртуть Mercury	Свинец Lead	Марганец Manganese	Медь Copper	Никель Nickel	Хром Chromium
Обозначение Symbol	As	Hg	Pb	Mn	Cu	Ni	Cr
Атомная масса Atomic mass	74,92	200,59	207,19	54,938	63,546	58,71	51,996
Класс опасности Hazard Class	I	I	I	III	II	II	II
Временный МДУ*, мг/кг Temporary MDU, mg/kg	0,5	0,05	5,0	Отсутствует	30,0	3,0	0,5
Физиологическая роль** Physiological role	К	К	К	З, МЭ	МЭ	МЭ	Н/О

Примечание. «*» – МДУ – максимально допустимый уровень для грубых и сочных кормов; «**» – К – канцероген, З – зольный элемент; МЭ – микроэлемент, Н/О – не определена.

Notes. «*» – MDU – the maximum allowable level for rough and succulent feed; «**» – К – carcinogen, З – ash element; МЭ – microelement, Н/О – not determined.

листья (кустарники), вся надземная фитомасса (слоевище лишайников). В полевых условиях отбор проб растительных образцов и их дальнейшая подготовка к анализу, пакетирование и т. д. (с учетом предъявляемых требований) произведены в соответствии с методикой геоботанических исследований [4]. Выполнено определение концентрации семи химических элементов, имеющих разную степень опасности для окружающей среды (табл. 2).

Содержание ртути определялось методом пиролиза на атомно-абсорбционном анализаторе РА-915+ с приставкой РП-91С, остальных элементов – методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [5] на эмиссионном спектрометре модели iCAP 6300 Duo. Минимально определяемая концентрация химических элементов составляет 0,1 мг/кг. Полученные значения сравнивались между видами в пределах одного водосбора и внутри вида на разных водосборах. Различие полученных значений оценивали по критерию Стьюдента для вероятности безошибочного определения 95 %. Математико-статистическая обработка данных проведена с использованием средств электронной таблицы Microsoft Excel и в соответствии с требованиями, предъявляемыми к работам подобного рода [6].

Фактическая оценка концентрации тяжелых металлов в вегетативных органах растений по их безопасности для диких животных (северного оленя, прежде всего) не может быть дана, так как для дикорастущих растений региона нормированные показатели содержания тяжелых металлов (ПДК) отсутствуют.

В настоящее время в Российской Федерации нормируется концентрация химических элементов, содержащихся в кормах для сельскохозяйственных животных [7, 8]. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) разработан для нескольких химических элементов, преимущественно микроэлементов и тяжелых металлов I и II класса опасности. Для элементов III класса опасности и элементов, которые подобным образом не классифицируются (являются неопасными для почв и растений) МДУ не разработаны (см. табл. 2).

В связи с тем, что исследуемые виды растений (см. табл. 1) являются кормовой базой северных оленей и других видов животных, повышенные концентрации опасных элементов впоследствии могут быть аккумулированы в животных тканях и оказаться в продуктах питания человека, для целей настоящего исследования в качестве контроля (эталона сравнения) использован по-

казатель временного максимально допустимого уровня (МДУ) содержания химических элементов, установленные для грубых и сочных кормов [7, 8]. Заключение о безопасности вегетативных органов растений как кормового ресурса дано на основе сравнения с временным МДУ содержания химического элемента (см. табл. 2).

Результаты и обсуждение

В растительных тканях тяжелые металлы находятся в виде водорастворимых форм и, в зависимости от концентрации, могут как проявлять канцерогенные свойства, так и положительно влиять на ход метаболических процессов (выступают в роли микроэлементов) [9–11]. В фитомассе исследуемых видов растений содержание каждого элемента, соотношение между концентрациями элементов видоспецифично и зависит от их способности аккумулировать тот или иной элемент (табл. 3). Межвидовые различия валового содержания тяжелых металлов достигает трех порядков значений и варьируется в диапазоне от 91,89 мг/кг (лишайники) до 2708,435 мг/кг (береза).

Степень варьирования концентрации для каждого элемента различна (табл. 3). Величина коэффициента вариации менее 33 % связана с преобладанием значений меньше минимально определяемой величины (мышьяк) и указывает на однородный источник поступления этих элементов в растения, независимо от биологических особенностей вида (медь, никель). Высокая вариабельность концентраций других металлов ($v = 49,7\%$ – свинец, $v = 73,9\%$ – хром, $v = 96,63\%$ – марганец) в условиях однородной подстилающей поверхности (почва) обусловлена, прежде всего, биологическими особенностями изучаемых видов.

Максимальное значение валового содержания тяжелых металлов выявлено у березы (1409,95–2708,435 мг/кг) и некоторых видов ив (616,043–1210,247 мг/кг). У одних и тех же видов различие валовых концентраций может быть обусловлено особенностями локального геохимического фона (повышенные концентрации отдельных элементов в почвенном покрове), удаленностью от источников дополнительной эмиссии загрязняющих веществ, содержащих указанные металлы. В частности, валовое содержание элементов в листьях березы карликовой, собранных на участке, территориально расположенном ближе к Норильскому промышленному району (АВАМ 3),

почти в 2 раза меньше в сравнении с участком, территориально удаленным от него (АВАМ 1) – 1409,95 мг/кг и 2708,435 мг/кг соответственно. Содержащиеся в аэротехногенных загрязнителях вещества могут не только аккумулироваться в больших количествах в растительных тканях, но и выступать в роли ингибитора, препятствуя извлечению некоторых элементов из почвенного раствора.

В листьях березы карликовой (участок АВАМ 3) валовое содержание элементов почти в два раза меньше за счет уменьшенной концентрации марганца. Ингибирование аккумуляции марганца происходит на фоне увеличения концентрации других тяжелых металлов, в сравнении с участком АВАМ 1: меди – в 1,1 раза, никеля – в 1,3 раза, хрома – в 1,1 раза. Увеличение, как видно, небольшое, статистически незначимое ($t_{\phi(Cu)} = 0,27$; $t_{\phi(Ni)} = 0,47$; $t_{\phi(Cr)} = 0,37 < t_{95} = 2,45$), но достаточное для того, чтобы у березы способность к аккумуляции марганца снизилась.

Несмотря на различия концентраций тяжелых металлов в вегетативных органах растений и их валового содержания, обусловленные биологическими особенностями видов, тенденции соотношения элементов в валовом составе в целом и в пределах однородных таксонов, независимо от территориального местоположения объектов, идентичны (см. табл. 3).

Преобладающим элементом во всех растениях является марганец, доля его в элементном составе составляет 98,1–99,7 % от валового содержания – в сосудистых растениях и 88,1–94,3 % – у лишайников. Второе место по доле участия занимает медь: 0,1–1,0 % – у сосудистых растений, 3,0–4,9 % – у лишайников; третье место занимает никель – 0,2–0,8 % – у сосудистых растений, 1,7–3,9 % – у лишайников. Таким образом, на долю трех ведущих элементов – марганец, медь, никель – приходится до 99,9 % валового их содержания.

Геохимические ряды (расположение элементов по мере увеличения доли участия в валовом содержании) имеют практически идентичный вид:

$As < Hg < Pb < Cr < Ni < Cu < Mn$ – у сосудистых растений;

$Hg < As < Cr < Pb < Ni < Cu < Mn$ – у лишайников.

В сравнении с сосудистыми растениями у лишайников в большем количестве накапливаются мышьяк и свинец.

Т а б л и ц а 3

Концентрация и валовое содержание тяжелых металлов (Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Hg, As) в растительных образцах

Table 3

Concentration and total content of heavy metals (Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Hg, As) in plant samples

Бассейн реки (шифр объекта) River basin (object code)	Вид растений Plant species	Концентрация тяжелых металлов, мг/кг Concentration of heavy metals, mg/kg							Валовое содержание, мг/кг Total content, mg/kg
		As	Hg	Pb	Mn	Cu	Ni	Cr	
Кыстыктах (АВАМ 3) Kустуктаkh (AVAM 3)	Ива красивая	<0,1	<0,1	<0,1	610±180	2,7±0,5	3,2±1,1	0,143±0,03	616,043
	Береза карликовая	<0,1	<0,1	<0,1	1400±400	4,1±0,8	5,7±2,0	0,15±0,03	1409,95
	Лишайники (Кладония)	0,22±0,11	<0,1	1,09±0,27	210±60	6,7±1,3	3,8±1,3	0,84±0,17	222,65
	Пушица влагалищная	<0,1	<0,1	0,87±0,22	510±150	5,4±1,1	2,3±0,8	0,53±0,11	519,1
Багайка (АВАМ 2) Bатаука (AVAM 2)	Осоки (арктосибирская, бороватенькая)	<0,1	<0,1	0,36±0,09	470±140	5,7±1,1	2,1±0,7	0,63±0,13	478,79
	Ива сизая	0,15±0,07	<0,1	<0,1	430±130	3,8±0,8	3,5±1,2	0,56±0,11	438,01
	Лишайники (Кладония)	0,23±0,12	<0,1	1,5±0,4	81±24	4,5±0,9	3,6±1,3	1,06±0,21	91,89
	Ива мохнатая	<0,1	<0,1	<0,1	1200±400	5,3±1,1	4,8±1,7	0,147±0,03	1210,247
Нерпалах (АВАМ 1) Nerpalakh (AVAM 1)	Береза карликовая	<0,1	<0,1	<0,1	2700±800	3,8±0,8	4,5±1,6	0,135±0,03	2708,435

Данные статистической обработки

Statistical data		Фактическая концентрация меньше минимально определяемой величины The actual concentration is less than the minimum detectable value						
Среднее значение, мг/кг Average value, mg/kg	0,2	0,955	845,67	4,67	3,72	0,466	855,01	
Дисперсия Dispersion	0,0019	0,2255	667786,5	1,4825	1,334	0,119	667117,3	
Стандартное отклонение Standard deviation	0,044	0,475	817,18	1,218	1,155	0,344	816,772	
Коэффициент вариации (v), % Coefficient of variation (v), %	21,8	49,7	96,6	26,1	31,0	73,9	95,5	
Ошибка определения средней величины, ± мг/кг Error in determining the average value, ± mg/kg	0,03	0,24	272,39	0,41	0,39	0,11	272,26	

Среди определяемых тяжелых металлов явными канцерогенными свойствами обладают мышьяк, ртуть, свинец (I класс опасности); вещества, относящиеся ко II–III классам опасности (медь, никель, марганец), в мизерных концентрациях обладают микроэлементной активностью; физиологическая роль хрома до настоящего времени не установлена [11].

Наименьшее значение максимально допустимого уровня (МДУ) содержания установлено для ртути – 0,05 мг/кг [7]. Применявшаяся методика определения этого элемента позволяет фиксировать его наличие в концентрации более 0,01 мг/кг, т. е. в 2 раза превышающую МДУ. Поскольку в вегетативных органах всех растений, независимо от их таксономической принадлежности, фактическая концентрация ртути была меньше минимально определяемой величины (см. табл. 3), имеющийся кормовой ресурс можно считать безопасным.

Из других элементов, относящихся к I классу опасности, мышьяк выявлен в трех образцах с диапазоном варьирования концентрации от 0,15 до 0,23 мг/кг, свинец – в четырех образцах с диапазоном значений от 0,36 до 1,5 мг/кг (см. табл. 3). В остальных образцах концентрация этих элементов была меньше, чем минимальный предел их определения в соответствии с установленной методикой.

В способности аккумулировать мышьяк и свинец проявляются таксономические особенности видов: оба эти элемента в больших количествах накапливаются в талломе лишайников. В частности, в сравнении с листьями кустарников (ива сизая), концентрация мышьяка в 1,5 раза больше. Наличие свинца, кроме лишайников, выявлено в вегетирующей надземной фитомассе травянистых видов, но в талломе лишайников концентрация элемента в 1,3 раза больше, чем в пушице, и в 3,0 раза больше, чем в осоке. В границах одной водосборной территории статистически значимые межвидовые различия концентраций свинца выявлены у лишайника с осокой ($t_{\phi} = 2,56 > t_{95} = 2,45$). В остальных вариантах сравнения различия концентраций статистически значимыми не являются ($t_{\phi} = 0,63 - 2,14 < t_{95} = 2,45$). Внутривидовые различия (лишайники) концентрации свинца в границах разных водосборов (реки Кыстыктах и Батайка) незначительны ($t_{\phi} = 0,85 < t_{95} = 2,45$).

Максимально допустимый уровень (МДУ) содержания указанных тяжелых металлов состав-

ляет 0,5 мг/кг – для мышьяка, 5,0 мг/кг – для свинца. В вегетативных органах всех изученных растений фактические концентрации этих тяжелых металлов показатели МДУ не превысили.

Наиболее высокие концентрации элемента (от 81 до 2700 мг/кг) и наибольшая доля в валовом содержании водорастворимых форм выявлены у марганца (см. табл. 3, рис. 2). В границах изученных водосборов рек Кыстыктах, Батайка, Нерпалах указанная особенность характерна для всех видов растений. Различия концентраций и максимальный показатель варьирования ($v = 96,63\%$) свидетельствуют о наличии биологических особенностей видов к аккумуляции этого элемента. Минимальные концентрации марганца выявлены у лишайников рода *Cladonia* (81–210 мг/кг), максимальные – у березы (1400–2700 мг/кг). Остальные виды занимают «промежуточное» между лишайниками и березой положение, концентрация элемента в их вегетативных органах изменяется в диапазоне от 430 до 1200 мг/кг. Таким образом, изученные растения по мере увеличения концентрации марганца образуют следующий ряд: кладония < осока < пушица < ивы < береза.

Если способность растений рода *Betula* к аккумуляции повышенных доз марганца известна давно (так называемые растения марганефилы), то, анализируя содержание элемента у разных видов рода *Salix*, отмечаем, что по абсолютной величине концентрации (1200 мг/кг) к числу растений-марганефилов можно отнести иву мохнатую (*Salix lanata*). В сравнении с другими видами растений она имеет статистически значимые различия концентраций ($t_{\phi} = 2,79 > t_{95} = 2,45$). Различия между видами внутри рода *Salix* статистически значимыми не являются ($t_{\phi} = 1,35 - 1,83 < t_{95} = 2,45$).

Марганец относится к элементам III класса опасности (малоопасные вещества), и МДУ его содержания не установлен, поэтому оценка безопасности растительного корма по величине фактических концентраций невозможна.

Медь в вегетативных органах исследуемых видов растений выявлена в концентрациях от 2,7 до 5,7 мг/кг (см. рис. 2). Среди перечня выявленных тяжелых металлов медь характеризуется наименьшим варьированием концентраций ($v = 26,1$). Это означает отсутствие биологических и таксономических различий видов в проявлении особенностей аккумуляции этого элемента (все изученные виды этой способностью обладают при-

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ОЛЕНЬИХ ПАСТБИЩ АВАМСКОЙ ТУНДРЫ

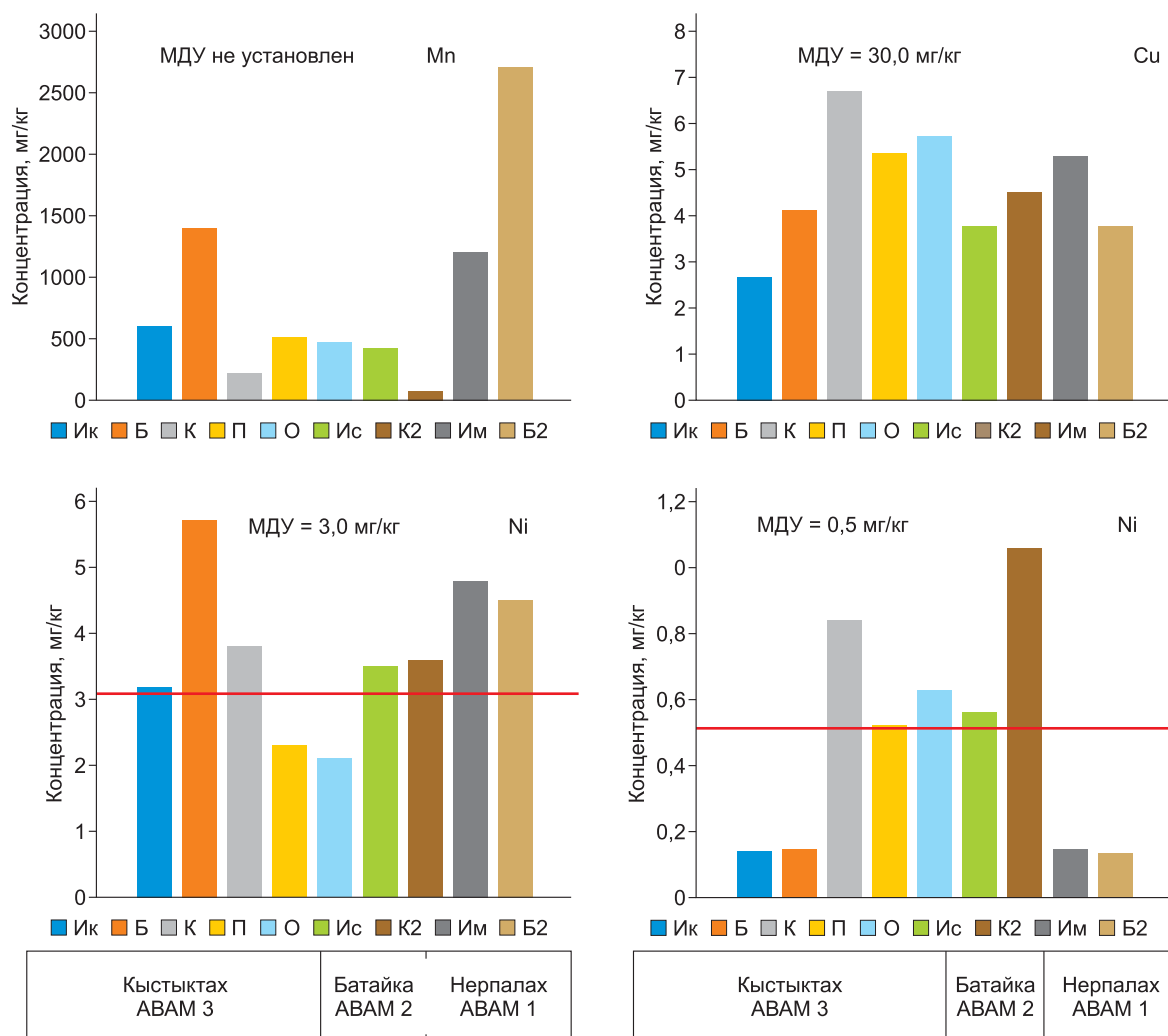


Рис. 2. Концентрация тяжелых металлов в вегетативных органах растений.

Ик – ива красивая, Б – береза карликовая, К – кладонии, П – пушица влажлищная, О – осоки, Ис – ива сизая, Им – ива мохнатая.

Fig. 2. The concentration of heavy metals in the plants vegetative organs.

Ик – beautiful willow, Б – dwarf birch, К – cladonia, П – hare's-tail, О – sedges, Ис – blue willow, Им – woolly willow.

мерно в равной степени) и наличие в границах исследуемых водосборов единого источника поступления элемента в ткани растений. Сказанное подтверждается отсутствием статистически значимых различий концентрации меди между изученными растениями ($t_{\phi} = 0,0-1,90 < t_{95} = 2,45$).

Медь относится ко второму классу опасности (умеренно опасные вещества). Максимально допустимый уровень содержания составляет 30,0 мг/кг. Как видно из представленных данных (см. табл. 3, рис. 2) во всех образцах фактическая концентрация меньше МДУ.

Концентрация никеля в образцах исследуемых растений варьируется в диапазоне от 2,1 до 5,7 мг/кг (см. табл. 3), т. е. разница между мини-

мальным и максимальным значением составляет 270 %. Как и у меди, слабая степень варьирования показателя ($v = 31,0$) свидетельствует о наличии однородного источника его поступления в растение, но, в отличие от меди, в способности растений аккумулировать этот элемент проявляются некоторые межвидовые различия (см. рис. 2).

Среди сосудистых растений в максимальных (из выявленного диапазона значений) количествах никель аккумулируется в листьях кустарников (береза, ивы), меньше всего – в вегетирующей фитомассе трав (в 1,4–2,7 раза меньше). Идентичные с листьями ив показатели выявлены в талломе лишайников. Однако

различия не являются статистически значимыми ($t_{\phi} = 0,06-1,80 < t_{95} = 2,45$).

При усвоении никеля растениями происходит взаимодействие с содержащимися в почве водорастворимыми формами других элементов. При этом абсорбция никеля ингибируется медью и не ингибируется марганцем [9, 11]. То есть увеличение концентрации меди должно приводить к уменьшению концентрации никеля в растительных тканях. Проведенный парный корреляционный анализ выявил указанную тенденцию, но сила связи оказалась слабой ($R = -0,216$). Марганец является активатором процесса аккумуляции никеля. Парный корреляционный анализ подтвердил наличие положительной связи средней степени сопряжения ($R = 0,565$).

Если сравнивать средние значения концентраций в растениях между территориями водосборов (3,42 мг/кг – на водосборе р. Кыстыктах, 3,55 – р. Батайка, 4,65 мг/кг – р. Нерпалах), прослеживается тенденция последовательного увеличения концентрации в долготном направлении.

По классификации опасности никель относится ко II классу (умеренно опасные вещества). Максимально допустимый уровень его содержания составляет 3,0 мг/кг и, как видно (см. рис. 2), на исследуемой территории в пределах водосборов он превышен во всех образцах растений, за исключением двух – в вегетирующей фитомассе травянистых растений (пушица, осока). Минимальная величина превышения фактической концентрации над МДУ выявлена у ивы красивой (в 1,1 раза), максимальная – у березы карликовой (в 1,9 раза).

В настоящее время механизмы физиологического действия хрома (Cr) на растительные организмы недостаточно ясны, поэтому его не относят к микроэлементам. Валовое содержание элемента в почвах в естественных условиях достаточно высокое, однако концентрация растворимых его соединений очень мала, вследствие этого – незначительное накопление в растениях. Недостатка в этом элементе растения чаще всего не испытывают, поэтому не отмечены факты и не описаны внешние симптомы проявления его дефицита [9, 11].

Диапазон выявленных концентраций хрома в вегетативных органах растений составляет от 0,15 до 1,06 мг/кг (см. табл. 3). У этого элемента один из самых высоких показателей вариабель-

ности концентрации ($v = 73,9\%$), что свидетельствует о специфичности его аккумуляции растениями разных таксонов. Наибольшей способностью аккумулировать хром обладают лишайники: концентрация элемента в их слоевище составляет 0,84–1,06 мг/кг. Среди сосудистых растений, независимо от местоположения водосбора, минимальные концентрации хрома выявлены в листьях кустарников: березы карликовой (0,135–0,15 мг/кг) и некоторых видов ив (0,143–0,147 мг/кг), максимальные – в травянистых растениях (0,53 мг/кг – у пушицы и 0,63 мг/кг – у осоки). Среди кустарников выделяется ива сизая, концентрация хрома в ее листьях (0,56 мг/кг) почти такая же, как и в травянистых растениях. Статистически значимые межвидовые различия концентраций хрома выявлены между кладонией и березой ($t_{\phi} = 3,4-4,37 > t_{95} = 2,45$), кладонией и ивами ($t_{\phi} = 4,02-4,33 > t_{95} = 2,45$). Различия концентрации хрома в слоевище кладонии с травянистыми растениями статистически незначимы ($t_{\phi} = 0,98-2,24 < t_{95} = 2,45$).

Хром относится к элементам II класса опасности (умеренно опасные вещества). МДУ его содержания составляет 0,5 мг/кг. Как видно (см. рис. 2), за исключением березы карликовой, ивы красивой и ивы мохнатой, фактическая концентрация элемента в вегетативных органах растений превышает МДУ. Величина превышения по видам растений варьирует: минимальная – у травянистых видов и ивы сизой – на 6–26 %, максимальная – у кладонии – на 68–112 %.

Анализируя вышеприведенные данные, отмечаем, что из шести элементов, для которых установлен временный МДУ содержания, фактическая концентрация только никеля и хрома в вегетативных органах некоторых растений, имеющих кормовое значение, превышает установленное значение. Причем преимущественно фиксируется превышение концентрации над МДУ либо никеля, либо хрома. Превышение над МДУ обоих элементов выявлено только в талломе лишайников и листьях ивы сизой. Указанное обстоятельство не может служить основанием для ограничения или запрета использования растительных сообществ с доминированием или участием этих видов в качестве кормовых угодий по причине того, что высокие концентрации некоторых микроэлементов могут быть обусловлены повышенной физиологической потребно-

стью в них растений, произрастающих в экстремальных условиях среды обитания. Подобная особенность на Западном Таймыре выявлена для никеля. В растениях тундры, лесотундры и тайги этот элемент накапливается в большем количестве в сравнении с растительностью других природных зон [10]. Физиологическая особенность растений, произрастающих на холодных и влажных почвах, в том, что в азотном питании преобладает аммонийная форма азота над его нитратной формой. А никель является компонентом ферментов уреазы и различных гидрогеназ. Это обстоятельство может служить природным фактором, способствующим высокому накоплению никеля в растениях тундры [10].

Кроме этого, особенностью региона является достаточно высокий диапазон концентраций химических элементов, соотношение между минимальными и максимальными значениями может составлять до 3000 % [10]. Выявленная для Западного Таймыра особенность характерна и для Авамской тундры, где различие концентраций марганца в вегетативных органах растений разных таксономических групп составляет более 3000 %. Таким образом, ресурс кормовых растений на изучаемой территории пригоден для развития такой отрасли сельского хозяйства, как домашнее оленеводство.

Заключение

При сравнительном анализе концентраций в растениях разных таксономических групп выявлены биологические особенности видов в усилении (или ослаблении) аккумуляции того или иного элемента. Лидером по аккумуляционной способности является лишайник – кладония. В его слоевище концентрация большинства исследованных тяжелых металлов (мышьяк, свинец, хром) больше, чем в вегетативных органах сосудистых растений, в 2 раза и более.

В накоплении марганца «лидерство» принадлежит типичному марганофилу – березе карликовой. Способность растения к повышенной аккумуляции элемента не утрачивается и в условиях сурового климата Арктики. К марганофилам мы также можем отнести иву мохнатую.

Медь в наибольших количествах накапливается в вегетирующей фитомассе травянистых видов.

Только по двум элементам (никель и хром) выявлено превышение фактических concentra-

ций над максимально допустимым уровнем содержания. Величина превышения незначительна и обусловлена, прежде всего, естественным геохимическим фоном, где в составе почвообразующей породы эти элементы представлены в больших количествах.

Вегетативные органы исследованных растений, таким образом, не могут считаться загрязненными, и они пригодны в пищу животным. Растительные сообщества с их участием можно использовать как пастбищные угодья.

Литература

1. Кобиляков И. Путоранский марафон: миграция диких северных оленей // NATIONAL GEOGRAPHIC Россия [Электронный ресурс]. URL: <https://nat-geo.ru/nature/putoranskiy-marafon-migratsiya-dikikh-severnkh-oleney/> (дата обращения 09.02.2022 г.).
2. Изменения климата вынуждают оленей Таймыра менять сроки миграции. 07 августа 2020 // WWF : официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://wwf.ru/resources/news/bioraznoobrazie/izmeneniya-klimata-vynuzhdayut-oleney-taymyra-menyat-sroki-migratsii/> (дата обращения 09.02.2022 г.).
3. Секретарева Н.А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. 131 с.
4. Белоусова Е.Н. Инструментальные методы исследования почв и растений: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2014. 267 с.
5. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. М., 1998 (издание 2005 г.). 31 с.
6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 350 с.
7. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках / Утв. Зам. начальника Главного управления ветеринарии Госагропрома СССР А.Д. Третьяковым 7 августа 1987 года [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru. (дата обращения 10.02.2022 г.).
8. Сысо А.И. Российские нормативы оценки качества почв и кормов: проблемы их использования // Экологический мониторинг окружающей среды / Материалы международной школы молодых ученых. Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2016. С. 153–168.
9. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1112–1119.

10. Сысо А.И., Колпащиков Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиromля Т.И. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 855–862.

11. Анспок П.И. Микроудобрения: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 272 с.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Поступила после рецензирования 20.04.2022

Принята к публикации 28.04.2022

Об авторах

ТУРЧИНА Татьяна Анатольевна, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (НИИСХ и ЭА ФКНЦ СО РАН), 663302, Норильск, ул. Комсомольская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>, Author ID: 57039211000, Researcher ID: AAT-8537-2020, e-mail: tatturchina@mail.ru

ЯНЧЕНКО Зоя Анатольевна, кандидат биологических наук, директор, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (НИИСХ и ЭА ФКНЦ СО РАН), 663302, Норильск, ул. Комсомольская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2534-4814>, e-mail: norilskniiks@mail.ru

Для цитирования

Турчина Т.А., Янченко З.А. Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 246–257. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257

Assessment of the reindeer pastures safety in the Avam tundra: content of heavy metals in the vegetative organs of plants

T.A. Turchina*, Z.A. Yanchenko

«Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic» –
Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», Norilsk, Russia
*tatturchina@mail.ru

Abstract. The changes in migration routes of the wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) have made it relevant to use pasture lands in the Avam tundra (south of the Taymyr Peninsula) for the development of domestic reindeer husbandry. The safety of forage plants is an essential condition for the reindeer husbandry. We aimed to study vegetative aboveground phytomass of the most common forage plants (lichens, cotton grass, sedge, shrubs). The ultimate composition and concentration of heavy metals were determined by pyrolysis using an atomic absorption analyzer RA-915+. We have assessed pasture safety by comparing the obtained data with the established maximum permissible level (MPL) of the chemical elements contained in feeds for the farm animals. The detected high variability of the element concentrations ($v = 21.8–96.6\%$) can be attributed to the biological specifics of the species under study. We have found the maximum content of the elements of hazard class I (As, Hg, Pb) in lichen thallus (*Cladonia* genus). Regardless of the taxonomic status of the species, three chemical elements (Mn, Cu and Ni) account for 96.88–99.97 % of the gross content of their water-soluble forms. The concentration of nickel (except for baseous species) and chromium

(except for shrubs) exceeded the maximum permissible level established for the farm animal feeds by 1.1–1.9 and 1.1–2.1 times, respectively. Taking into account the features of the regional geochemical background, the actual content of heavy metals in forage plants is not dangerous. Therefore, we conclude that the territory of the Avam tundra is suitable for developing domestic reindeer husbandry.

Keywords: reindeer pastures, plants, heavy metals, concentration, maximum allowable content, feed safety

References

1. Kobilyakov I. Putoranskij marafon: migraciya dikih severnyh oleney // NATIONAL GEOGRAPHIC Rossiya [Elektronnyj resurs]. URL: <https://nat-geo.ru/nature/putoranskij-marafon-migratsiya-dikikh-severnykh-oleney/> (data obrashcheniya 09.02.2022 g.).
2. *Izmeneniya klimata vyzhdayut oleney Tajmyra menyat' sroki migratsii*. 07 avgusta 2020 // WWF : oficial'nyj sajt [Elektronnyj resurs]. URL: <https://wwf.ru/resources/news/bioraznoobrazie/izmeneniya-klimata-vyzhdayut-oleney-tajmyra-menyat-sroki-migratsii/> (data obrashcheniya 09.02.2022 g.).
3. Sekretareva N.A. Sosudistye rasteniya Rossijskoj Arktiki i sopredel'nyh territorij. M.: Tovarishestvo nauchnyh izdanij KMK, 2004. 131 p.
4. Belousova E.N. Instrumental'nye metody issledovaniya pochv i rastenij: ucheb. Posobie. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t, 2014. 267 p.
5. Metodika vypolneniya izmerenij soderzhaniya metallov v tverdyh ob'ektah metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 16.1:2.3:3.11-98. M., 1998 (izdanie 2005 g.). 31 p.
6. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoj obrabotki rezul'tatov issledovanij). M.: Al'yanC, 2011. 350 p.
7. Vremennyj maksimal'no-dopustimyj uroven' (MDU) soderzhaniya nekotoryh himicheskix elementov i gossipola v kormah dlya sel'skoxozyajstvennyh zhivotnyh i kormovyh dobavkah / Utv. Zam. nachal'nika Glavnogo upravleniya veterinarii Gosagroproma SSSR A.D. Tret'yakovym 7 avgusta 1987 goda [Elektronnyj resurs]. URL: www.consultant.ru. (data obrashcheniya 10.02.2022 g.).
8. Syso A.I. Rossijskie normativy ocenki kachestva pochv i kormov: problemy ih ispol'zovaniya // Ekologicheskij monitoring okruzhayushchej sredy / Materialy mezhdunarodnoj shkoly molodyh uchenykh. Novosibirsk: Izdatel'skij centr NGAU «Zolotoj kolos», 2016. P. 153–168.
9. Il'in V.B. Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie // Pochvovedenie. 2007. No. 9. P. 1112–1119.
10. Syso A.I., Kolpashchikov L.A., Ermolov Yu.V., Cherevko A.S., Siromlya T.I. Elementnyj himicheskij sostav pochv i rastenij Zapadnogo Tajmyra // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2014. No. 6. P. 855–862.
11. Anspok P.I. Mikroudobreniya: Spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Agropromizdat. Leningr. otdnie, 1990. 272 p.

Submitted 30.03.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 28.04.2022

About the authors

TURCHINA, Tatiana Anatolyevna, Dr. Sci. (Agriculture), chief researcher, «Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic», Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 1 Komsomolskaya st., Norilsk 663302, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>, Author ID: 57039211000, Researcher ID: AAT-8537-2020, e-mail: tatturchina@mail.ru

YANCHENKO, Zoya Anatolyevna, Cand. Sci. (Biology), director, «Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic», Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 1 Komsomolskaya st., Norilsk 663302, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3534-4814>, e-mail: norilskniiks@mail.ru

For citation

Turchina T.A. Yanchenko Z.A. Assessment of the reindeer pastures safety in the Avam tundra: content of heavy metals in the vegetative organs of plants // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 246–257. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257>

Анализ регрессионных связей температуры воздуха на разных высотах в горах Северного Урала

Н.В. Танцырев, Н.С. Иванова*, И.В. Петрова

Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*i.n.s@bk.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной современной проблеме: выявлению температурных факторов, лимитирующих распространение и выживание растений в горных условиях Северного Урала. Цель работы – установление регрессионных связей температурных данных в четырех высотных поясах южной части Северного Урала (59°30' с.ш., 59°15' в.д.) с контрольными температурными данными метеостанции г. Карпинск (Свердловская область 59°46' с.ш., 60°00' в.д.). Запись температур воздуха проводилась круглосуточно через каждые 2 ч на высоте 1,5–2 м от поверхности почвы с мая по октябрь 2019 г. в горнолесном поясе на высотах 460 и 640 м н.у.м. под пологом кедровых древостоев, в поясе подгольцовых редкостойных криволесий с элементами горной лесотундры на высоте 820 м н.у.м. и на плато в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м. Выявлено, что изменение температуры воздуха на разных высотных уровнях и на метеостанции происходит относительно синхронно, при этом разность среднесуточных температур с контрольными данными метеостанции на высотах 460, 640, 820 и 1030 м н.у.м. соответственно составляет 2,2, 3,0, 4,7 и 5,1 °С. Для всех высотных уровней установлена достоверная тесная прямолинейная связь среднесуточных температур воздуха с данными метеостанции. Для высот 460, 640, 820 и 1030 м н.у.м. коэффициент детерминации (R^2) составляет соответственно 0,96, 0,95, 0,92 и 0,88. Связи максимальных и минимальных температур в зависимости от высоты местности над уровнем моря с контрольными данными метеостанции также достаточно высоки (R^2 не опускается ниже 0,83 для максимальных и 0,7 для минимальных). С помощью выявленных связей и полученных уравнений регрессии открывается возможность ретроспективного восстановления динамики термического режима по данным метеостанции г. Карпинск для разновысотных горных местообитаний в южной части Северного Урала за многолетний период, в том числе крайних критических температур, которые выступают факторами, лимитирующими расселение и выживание растений, определяют биоразнообразие экосистем.

Ключевые слова: Северный Урал, горные экосистемы, высотные пояса, температура воздуха

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада УрО РАН.

Введение

Важность биосферной роли горных экосистем признается многими исследователями [1, 2]. Именно в горных районах находится более половины всех глобальных горячих точек, связанных с биологическим разнообразием, а от водоохранной функции горных экосистем зависит половина населения планеты [3]. Однако, одновременно с этим, горные экосистемы оказываются наиболее чувствительными к внешним воздействиям, в том числе к изменению климата [1, 3–5]. Поэтому со второй половины XX века в связи с прогрессирующим климатическими

сменами проблема динамики растительности в экстремальных горных условиях – одна из приоритетных в международной биогеографии [2, 6–8]. Многочисленные исследования подтверждают, что изменение климата может выйти за пределы адаптивной способности естественной растительности [9–12] и возникнет угроза катастрофических смен биоразнообразия, потеря устойчивости как локальных экосистем, так и биосферы в целом [4, 10, 13, 14]. Для горных территорий Урала, в силу водорегулирующих функций двух крупных водных бассейнов (Волжско-Камского и Обского), данная проблема стоит особенно остро.

Предположительно в связи с климатическими изменениями в последние 30–50 лет за счет интенсивного поселения лесообразующих древесных растений выше существующей верхней границы леса на Северном Урале наметилась тенденция ее повышения [15, 16]. Для ретроспекции климатических изменений и их влияния на рост и развитие древесных растений в экстремальных условиях верхней границы леса применяется главным образом дендрохронологический анализ в сочетании с температурными данными региональных метеостанций [17–19]. Несмотря на то что данный анализ хорошо себя зарекомендовал, с его помощью нельзя получить

всю необходимую для прогнозных моделей информацию, особенно в начальной стадии формирования дендроценозов. Имеющиеся данные метеостанций, в связи с их удаленностью, не всегда позволяют выявить региональные и ландшафтные особенности климатических условий для горных систем и не дают необходимую информацию для разработки прогнозных моделей динамики экосистем. Надежные долгосрочные разновысотные данные о горном климате, которые позволяют проверять региональные климатические модели, существуют лишь для очень немногих районов, например, таких как Европейские Альпы [3, 20]. Поэтому проблема выяв-

Таблица 1

Характеристика пробных площадей

Table 1

Characteristics of the sample plots

Номер ПП SP number	Высота, м н.у.м. Height (in m above sea level)	Горный пояс Mountain high-altitude belt	Тип фитоценоза Type of phytocenosis	Характеристика древостоя Stand characteristics			
				Видовой состав Species composition	h, м (m)	d, см (sm)	S, м ² (m ²)
ПП1 SP1	460	Низкогорный таежный Low-mountain taiga	Е-К тр.зм Dark coniferous grass-green mossy forest	3Е2К2С1П2Ос	24	28	39,5
ПП2 SP 2	640	Среднегорный таежный Mid-mountain taiga	К тр.зм. Forest dominated by Siberian pine grass-green moss	6К3Е1П+Б	18	32	22,4
ПП3 SP 3	820	Подгольцовый таежный Sub char taiga	К км. Sub char forest dominated by Siberian pine	7К2Е1Б	6,5	20	11,0
ПП4 SP 4	1030	Горнотундровый Mountain tundra	Кч.м.лш. Shrub-moss- lichen mountain tundra with Siberian pine young growth	—	—	—	—

Примечание. Тип фитоценоза: тип леса по Б.П. Колесникову [21]: Е-К тр.зм. – ельник-кедровник травяно-зеленомошный, К тр.зм. – кедровник травяно-зеленомошный, К км. – кедровник каменистый; тип горной тундры по П.Л. Горчаковскому [22]: Кч.м.лш. – горная тундра кустарничково-мохово-лишайниковая; h, м – средняя высота древостоя, м; d, см – средний диаметр стволов на высоте 1,3 м, см; S, м² – сумма площадей сечений стволов, м² на 1 га.

Note. Type of phytocenosis: forest type according to B.P. Kolesnikov [21], type of mountain tundra according to P.L. Gorchakovsky [22]; h, m – the average stand height (m); d, cm – the average trunks diameter at a height of 1.3 m (sm); S, m² – the sum of the cross-sectional areas of the trunks (m² per 1 ha).

ления факторов, лимитирующих выживание и распространение растений и животных в горных условиях, остается до сих пор не решенной.

Цель данной статьи – исследование регрессионных связей данных термодатологгеров, установленных в четырех высотных поясах Северного Урала, в том числе в условиях горной тундры выше современной верхней границы леса с температурными данными метеостанции г. Карпинск (Свердловская область). В перспективе – обоснование методики исследования динамики возобновления кедра (*Pinus sibirica* Du Tour) и сопутствующих видов выше существующей верхней границы леса, за последние 50 лет, в связи с погодичной динамикой температуры воздуха и верхнего горизонта почвы, реконструированной на основе этих связей.

Материал и методика

Исследования проведены в течение четырех лет с мая по октябрь в южной части основного водораздела Северного Урала (Новолялинское, Карпинское лесничества Свердловской области) на четырех высотных уровнях горы Третий Бугор (высота 1060 м над уровнем моря (н.у.м.)

59°30' с.ш., 59°15' в.д.): в горно-таежном поясе под пологом кедрового древостоя на высотах 460 м н.у.м. (П1) и 640 м н.у.м. (П2); в поясе подгольцовых редкостойных криволесий с элементами горной лесотундры на высоте 820 м н.у.м. (П3); на плато в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м. (П4). Характеристика пробных площадей приведена в табл. 1. Высота над уровнем моря (н.у.м.) определялась с помощью GPS-навигатора. Запись температур воздуха на высоте 1,5–2 м от поверхности почвы (с микроклиматической защитой от инсоляции) и почвы на глубине 5 см осуществлялась установленными на соответствующих высотных уровнях термодатологгерами, круглосуточно через каждые 2 ч. Метеостанция расположена на расстоянии 60 км от объектов исследования в г. Карпинск (59°46' с.ш., 60°00' в.д. на высоте 202 м н.у.м.). В работе приведены результаты исследований 2019 г.

На основе полученных временных рядов динамики температуры рассчитывались следующие показатели: среднесуточная температура, количество дней со среднесуточной температурой выше 5 и 10 °С, ниже 0 °С, сумма положитель-

Таблица 2

Основные температурные параметры на исследованных высотных поясах за период с 21 мая по 31 августа

Table 2

The main temperature parameters in the studied altitude zones for the period from 21 May to 31 August

Месторасположение / Location Высота, м н.у.м. / Height (in m above sea level)	К 202	П1 460	П2 640	П3 820	П4 1030
$N_{д} с t^{\circ} > 5^{\circ}C$	100	98	96	88	85
$N_{д} с t^{\circ} > 10^{\circ}C$	86	73	67	57	50
$N_{д} с t^{\circ} < 0^{\circ}C$	–	–	–	3	3
$\sum (+t^{\circ}C)$	1479,1	1249,2	1170,6	1004,2	962,1
t° средняя за летний период t° average for the summer period	14,8	12,5	11,8	10,1	9,8
$t^{\circ} \min$	–2,0	–2,5	–3,0	–5,0	–6,0
$t^{\circ} \max$	+31,4	+25,5	+24,5	+23,5	+23,0
Разность среднесуточных температур с К The difference in average daily temperatures with the weather station K	–	2,2±0,09	3,0±0,01	4,7±0,12	5,1±0,15

Примечание. К – контрольные данные метеостанции г. Карпинск; $N_{д}$ – количество дней со среднесуточной температурой; t° – температура, °С; $\sum(+t^{\circ}C)$ – сумма положительных среднесуточных температур.

Note. K – control data from the Karpinsk weather station; $N_{д}$ – the number of days with an average daily temperature; t° – temperature, degrees C; $\sum(+t^{\circ}C)$ – the sum of positive average daily temperatures.

ных среднесуточных температур, средняя температура за летний период наблюдения (с 21 мая по 31 августа), разность среднесуточных температур на пробных площадях с данными метеостанции в г. Карпинск. На основе регрессионного анализа проведено исследование связей темпе-

ратур воздуха на пробных площадях и метеостанции в г. Карпинск.

Результаты и обсуждение

В табл. 2 приведены обобщенные результаты наблюдений с 21 мая по 31 августа 2019 г. По

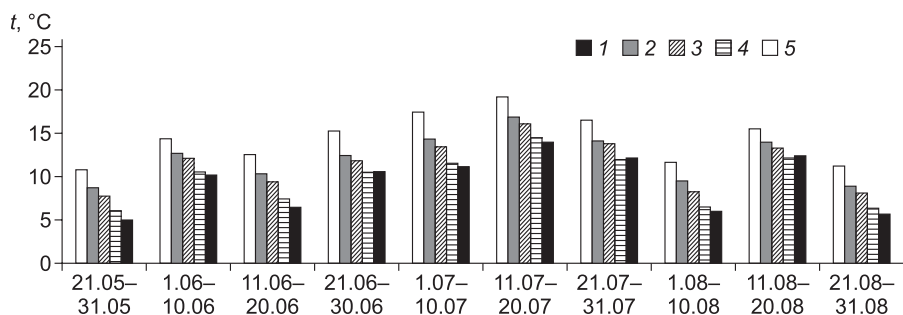


Рис. 1. Подекадная динамика средних температур воздуха: 1 – 460 м н.у.м.; 2 – 640 м н.у.м.; 3 – 820 м н.у.м.; 4 – 1030 м н.у.м.; 5 – контрольные данные метеостанции г. Карпинск.

Fig. 1. Sub-decadal dynamics of average air temperatures: 1 – 460 m above sea level; 2 – 640 m above sea level; 3 – 820 m above sea level; 4 – 1030 m above sea level; 5 – control data from the Karpinsk meteorological station.

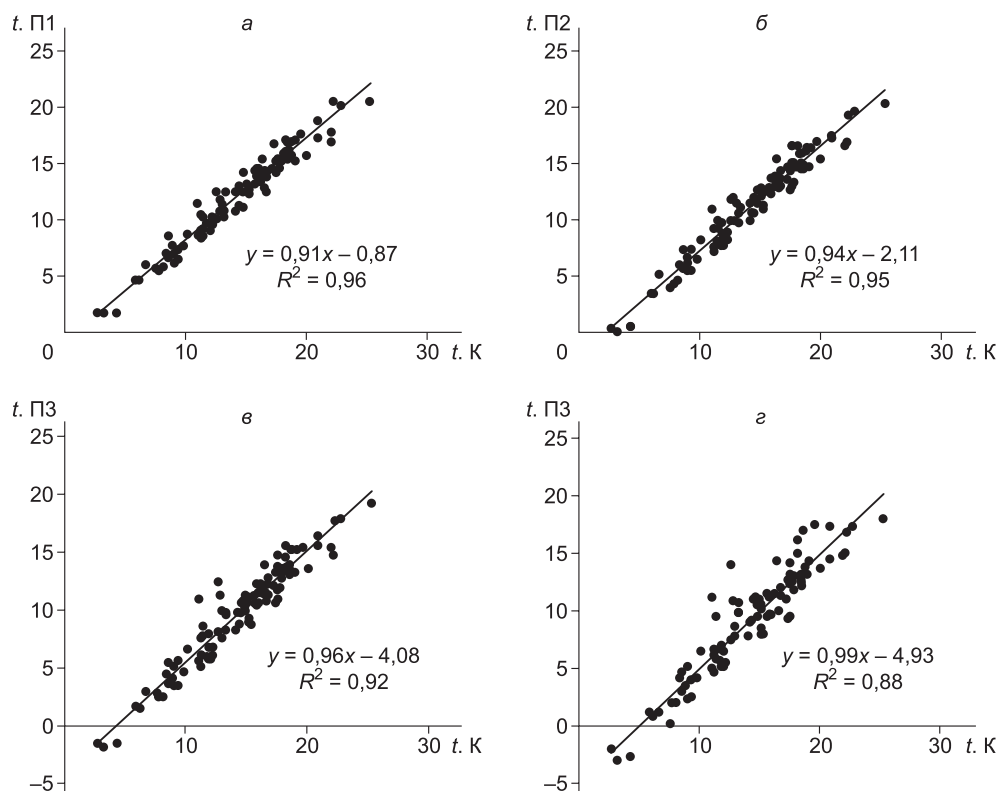


Рис. 2. Зависимость среднесуточной температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (a), на высоте 640 м н.у.м. ($б$), на высоте 820 м н.у.м. ($в$), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) ($з$) от среднесуточной температуры на метеостанции в г. Карпинск (K).

Fig. 2. Dependence of the average daily air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (a), at an altitude of 640 m above sea level ($б$), at an altitude of 820 m above sea level ($в$), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) ($з$) on the average daily temperature at the Karpinsk weather station (K).

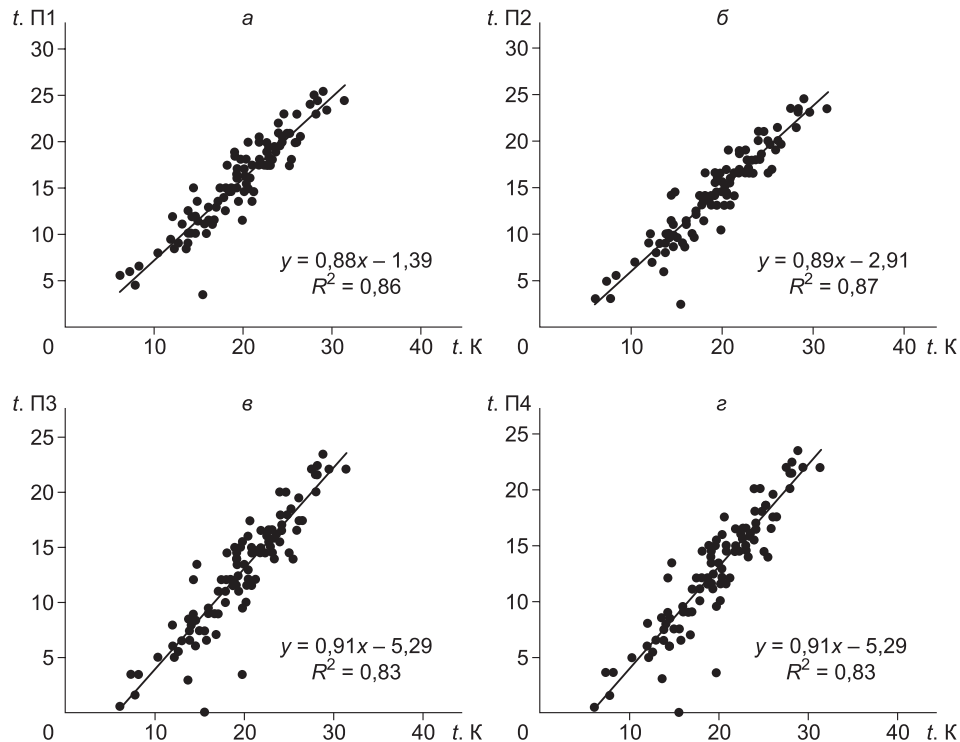


Рис. 3. Зависимость суточных максимумов температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (а), на высоте 640 м н.у.м. (б), на высоте 820 м н.у.м. (в), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) (г) от суточных максимумов температуры на метеостанции в г. Карпинск (К).

Fig. 3. The dependence of the daily maxima of air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (а), at an altitude of 640 m above sea level (б), at an altitude of 820 m above sea level (в), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) (г) on the daily maxima of temperature at the Karpinsk weather station (K).

мере повышения месторасположения проводимых измерений наблюдается снижение среднесуточных температур воздуха и соответственно увеличение разности с данными метеостанции.

Возможно, влияние на температурные данные на высоте 460 и 640 м н.у.м. оказывает инсолирующая поверхность древесного полога (сомкнутость крон около 70 %), в то время как в поясе редкостойных криволесий на высоте 820 м н.у.м. древесные растения единичны (сомкнутость крон не более 30 %), а в горной тундре (1030 м н.у.м.) они отсутствуют. Тем не менее, изменение температуры воздуха на разных высотных уровнях происходит относительно синхронно (рис. 1). Наиболее теплый период (продолжительностью около 40 дней) наблюдается с 21 июня по 31 июля. Кроме того, отмечено два коротких (не более 10 дней) теплых периода (в том числе и в поясе горной тундры на высоте 1030 м н.у.м.) в начале июня и в середине августа. При этом для всех высотных уровней установлена достоверная тесная прямолинейная связь среднесуточных

температур воздуха, записанных термодатологами, с данными метеостанции (рис. 2).

Полученные уравнения регрессии указывают на следующие факты. Во-первых, с увеличением высоты над уровнем моря коэффициенты a при значении x увеличиваются с 0,91 на высоте 460 м н.у.м. до 0,99 на высоте 1030 м н.у.м., но при этом они для всех изученных высотных поясов близки к единице. Это свидетельствует о том, что различия в температуре с данными метеостанции характеризует главным образом свободный член уравнения b . Во-вторых, коэффициент b в уравнении с увеличением высоты над уровнем моря увеличивается с 0,87 на 460 м н.у.м. до 4,93 на высоте 1030 м н.у.м., т. е. более чем в 5,5 раза. В-третьих, теснота выявленных зависимостей остается достаточно высокой для всех исследованных высотных поясов, несмотря на появление резких перепадов температуры с увеличением высоты местности, которые снижают тесноту установленных связей. Для высот 460, 640 и 820 м н.у.м коэффициент детерминации (R^2)

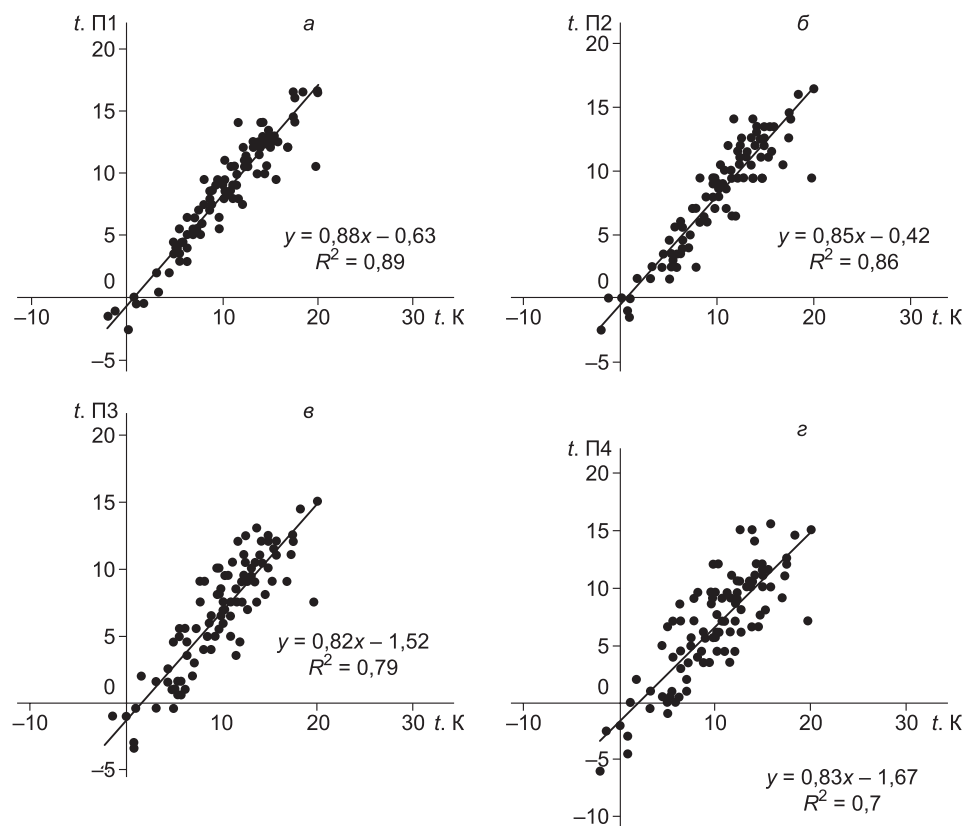


Рис. 4. Зависимость суточных минимумов температуры воздуха (t) на высоте 460 м н.у.м. (a), на высоте 640 м н.у.м. ($б$), на высоте 820 м н.у.м. ($в$), на высоте 1030 м н.у.м. (горная тундра) ($з$) от суточных минимумов температуры на метеостанции в г. Карпинск (K).

Fig. 4. Dependence of daily minima of air temperature (t) at an altitude of 460 m above sea level (a), at an altitude of 640 m above sea level ($б$), at an altitude of 820 m above sea level ($в$), at an altitude of 1030 m above sea level (mountain tundra) ($з$) on daily minima of temperature at the Karpinsk weather station (K).

составляет 0,96, 0,95 и 0,92 соответственно, для высоты 1030 м н.у.м. уже только 0,88.

Дополнительно нами исследованы связи максимальных и минимальных температур в зависимости от высоты местности над уровнем моря (рис. 3 и 4) с контрольными данными метеостанции. Исследуемые показатели являются важными для понимания расширения и сокращения ареалов видов растений их выживания и дифференциации растительности на высотные пояса.

Установлено, что для среднесуточных максимумов (см. рис. 3) сохраняется тенденция увеличения значений коэффициентов a при значении x с увеличением высоты над уровнем моря (с 0,88 на высоте 460 м н.у.м. до 0,91 на высоте 1030 м н.у.м.). Для среднесуточных минимумов (см. рис. 4) выявлена противоположная тенденция: снижения значений коэффициентов a при значении x с увеличением высоты над уровнем моря (с 0,88 на вы-

соте 460 м н.у.м. до 0,83 на высоте 1030 м н.у.м.). В целом теснота связи температур (как средних, так минимальных и максимальных значений) для всех исследованных высотных поясов с данными метеостанции остается высокой (R^2 не опускается ниже 0,88 для средних (см. рис. 2), 0,83 для максимальных (см. рис. 3) и 0,7 для минимальных (см. рис. 4) суточных температур).

Более подробный анализ заморозков показал, что за период измерений с 21 мая по 31 августа 2019 г. (103 дня) в подгольцовом поясе елово-кедровых редкостойных криволесий (П3) на высоте 820 м н.у.м. и выше границы леса в поясе горной тундры (П4) на высоте 1030 м н.у.м. в 2019 г. наблюдалось 3 дня (21, 24, и 25 мая) со среднесуточными отрицательными температурами. На нижних высотных уровнях в эти дни среднесуточная температура воздуха оставалась положительной (0,5–1,7 °C), хотя в ночные часы она опускалась до –3,0 °C, Кроме того на высотах 820

и 1030 м н.у.м. выявлены два летних заморозка: 13 июня (до $-2,0^{\circ}\text{C}$) и 15 июня (до $-0,5^{\circ}\text{C}$).

Заключение

В результате целосезонных наблюдений установлены тесные прямолинейные связи температур воздуха на четырех горных высотных поясах Северного Урала (включая горно-тундровый пояс) с контрольными температурными данными метеостанции г. Карпинск. Получены уравнения регрессии. С помощью выявленных связей открывается возможность ретроспективного восстановления динамики термического режима по данным метеостанции г. Карпинск для разновысотных горных местообитаний в южной части Северного Урала за многолетний период, в том числе минимальных и максимальных значений температур, которые выступают факторами, лимитирующими распространение и выживание растений, определяют видовой состав и биоразнообразие экосистем. Таким образом, может быть в какой-то мере решена давно назревшая методологическая проблема количественного анализа влияния динамики климата на многие популяционно-биологические процессы, в частности на динамику верхней границы леса.

Литература

1. Pătru-Stupariu I., Hossu C.A., Grădinaru S.R., Nita A., Stupariu M.-S., Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A.-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystem Services: From Theory to Practice // *Land*. 2020. Vol. 9(9). P. 336. <https://doi.org/10.3390/land9090336>
2. Gao J., Tang X., Lin S., Bian H. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995–2050) // *Forests*. 2021. Vol. 12(5). P. 616. <https://doi.org/10.3390/f12050616>
3. Kohler T., Maselli D. Mountains and Climate Change – From Understanding to Action. Published by Geographica Bernensia with the support of the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), and an international team of contributors. Bern, 2009. 78 p.
4. Иванова Н.С. Лесотипологические особенности биоразнообразия и восстановительно-возрастной динамики растительности горных лесов Южного и Среднего Урала: Дисс. ... докт. биол. наук / Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2019. 304 с.
5. Jandl R., Kindermann G., Foldal C., Schüler S., Bouissou C. Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment // *Forests*. 2021. Vol. 12(2). P. 256. <https://doi.org/10.3390/f12020256>
6. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 702. P. 134581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581>
7. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 609. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
8. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2388. 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0068806>
9. Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova N.S. Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications. John Wiley & Sons, 2016. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
10. Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 411. P. 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
11. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Adaptation of forest ecosystems to the humidity factor in the Middle Urals // *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta Seriya estestvennye nauki*. 2019. Vol. 161, No. 2. P. 293–306. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.293-306>
12. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of soil moisture regime on the species biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains // *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32, No. 2. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.011>
13. Kellomäki S. Managing Boreal Forests in the Context of Climate Change: Impacts, Adaptation and Climate Change Mitigation. CRC Press, 2016. 365 p. <https://doi.org/10.1201/9781315166063>
14. Ivanova N., Fomin V., Kusbach A. Experience of forest ecological classification in assessment of vegetation dynamics // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>
15. Шиятов С.Г., Мазена В.С. Современная экспансия лиственницы сибирской в горную тундру Полярного Урала // *Экология*. 2015. № 6. С. 403–410. <https://doi.org/10.1134/s1067413615060168>
16. Санников С.Н., Танцырев Н.В., Петрова И.В. Инвазия популяций сосны сибирской в горную тундру Северного Урала // *Сибирский экологический журнал*. 2018. № 4. С. 449–461. <https://doi.org/10.15372/SEJ20180406>
17. Шиятов С.Г. Дендрохронология верхней границы леса на Урале. М.: Наука, 1986 г. 136 с.
18. Hagedorn F., Rigling A., Shiyatov S.G., Mazeppa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Terent'ev M., Moiseev P.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Bugman H. Treeline advances along the Urals Mountain range – driven by improved winter conditions? // *Global*

Change Biology. 2014. Vol. 20, No. 11. P. 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>

19. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural Mountains despite a common thermal growth limit // Journal of Biogeography. 2020. Vol. 47, No. 8. P. 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>

20. Körner C. Alpine plant life. Functional plant ecology and high mountain ecosystems. Berlin: Springer Verlag, 1999. 238 p.

21. Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Практическое руководство. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.

22. Горчаковский П.Л. Растительный мир высокогорного Урала. М.: Наука, 1975. 281 с.

Поступила в редакцию 18.01.2022

Поступила после рецензирования 14.03.2022

Принята к публикации 29.03.2022

Об авторах

ТАНЦЫРЕВ Николай Владимирович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>, Author ID: 23995967800, Researcher ID: AAW-6195-2021, e-mail: 89502076608@mail.ru

ИВАНОВА Наталья Сергеевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>, Author ID: 56443439900, Researcher ID: O-8367-2019, e-mail: i.n.s@bk.ru

ПЕТРОВА Ирина Владимировна, доктор биологических наук, директор, Ботанический сад, Уральское отделение Российской академии наук, 620144, Екатеринбург, ул. 8 марта, 202а, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, Author ID: 55935284300, Researcher ID: N-6695-2018, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

Для цитирования

Танцырев Н.В., Иванова Н.С., Петрова И.В. Анализ регрессионных связей температуры воздуха на разных высотах в горах Северного Урала // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 258–267. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267

Analysis of regression relationships of air temperature at different altitudes in the mountains of the Northern Urals

N.V. Tantsyrev, N.S. Ivanova*, I.V. Petrova

Institute Botanic Garden UB RAS, Yekaterinburg, Russia

*i.n.s@bk.ru

Abstract. We investigate the temperature factors, which limit the spread and survival of plants in high mountain conditions of the Northern Urals. We aim to establish regression relationships of temperature data of four altitudinal belts in the southern part of the Northern Urals (59°30' N, 59°15' E) with the control data received from the Karpinsk meteorological station (Sverdlovsk region 59°46' N, 60°00' E). The air temperatures were recorded continuously day and night, every two hours, at a height of 1.5–2 m above the

soil surface from May to October 2019 at four elevation locations: 460 m a.s.l. (in the mountain forest belt, under the canopy of Siberian stone pine stands); 640 m a.s.l. (in the mountain forest belt, under the canopy of Siberian stone pine stands); 820 m a.s.l. (in the belt of sub-alpine woodlands with elements of mountain forest-tundra); 1030 m a.s.l. (on a plateau in the mountain tundra). We have established that the change in the air temperature at different elevation levels and at the meteorological station occurred relatively synchronously. The difference in average daily temperatures between the control data from the meteorological station and elevation points at 460, 640, 820 and 1030 m a.s.l. was 2.2, 3.0, 4.7 and 5.1 °C, respectively. We have established a reliable close rectilinear connection of the average daily air temperatures obtained from the station and all four elevation points. The coefficient of determination (R^2) for elevation levels at 460, 640, 820 and 1030 m a.s.l. was 0.96, 0.95, 0.92 and 0.88, respectively. The relationships between the maximum and minimum temperatures, depending on the elevation level, with the control data from the meteorological station were also quite high (R^2 does not fall below 0.83 for maximum and 0.7 for minimum). Identified relationships and obtained regression equations allow to reconstruct, retrospectively, the dynamics of the thermal regime based on the data from the Karpinsk meteorological station for mountainous habitats of different elevation levels in the southern part of the Northern Urals over a long-term period. The results also imply the possibility of reconstruction of extreme temperatures, which act as factors limiting dispersal and survival of plants, and determine the biodiversity of ecosystems.

Keywords: Northern Urals, mountain ecosystems, altitude zones, air temperature

Acknowledgements. The work was carried out within the state assignment of the Institute Botanic Garden Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

References

1. Pătru-Stupariu I., Hossu C.A., Grădinaru S.R., Nita A., Stupariu M.-S., Huzui-Stoiculescu A., Gavrilidis A.-A. A Review of Changes in Mountain Land Use and Ecosystem Services: From Theory to Practice // *Land*. 2020. Vol. 9(9). P. 336. <https://doi.org/10.3390/land9090336>
2. Gao J., Tang X., Lin S., Bian H. The influence of land use change on key ecosystem services and their relationships in a mountain region from past to future (1995–2050) // *Forests*. 2021. Vol. 12(5). P. 616. <https://doi.org/10.3390/f12050616>
3. Kohler T., Maselli D. Mountains and Climate Change – From Understanding to Action. Published by Geographica Bernensia with the support of the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), and an international team of contributors. Bern, 2009. 78 p.
4. Ivanova N.S. Lesotipologicheskie osobennosti bio-raznoobrazie i vosstanovitel'no-vozrastnoy dinamiki rastitel'nosti gornych lesov Yuzhnogo i Srednego Urala. Diss. ... dokt. biol. nauk. [Forest typological features of biodiversity and restoration-age dynamics of vegetation of mountain forests of the Southern and Middle Urals. Dr. biol. sc. diss.] Yekaterinburg, 2019. 304 p.
5. Jandl R., Kindermann G., Foldal C., Schüller S., Bouissou C. Early Performance of Tree Species in a Mountain Reforestation Experiment // *Forests*. 2021. Vol. 12(2). P. 256. <https://doi.org/10.3390/f12020256>
6. Mengist W., Soromessa T., Legese G. Ecosystem services research in mountainous regions: A systematic literature review on current knowledge and research gaps // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 702. P. 134581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134581>
7. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A. Genetic forest typology as a scientific and methodological basis for environmental studies and forest management // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 609. 012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012044>
8. Fomin V., Ivanova N., Mikhailovich A., Zolotova E. Problem of climate-driven dynamics in the genetic forest typology // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (mosm2020): AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2388. 030007. <https://doi.org/10.1063/5.0068806>
9. Maiti R., Rodriguez H.G., Ivanova N.S. Autoecology and Ecophysiology of Woody Shrubs and Trees: Concepts and Applications. John Wiley & Sons, 2016. 352 p. <https://doi.org/10.1002/9781119104452>
10. Shirk A.J., Cushman S.A., Waring K.M., Wehenkel C.A., Leal-Sáenz A., Toney C., Lopez-Sanchez C.A. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes // *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 411. P. 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.025>
11. Ivanova N.S., Zolotova E.S. Adaptation of forest ecosystems to the humidity factor in the Middle Urals // *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta Seriya estestvennye nauki*. 2019. Vol. 161, No. 2. P. 293–306. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.2.293-306>
12. Ivanova N.S., Zolotova E.S., Li G. Influence of soil moisture regime on the species biomass of the herb layer of pine forests in the Ural Mountains // *Ecological Questions*. 2021. Vol. 32, No. 2. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2021.011>
13. Kellomäki S. Managing Boreal Forests in the Context of Climate Change: Impacts, Adaptation and Climate Change Mitigation. CRC Press, 2016. 365 p. <https://doi.org/10.1201/9781315166063>

14. *Ivanova N., Fomin V., Kusbach A.* Experience of forest ecological classification in assessment of vegetation dynamics // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3384. <https://doi.org/10.3390/su14063384>.
15. *Shiyatov S.G., Mazepa V.S.* Contemporary expansion of Siberian larch into the mountain tundra of the Polar Urals // *Russian Journal of Ecology*. 2015. Vol. 46, No. 6. P. 495–502. <https://doi.org/10.1134/S1067413615060168>.
16. *Sannikov S.N., Tantsyrev N.V., Petrova I.V.* Invasion of Siberian Pine Populations in Mountain Tundra in the Northern Urals // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, No. 4. P. 396–405. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040078>.
17. *Shiyatov S.G.* Dendrokronologiya verkhney grantsy lesa na Urale. Moskva: Nauka, 1986. 136 p.
18. *Hagedorn F., Rigling A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S., Devi N.M., Grigor'ev A.A., Terent'ev M., Moiseev P.A., Bartysh A.A., Fomin V.V., Kapralov D.S., Bugman H.* Treeline advances along the Urals Mountain range – driven by improved winter conditions? // *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20, No. 11. P. 3530–3543. <https://doi.org/10.1111/gcb.12613>
19. *Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Nagimov Z.Y.* Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural Mountains despite a common thermal growth limit // *Journal of Biogeography*. 2020. Vol. 47, No. 8. P. 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>
20. *Körner C.* Alpine plant life. Functional plant ecology and high mountain ecosystems. Berlin: Springer Verlag, 1999. 238 p.
21. *Kolesnikov B.P., Zubareva R.S., Smolonogov Ye.P.* Lesorastitel'nyye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti. Prakticheskoye rukovodstvo. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1973. 176 p.
22. *Gorchakovskiy P.L.* Rastitel'nyy mir vysokogor-nogo Urala. M.: Nauka, 1975. 281 p.

Submitted 18.01.2022

Revised 14.03.2022

Accepted 29.03.2022

About the authors

TANTSZYREV, Nikolay Vladimirovich, Cand. Sci. (Biology), scientific researcher, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1904-4751>, Author ID: 23995967800, Researcher ID: AAW-6195-2021, e-mail: 89502076608@mail.ru

IVANOVA, Natalya Sergeevna, Dr. Sci. (Biology), leading researcher, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0845-9433>, Author ID: 56443439900, Researcher ID: O-8367-2019, e-mail: i.n.s@bk.ru

PETROVA, Irina Vladimirovna, Dr. Sci. (Biology), director, Institute Botanic Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 202a, 8 Marta st., Yekaterinburg 620144, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5689-8452>, Author ID: 55935284300, Researcher ID: N-6695-2018, e-mail: irina.petrova@botgard.uran.ru

For citation

Tantsyrev N.V., Ivanova N.S., Petrova I.V. Analysis of regression relationships of air temperature at different altitudes in the mountains of the Northern Urals // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 258–267. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-258-267>

Seasonal changes in the level of endogenous ethanol and acetaldehyde in the blood of large herbivorous mammals of the Arctic and Subarctic

O.N. Kolosova*, B.M. Kershengolts

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk

**kololgonik@gmail.com*

Abstract. *We investigate seasonal changes in the state of endogenous system of ethanol/acetaldehyde metabolites in the organisms of the large herbivorous mammals of the Arctic and Subarctic – reindeer (R) and Yakut breed horse (YH). We focus on the content of endogenous ethanol (EE) and endogenous acetaldehyde (EA) in the blood of the animals, along with the activity and concentration of alcohol dehydrogenase (ADH) and aldehyde dehydrogenase (ALDH) in their livers. We analyzed the involvement of the endogenous system in the adaptation mechanisms of the aboriginal herbivorous mammals to the extreme climate conditions at the high latitudes. The biomaterial (blood, liver) for the study was collected immediately after the slaughter in winter (December–January) and summer (June–July) in 2017–2019. The animals led an active lifestyle throughout the year in native environment. The number of R in each season made 30, the number of YH – 40. The seasonal temperature fluctuations ranged from –50 °C (in winter) to +38 °C (in summer). We used the method of gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS) to determine the EE and EA concentration in the animals' whole blood. It has been shown that the levels of EE and EA in the blood of the large herbivorous mammals under study were significantly higher than those of the laboratory animals and humans. We detected seasonal dynamics in the content of metabolites, namely, a synchronous increase in their concentrations in the blood during the period of low ambient temperatures. The mechanism of the latter included seasonal changes either in isozyme forms of ADH and ALDH, which differed in their catalytic and physicochemical parameters in R, or in the concentration of enzymes in YH. These changes represent physiological and biochemical adaptive adjustments that increase resistance of the animals to the cold. An increase in the content of endogenous ethanol in the blood of YH and R prove that their reserve catabolic materials capable of generating biochemically useful energy under stressful conditions are included in the energy metabolism. Furthermore, an increase in the content of endogenous acetaldehyde represents a mechanism for reducing the overall level of bioenergetic processes with a redistribution of their intensity towards the increased generation of thermal energy. The physiological function of the system of endogenous ethanol, acetaldehyde and their metabolizing enzymes is to regulate (increase) the body's resilience to the stressful impact of the cold.*

Keywords: biorhythms, seasons, metabolites, ethanol, acetaldehyde, dehydrogenases, cold, adaptation, reindeer, Yakut horse

Acknowledgements. *The study was conducted within the framework of the project “Physiological and biochemical mechanisms of adaptation of plants, animals, and humans to the conditions of the Arctic/Subarctic and the development of biological products based on natural northern raw materials that increase the efficiency of the adaptation process and the level of human health in the extreme environmental conditions” (No. 0297-2021-0025 registration number AAAA-A21-121012190035-9) of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center, SB RAS.*

Сезонные изменения уровня эндогенных этанола и ацетальдегида в крови крупных растительноядных млекопитающих Арктики и Субарктики

О.Н. Колосова*, Б.М. Кершенгольц

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск

*kololgonik@gmail.com

Аннотация. Проведено исследование сезонных (зима, лето) изменений состояния эндогенной системы метаболитов этанол/ацетальдегид (содержание эндогенного этанола (ЭЭ) и эндогенного ацетальдегида (ЭА) в крови, активность и концентрация алкогольдегидрогеназы (АДГ) и альдегиддегидрогеназы (АльДГ) печени) в организмах северного оленя (СО) и лошади якутской породы (ЯЛ), ее участия в механизмах адаптации аборигенных крупных северных растительноядных млекопитающих к экстремальным климатическим условиям высоких широт. Объекты исследования (СО и ЯЛ) относятся к аборигенным северным холодаадаптированным животным, ведущим круглогодично активный образ жизни в нативных условиях среды. Сбор биоматериала (кровь, печень) проводили сразу после забоя в нативных условиях в 2017–2019 гг. в декабре–январе и в июне–июле; nСО в каждом сезоне составило 30, nЯЛ – 40 особей. Сезонные колебания температуры в период проведения исследований составляли от -50°C (зимой) до $+38^{\circ}\text{C}$ (летом). Для определения концентрации ЭЭ и ЭА в цельной крови животных использовали метод газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС). Показано, что у крупных растительноядных млекопитающих Арктики и Субарктики (ЯЛ, СО) уровни ЭЭ и ЭА в крови значительно выше, чем у лабораторных животных и человека во все сезоны года. Выявлена выраженная сезонная динамика содержания изученных метаболитов, заключающаяся в синхронном повышении их концентраций в крови в период низких температур окружающей среды. Механизм последних – сезонные изменения либо изоферментных форм АДГ и АльДГ, различающихся своими каталитическими и физико-химическими параметрами (СО), либо концентраций ферментов (ЯЛ). Эти изменения и являются теми физиолого-биохимическими адаптивными перестройками, которые увеличивают устойчивость организма к холоду. Повышение содержания в крови ЯЛ и СО эндогенного этанола является свидетельством включения в энергетический обмен резервного катаболического сырья, способного генерировать биохимически полезную энергию в стрессогенных условиях, а повышение содержания эндогенного ацетальдегида является механизмом снижения общего уровня биоэнергетических процессов с перераспределением их интенсивности в сторону повышения генерации тепловой энергии. Физиологической функцией системы эндогенных этанола, ацетальдегида и ферментов их метаболизирующих является регуляция (повышение) устойчивости организма к стрессирующему воздействию холода.

Ключевые слова: биоритмы, сезоны, метаболиты, этанол, ацетальдегид, дегидрогеназы, холод, адаптация, северный олень, якутская лошадь

Благодарности. Исследование было проведено 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 АААА-А21-121012190035-9) Института биологических проблем криолитозоны ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Introduction

The organism of northern animals, adapted to cold, has specific morphological, physiological and biochemical characteristics, well-developed physi-

cal and chemical thermoregulation, established during the evolution and allowing them to exist in a sharply continental climate with an annual range of temperatures of about 100°C [1–4]. During the

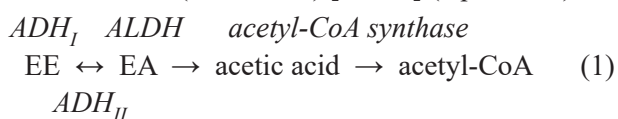
evolution under extreme climatic conditions (exposure to extreme cold, long light (in summer) or dark (winter) periods, sharp diurnal temperature differences (over 20 °C) geomagnetic disturbances, etc.), as well as with limited food availability in winter, the mechanisms for maintaining temperature homeostasis are formed and genetically inherited in the body of northern animals, which allow them to optimally perform their vital functions. Bioenergetic adjustments are an integral part of implementing the genetically inherent adaptation mechanisms [5–8].

Reindeer (*Rangifer tarandus*) and Yakut breed horse (YH) can be classified as large cold-adapted herbivorous mammals inhabiting in the Arctic and Subarctic. Reindeer (R) is naturally distributed in the Arctic and subarctic regions and is the only domesticated species among *Cervidae*. Yakut breed horse is the only horse breed with the unique properties that allow it to adapt to a year-round free grazing (in summer at the temperatures above +30 °C, in winter – below –50 °C). As a breed, YH has formed under the influence of extreme natural conditions in the high latitudes. Cold hardiness of R and YH is ensured by a well-developed physical and chemical thermoregulation and ethological features, allowing them to maintain a stable body temperature even under a very long exposure to very low ambient temperatures [1, 8, 10, 11] during the annual cycle. The ability of R and YH to endure winter cold is also associated with the high heat-insulating properties of their hair cover, which determines the minimum range of changes in their body temperature during the day [1, 4]. In preparation for winter, a decrease in the R body temperature has been identified, contributing to a decrease in the “environment-animal” temperature gradient and a more successful wintering [1, 3]. In winter, the mobility of the animals decreases; a statistically significant decrease in the level of metabolism and oxygen consumption is observed [1, 2]. In purebred YH, the minimum annual temperature does not fall below 31 °C. The level of metabolism of YH changes with a decrease in the ambient temperature, and it was found that at the temperature of minus (30–35) °C, the “winter” level of metabolism starts in the body, which is characterized by a decrease in the rate of metabolic reactions of the basal metabolism [1, 10]. On average, in winter, the horses’ level of metabolism is 40 % lower than in summer, and a decreasing respiratory quotient reaches the values that are not typical for herbivores. In summer months, R has the

highest average daily body temperature of R – up to +39.9 °C, compared to the minimum winter temperature of +33.0 °C [1]. In summer, YH body temperature can be higher for a longer time than in winter and depends on the ambient temperature to a lesser extent. Previous physiological and biochemical studies have shown that animals living in the North and leading an active lifestyle have less intensive respiration in winter, and oxygen aeration of organs and tissues drops by 38–40 % [1].

Under these conditions, the viability of organisms is to a certain extent ensured by switching of catabolic reactions from the oxidase to dehydrogenase metabolic pathways. At that, there emerges an additional opportunity of releasing the heat energy and maintaining a constant body temperature due to the residual activity of oxidase systems during the uncoupling of oxidative phosphorylation. When the level of aerobic reactions decreases, one of the possible adaptive mechanisms may be reservation and increase in the reduced entities’ content in the cells, that can serve as energy substrates, with endogenous ethanol (EE) being the most energetically intensive and, at the same time, rapidly involved in the metabolic processes. In terms of its bioenergetic efficiency (the amount of ATP per 1 g of bioenergetic substrate), ethanol is 1.75 times higher than glucose and only 1.38 times inferior to tripalmitin fat; its value as a bioenergetic substrate sharply increases when a nonspecific adaptive reaction “stress” is formed in the body [25].

In this regard, an important bioenergetic and regulatory role in the adaptation of animals to cold is played by the substrate-enzymatic system, which includes EE, endogenous acetaldehyde (EA), and their metabolizing enzymes: alcohol dehydrogenase – ADH (AP 1.1.1.1), and aldehyde dehydrogenase – ALDH (AP 1.2.1.3) [12, 13] (equation 1).



It is known that EE and EA are important metabolites of a number of strains of microorganisms, plant tissues, homeothermic and heterothermic animals [12–18]. The formation of EE can occur during the EA reduction, formed during pyruvate dehydrogenase during the abstraction of an intermediate product in the pyruvate decarboxylase complex [16], as well as during the decarboxylation of lactate accumulated in the red skeletal muscles during glycolysis under oxygen deficiency [18]. The metabolism

of EE and EA is associated with the basal metabolism through the formation of acetyl-CoA. EA is involved in the metabolism of biogenic amines, which, among other things, provide synaptic transmission of nerve impulses [17], as well as involve in the regulation of mitochondrial terminal oxidation [16].

The content of EE and EA and the ratio of their levels are mainly maintained by the dehydrogenase enzymatic system, consisting of two NAD-dependent enzymes: ADH and ALDH. ADH-dependent reaction is reversible, whereas ALDH-dependent reaction is irreversible. ADH-dependent conversion of EE occurs through its oxidation first to EA, then to acetic acid, followed by the formation of its conjugate with coenzyme A – acetyl-CoA (see equation 1), which further enters into a wide variety of catabolic and anabolic transformations. It has been shown that up to 95 % of ADH is contained in the liver, about 3 % in the surface mucous cells of stomach, and about 0.025 % in the brain [15–18]. Similar to ADH, two groups of ALDH isoforms are distinguished: with high affinity to aldehyde (Michaelis constant $K_{\text{Mald.}} = 0.1\text{--}1.0\text{ mcM}$) – ALDH_1 , and with low affinity to it ($K_{\text{Mald.}} = 0.1\text{--}1.0\text{ mM}$) – ALDH_2 [13, 16]. Due to the heterogeneity of the isozyme composition of both enzymes, the levels of EE, EA and their ratios can vary over a fairly wide range.

EE and EA are seen as metabolites that control a large part of the homeostasis mechanisms, ensuring the optimal vital functions of living organisms in various living conditions [14, 15, 17, 18]. In the course of evolution, the predominant catabolic function of the EE-EA system was replaced by the regulatory one [12, 14, 15]. The normal level of homeostasis in laboratory animals and humans is maintained with the EE concentrations of about 0.05–0.2 mM, and EA concentrations of about 0.3–0.8 mcM in the blood. The biological role of EE is diverse. (1) It is a high-energy compound, and under normal conditions it can provide up to 10 % of the body's energy needs; (2) it involves in maintaining the liquid-crystalline, fluid state of the lipid layer of membranes, fluidifying them [18–20, 21]; (3) it is a regulator of lipid peroxidation (LPO) in the cell membranes, showing the properties of a free radical scavenger and activating cholesterol synthesis [20, 21]. Dissolving well both in the glyco-protein and the lipid layer of the membranes, and reducing their viscosity, EE changes the conformation of membrane receptors, modulating their affinity to intracellular and intercellular regulators. (4) Ethanolamine molecules – a component of one of the most common types of

phospholipids in the cell membranes – phosphatidylethanolamines, are synthesized from EE [20, 21]. (5) EE is a cellular depot and a form of transportation for an important metabolic regulator, EA.

EA is chemically very active. It does not penetrate cell membranes, but it can change their permeability to other substances. The biological functions of EA are: (1) regulation (inhibition) of bioenergetic reactions in the chain of terminal oxidation of electron transfer from NADH to FAD by flavin enzymes; (2) regulatory modification (through the formation of Schiff's bases) of opioid peptides. (3) EA is involved in the synthesis of endogenous morphine and morphine-like compounds; (4) it regulates the metabolism of the most important neurochemical mediators of amine nature: dopamine, noradrenaline, serotonin; adrenaline hormone [16, 17]. (5) There is information about the effect of EA or its condensation products with catecholamines (salsolinol) on the functional state of opiate receptors [17]. All the above allows us to consider the EE-EA system an important element of nonspecific regulatory systems of the body, providing the body's adaptive capabilities to stress, including, apparently, the cold stress.

The aim of this work is to study seasonal (winter, summer) changes in the state of the endogenous ethanol/acetaldehyde system (the content of EE and EA in the blood, the activity of ADH and ALDH of liver) in the body of reindeer and Yakut breed horse, its involvement in the mechanisms of adaptation of aboriginal large northern herbivorous mammals to the extreme climatic conditions of the high latitudes.

The working hypothesis of the study is the assumption that an increase in the content of EE in the YH and R blood proves the inclusion in the energy metabolism of a reserve catabolic raw material, capable of generating biochemically useful energy under stressful conditions, and an increase in the EA content is a mechanism for a decrease in the overall level of bioenergetic processes with a redistribution of their intensity towards the increase in the generation of heat energy.

Material and method

The objects of study: reindeer (*Rangifer tarandus L.*) and Yakut breed horse, being the aboriginal northern cold-adapted animals, with an all-year-round active lifestyle in their native environmental conditions. The biomaterial (blood, liver) was collected immediately after a slaughter in the native conditions in 2017–2019 in December–January and

June–July; the number of R in each season was 30, whereas the number of YH made 40 individuals. The seasonal temperature fluctuations during the research period ranged from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (in winter) to $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (in summer).

All research was conducted in compliance with the International Guiding Principles for Biomedical Research Involving Animals, based on the protocol of the Bioethics Committee of Yakutsk Scientific Center for Complex Medical Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Biochemical studies were carried out on the basis of the Department of Ecological and Medical Biochemistry and Biotechnology of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center, SB RAS (Yakutsk, Russia).

To determine the EE and EA concentration in the animals' whole blood, the method of gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS) was used [22]. To prepare the samples, 100 μl of whole blood was added by 100 μl of the internal standard (1-propanol), and dissolved in 500 μl of a 1.2 % solution of Triton X-100 in acetonitrile. It was centrifuged at 10,000g for 5 minutes, the supernatant was collected and put into the chromatograph. Agilent 7820A gas chromatograph with Agilent MSD 5975 mass spectrometric detector was used. Agilent HP-INNOWAX column (30 m $\cdot$ 0.25 mm, DF = 0.25 μm). The injector temperature was $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, forline temperature $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. The carrier gas was helium, the flow rate was 1.5 ml/min. The temperature gradient: $40\text{ }^{\circ}\text{C} - 2\text{ min}$, $40 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 5\text{ min}$. The sample input volume made 5 μl , the input mode – with a split flow in a ratio of 1:100 and a speed of 150 ml/min. Detection conditions: source temperature (MS Source) $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, quadrupole temperature (MS Quad) $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. The scanning parameters from 10 to 500 masses, the gain factor – 16 (2518 V). The scanning speed is normal. When constructing a calibration curve, standard solutions of ethanol, acetaldehyde, and an internal standard were used in the concentration range from 0.02 mg/l to 1 mg/l.

For kinetic studies, the following procedure was used to purify the enzymes from the animals' liver. The frozen liver was washed from blood by repeatedly perfusing it in a cooled physiological saline solution ($T = 0^{\circ}\text{C}$). After perfusion, the liver should be pale yellow. In the cold, the liver was chapped and then weighed. Liver was homogenized

in a mechanical homogenizer; the end-point dilution of the homogenate was usually 2:1 (2 ml of 0.05 M glycine solution and 1 g of liver). To remove the completely destroyed cells and nuclei, the tissue homogenate was centrifuged for 30 minutes at 7000 G ($T = +2\text{ }^{\circ}\text{C}$). The supernatant was carefully tapped out. The loose sediment containing nuclei and intact cells was discarded. Cooled ethanol ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) of a final concentration of 20 % was added to the supernatant. The mixture was intensively shaken and then re-centrifuged. The supernatant was passed through a column with Sephadex G-100 (1.5 $\times$ 90 cm), equalized with 0.5 M glycine solution ($T = +2\text{ }^{\circ}\text{C}$). In the selected fractions, the activity of alcohol and aldehyde dehydrogenases was determined. The fractions with the maximum content of enzymes were selected for studying, by measuring the absorption of proteins at 280 nm.

When determining the concentration of liver ADH, the ADH active centers titration method with hydroxymyrcuribenzoate (HMB) was used, based on the high affinity of mercury-containing inhibitors to the SH-groups of the enzyme's active center [20]. Conditions: 0.1M Na-phosphate buffer, pH 6.5; concentrations: HMB – $0.02 \div 3.0\text{ mcM}$; NADH – 0.45 mM; acetaldehyde – 4 mM. The ADH concentration was calculated taking into account its dimeric form (2 inhibitor molecules are used for the titration of one ADH molecule).

The heterogeneity of liver ADH was studied by starch electrophoresis, using a modified technique described in the work of (Tsukamoto et al, 1980).

The ADH and ALDH activity in micromole/min per 1 g of liver [13], the ADH and ALDH Michaelis constant (K_M) for ethanol and acetaldehyde [19] was determined by a two-beam recording spectrophotometer Shimadzu UV – 2600 (Japan). The ALDH isoforms were differentiated into two groups by the kinetic method [22].

The conducted research is based on a simple random sampling. The normal distribution laws were checked using the Shapiro-Wilk test. The following characteristics of the sample were calculated: sample mean (M), standard error of the mean (m). The result was considered statistically significant at $p < 0.05$. To test the hypothesis about the presence of mean differences in the groups, a two-tailed Student's test (t) was used. To process the results, we used a statistical processing experimental data package in MS Excel and the statistical program Stat Plus 2007, Professional.

Results and discussion

The obtained results prove seasonal (winter-summer) changes in the EE and EA content in the blood and in the ADH and ALDH activities of liver, of both YH and R (table). Moreover, in all seasons under study, the EE concentration in these animals'

blood was significantly higher than in laboratory animals under the conditions of the North [14]: for YH in summer by 3.53 times, in winter – by 5.75 times; for R, by 11.8 times in summer and 8.8 times in winter.

The blood of the studied animals has shown a statistically significant increase in the EE concentration

Seasonal characteristics of the endogenous ethanol/acetaldehyde system in the body of large herbivorous mammals of the high latitudes

Сезонная характеристика эндогенной системы этанол/ацетальдегид в организме крупных растительноядных млекопитающих высоких широт

Parameters	Yakut horse		Reindeer	
	Winter ($n = 40$)	Summer ($n = 40$)	Winter ($n = 30$)	Summer ($n = 30$)
Activity of $ADH_I^{(1)}$ (mcM/ min · g liver)	2.12 ± 0.21	2.41 ± 0.20	0.55 ± 0.04	1.10 ± 0.09 * ($p = 0.000001$)
Activity of $ADH_{II}^{(2)}$ (mcM/ min · g of liver)	6.04 ± 0.40	6.92 ± 0.43	1.45 ± 0.12	5.81 ± 0.30 * ($f = 58$; $p = 0.000000$)
Concentration of ADH (nmol/g of liver)	103.08 ± 12.13	119.12 ± 12.02	39.32 ± 3.13 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)	38.94 ± 3.02 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)
$k_{cat} ADH_I^{(1)}$ (min^{-1}) (nmol/g of liver)	20.57 ± 2.42	20.23 ± 2.04	14.00 ± 1.11 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)	28.24 ± 2.19 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)
$k_{cat} ADH_{II}^{(2)}$ (min^{-1}) (nmol/g of liver)	58.60 ± 6.85	58.09 ± 5.85	36.88 ± 2.88 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)	149.20 ± 11.27 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)
$Km_{ADH-ethanol}^{(3)}$ (mmol/l)	0.50 ± 0.06	0.41 ± 0.05	0.80 ± 0.07	0.60 ± 0.04 * ($p = 0.016088$)
$Km_{ADH-aldehyde}^{(4)}$ (mmol/l)	0.42 ± 0.03	0.30 ± 0.03 * ($p = 0.0059$)	0.60 ± 0.05	0.40 ± 0.03 * ($p = 0.001129$)
Activity of ALDH mcM/min · g of liver) including the share (%):				
ALDH _I ⁽⁵⁾	35.12 ± 3.25	35.23 ± 3.92	35.12 ± 3.25	45.23 ± 3.92
ALDH ₂ ⁽⁶⁾	64.88 ± 5.63	64.77 ± 4.76	64.88 ± 5.63	54.77 ± 4.76
Km_{Aldh1} (mcM/l) ⁽⁷⁾	0.83 ± 0.32	1.02 ± 0.21	1.21 ± 0.14	1.02 ± 0.11
Km_{Aldh2} (mcM/l) ⁽⁸⁾	70.02 ± 10.02	73.17 ± 11.12	100.13 ± 12.02	90.14 ± 12.11
[ethanol] _{blood} mmol/l	0.92 ± 0.08	0.60 ± 0.05 * ($p = 0.001098$)	1.89 ± 0.11 ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)	1.41 ± 0.10 * ($p = 0.002064$) ** ($f = 68$; $p = 0.000000$)
[acetaldehyde] _{blood} mcM/l	9.51 ± 0.75	2.60 ± 0.24 * ($p = 0.000000$)	12.62 ± 0.76 ** ($f = 68$; $p = 0.004865$)	3.06 ± 0.28 * ($p = 0.000000$)
[EE]/[EA]	96.84	230.77	149.8	460.8

Note. The data is presented as $M \pm m$. * Reliability of difference as compared to a winter season. ** Reliability of difference between species in the same season.

⁽¹⁾ – activity of ADH in the ethanol oxidation reaction; ⁽²⁾ – activity of ADH in the acetaldehyde reduction reaction; ⁽³⁾ – ADH Michaelis constant for ethanol; ⁽⁴⁾ – ADH Michaelis constant for acetaldehyde; ⁽⁵⁾ – ALDH fraction is the most sensitive to acetaldehyde; ⁽⁶⁾ – ALDH fraction is less sensitive to acetaldehyde; ⁽⁷⁾ – ALDH_I Michaelis constant for acetaldehyde; ⁽⁸⁾ – ALDH₂ Michaelis constant for acetaldehyde.

in winter, compared to the summer period: YH by 1.53 times ($p = 0.001098$), R – by 1.34 times ($p < 0.01$). Moreover, in the blood of R, the level of EE both in winter and in summer was 2.0–2.4 times higher than of YH ($f = 68$; $p = 0.000000$; see the Table).

It was found that the EA level in the blood of the studied animals is higher than in the blood of laboratory animals (0.9–1.0 mM/l) in summer – by 2.9–3.4 times, in winter – by 9.5–12.6 times. The winter increase in the EA concentration in blood, as compared to the summer one, is 3.66 times for YH ($p = 0.000000$), for R – 4.12 times ($p = 0.000000$). At that, if in summer the content of EA in the blood of R is only 1.18 times higher than in the blood of YH, which is not significant, in winter these differences (1.33 times) become significant ($f = 68$; $p = 0.004865$).

We associated the obtained interspecies and seasonal changes in the EE and EA concentration with the corresponding changes in the activity and isozyme composition of ADH and ALDH.

In winter, in R liver of, the activity of ADH is reliably twice lower in the reaction of EE oxidation (ADH_I) and 4 times lower in the reaction of EA reduction (ADH_{II}), primarily due to a 2-fold decrease in the k_{cat} of ADH_I and a 4-fold decrease in the k_{cat} of ADH_{II} , i.e. due to a change not in the concentration of the enzyme, but in its isozyme spectrum in favor of less active forms of ADH, especially in the reaction of EA reduction. The calculation shows that this is what leads to a winter increase in the EE concentration in R blood by 1.34 times, and a simultaneous decrease in the activity of $ALDH_I$ by 1.29 times – to an increase in the EA concentration by 4.12 times. Therefore, the ratio of EE to EA concentrations in R blood in winter decreases, as compared to the summer period, by 3.08 times.

In YH liver, the activity of both ADH_I and ADH_{II} decreases in winter by 14–15 % due to a 16 % decrease in the ADH concentration. At that, the ADH concentration in Yakut horse liver is more than 10 times higher than in a human liver, 38 times higher than in laboratory rats, and in all seasons higher than in reindeer (2.62 times in winter and 3.06 times in summer; see the Table). In contrast to a relatively small winter decrease in the ADH concentration in YH liver, the EE concentration begins to decrease by 22 % due to the affinity of ADH for ethanol ($Km_{ADH-ethanol}$) and by 40 % for acetaldehyde ($Km_{ADH-ald}$), i.e., changes in the isozyme composition of ADH. The calculation shows that this is what leads to a winter increase in the EE con-

centration in R blood by 1.53 times, and a simultaneous decrease in ALDH activity by 1.64 times – to an increase in the EA concentration by 3.66 times. Therefore, the ratio of the concentrations of EE to EA in YH blood in winter decreases, in comparison with the summer period, by 2.38 times.

The obtained results confirm the validity of the working hypothesis. Apparently, the main goal of the winter increase in the EA level is the need for significant inhibition of aerobic bioenergetic processes aimed to reduce the level of basal metabolism and oxygen consumption in the body of YH and R, and, as a result, of the heat transmission coefficient, as well as switching of most of the processes of terminal oxidation of NADH and FADH to the heat energy production. The summer decrease in the EA concentration in the animals' blood aims to reduce the degree of inhibition of the terminal mitochondrial oxidation, which leads to the activation of aerobic bioenergetic processes and an increase in oxygen absorption, and thus, to the activation of heat production processes and an increase in summer body temperature [1, 2]. The winter increase in the EE concentration in the blood of R and YH contributes to maintaining the intensity of bioenergetic processes at a level sufficient to ensure the vital activity of the animals in the conditions of cold and anaerobic stress, due to the inclusion of reserve sources of biochemically useful energy in the bioenergetic exchange, whose dehydrogenase oxidation can be initiated under oxygen deficiency.

Both species of the studied animals are in open spaces all year round; they feed on poor food for a significant part of the annual cycle [1–4]. Moreover, since the evolution of a “Reindeer” species in the extreme conditions of the North by natural selection took much longer than that of a Yakut breed horse, the absolute concentrations of EE and EA in the blood and their seasonal changes in R are higher than in YH.

Conclusion

It has been shown that large herbivorous mammals of the Arctic and Subarctic (Yakut breed horse, reindeer) have significantly higher levels of EE and EA in their blood than laboratory animals and humans in all seasons of the year. Significant seasonal dynamics of the content of the studied metabolites was revealed, consisting in a synchronous increase in their concentrations in blood during the period of low ambient temperatures. The mechanism of the latter ones is seasonal changes either in isozyme

forms of ADH and ALDH, which differ in their catalytic and physicochemical parameters (reindeer), or in the concentration of enzymes (Yakut breed horse). These changes are those physiological and biochemical adaptive adjustments that increase the body's resistance to cold. The increased EE content in the blood of YH and R, apparently, makes it possible to maintain a body temperature during sharp (daily and seasonal) drops in the ambient temperature, to maintain a sufficiently wide thermoneutral zone and stable homeostasis within these temperatures.

The results of the studies indicate that during the evolution, the conjugated metabolites of EE and EA in the bodies of large homeothermic cold-adapted mammals with a year-round active lifestyle in the North form one of the systems for regulating the metabolic rate, that ultimately reduce the intensification of the bioenergetic exchange. Moreover, since the period of reindeer adaptation to northern conditions significantly exceeds that of a Yakut breed horse, the molecular mechanisms of the adaptation process at the level of epigenetic rearrangements have been formed in a R organism – the activation of alleles (loci) of the genome encoding ADH and ALDH isoforms with increased molecular activity. In the body of YH, the adaptation is simpler – a slight increase in the expression of genes encoding ADH and, apparently, ALDH, resulting in their increased concentrations.

This greatly expands the possibilities for the existence of northern species in extreme conditions. The physiological function of the system of endogenous ethanol, acetaldehyde and their metabolizing enzymes is to regulate (increase) the body's resistance to the stressful effects of cold.

References

1. Anufriev A.I. Ecological mechanisms of temperature adaptations of mammals and wintering birds of Yakutia. Novosibirsk, 2013. P. 172–177.
2. Slonim A.D. Thermal adaptations and temperature compensations in homeothermic organisms // *Animal Physiology*. L., 1981. Part 3. P. 41–47.
3. Weldenegodguad M., Pokharel K., Yao Ming, Honkatukia M., Peippo J., Reilas T., Røed K.H., Kantanen J. Genome sequence and comparative analysis of reindeer (*Rangifer tarandus*) in northern Eurasia // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No. 1. 10.1038/s41598-020-65487-y
4. Blix A.S. Adaptations to polar life in mammals and birds // *J. Exp. Biol.* 2016. Vol. 219. P. 1093–1105. DOI: 10.1242/jeb.120477pmid: 27103673
5. Weiqun Lu, Qing-Jun Meng, Tyler N.J.C., Stokkan K.-A., Loudon A.S.I. A circadian clock is not required in an Arctic mammal // *Current Biology*. 2010. Vol. 20, No. 6. P. 533–537 10.1016/j.cub.2010.01.042.
6. van Oort B.E.H., Tyler N.J.C., Gerkema M.P., Folkow L., Blix A.S., Stokkan K.-A. Circadian organization in reindeer // *Nature* 2005. Vol. 438. P. 1095–1096. DOI: 10.1038/4381095apmid: 16371996
7. Røed K.H., Flagstad O., Nieminen M., Holand O., Dwyer M.J., Røv N., Vilà C. Genetic analyses reveal independent domestication origins of Eurasian reindeer // *Proc. R. Soc. B* 275, 1849–1855 (2008). DOI: 10.1098/rspb.2008.0332pmid: 18460427
8. Stokkan K.-A., van Oort B.E.H., Tyler N.J.C., Loudon A.S.I. Adaptations for life in the Arctic: Evidence that melatonin rhythms in reindeer are not driven by a circadian oscillator but acutely remain sensitive to environmental photoperiod // *J. Pineal Res.* 2007. Vol. 43. P. 289–293. DOI: 10.1111/j.1600-079X.2007.00476.xpmid: 17803527
9. Lu W., Meng Q.J., Tyler N.J.C., Stokkan K.-A., Loudon A.S.I. A circadian clock is not required in an Arctic mammal. *Curr. Biol.* 2010. Vol. 20. P. 533–537. DOI: 10.1016/j.cub.2010.01.042pmid: 20226667
10. Cheremnykh I.E., Roschevsky M.P., Novozhilova E.A. Ungulates in the North. L., 1980. Quantity
11. Murphy B.A., Martin A.-M., Furney P., Elliott J.A. Absence of a serum melatonin rhythm under acutely extended darkness in the horse // *Journal of Circadian Rhythms* 2011. Vol. 9. 10.1186/1740-3391-9-3.
12. Kolosova O.N., Kershengolts B.M., Solomonov N.G. Endogenous ethanol and acetaldehyde in the mechanisms of regulation of the body's vital activity during hibernation // *Reports of the Academy of Sciences*. 2011. Vol. 441, No. 1. P. 118–121.
13. Jone Jorvall H., Hoog J., Bahr-Lindstrom H. et al. Alcoholdehydrogenases and aldehyddehydrogenases // *Biochem. Soc. Trans.* 1988. Vol. 6. No. 3. P. 223–227.
14. Kolosova O.N., Kershengolts B.M. Stabilization of homeostasis of rats' organism with ethanol under the exposure to cold // *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2015. Vol. 160, No. 9. P. 279–284.
15. Kolosova O.N., Kershengolts B.M. Endogenous ethanol and acetaldehyde in the mechanisms of adaptation of small mammals to Northern conditions // *Russ. J. of Ecology*. 2017. Vol. 48, Iss. 1. P. 68–72.
16. Komissarov I.A., Magalif A.Yu., Rotenberg Yu.S., Gudkova Yu.V. Molecular mechanisms of action of endogenous and exogenous ethanol // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Biology Series*. 1983. No. 2. P. 260–267.
17. Ostrovsky Y.M. Endogenous ethanol – its metabolic, behavioral and biomedical significance // *Alcohol*. 1986. Vol. 3. P. 239–247.
18. Agarwal D.P., Seitz H.K. Alcohol in Health and Disease. NY; Basel: Marcel Dekker, 2001. 647 p.
19. Collins M.A. Tetraisoquinolines in vivo. Rat brain formation of salsolinol, a product of dopamine and acetaldehyde under certain conditions during ethanol intoxication // *Life Sci.* 1975. Vol. 16. P. 585–602.
20. Prokopyeva V.D. Molecular mechanisms of ethanol and its metabolites effect on the cell membranes in vitro and in vivo. Abstract of doctoral thesis. Tomsk, 2003.

21. Ingram L.O., Cfrey V.C., Donebek K.M. On the relationship between alcohol narcosis and membrane fluidity // *Subst. Alcohol Acitons / Mesure*. 1982. Vol. 3, No. 4. P. 213–224.
22. Pontes H., Pinho P.G., Casal S., Carmo H., Santos A., Magalhães T., Remião F., Carvalho F., Bastos M.L. GC Determination of Acetone, Acetaldehyde, Ethanol and Methanol in Biological Matrices and Cell Culture // *J. of Chromatographic Sci.* 2009. Vol. 47. P. 272–278.
23. Rogozhin V.V., Govorova T.P., Kershengolts B.M. Selective method of titration of active sites of alcohol dehydrogenase with chloro-n-hydroxymercuribenzoate // *Bioorganic Chemistry*. 1988. Vol. 14, No. 12. P. 16–26.
24. Kershengolts B.M., Serkina E.V. Some methodological approaches to the study of ethanol metabolism. M., 1981. Dep. in VINITI, 1981, no. D-3793, 7 p.
25. Kershengolts B.M., Turnin Kh.Kh. Polymorphism of ADH and AIDH in the population groups of Yakutia and the forecast of the population resistance to alcohol // *Transactions of Yakutsk State University*. 1994. P. 138–149.
26. Kramarova L.I., Ziganshin R.Kh., Gakhova E.N. Endogenous Hypometabolic-Hypothermic Factors and Their Possible Application to Life in the Cold // *Russ. J. of Bioorganic Chemistry*. 2009. Vol. 35, No. 5. P. 538–548.
27. Khlenyy E.S., Kolosova O.N., Anufriev A.I., Kershengolts B.M. Experimental modelling of hipotermia at animals by means of modified regulator peptides, extracted at hibernating animals // *Cryobiology*. 2010. Vol. 61. Iss. 3. P. 365–366.

Submitted 24.03.2022

Revised 27.04.2022

Accepted 12.05.2022

About the authors

KOLOSOVA, Olga Nikolaevna, Dr. Sci. (Biology), professor, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy Sciences, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677890, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, SPIN 8510-3595, e-mail: kololgonik@gmail.com

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biology), professor, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy Sciences, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677890, Russia,

<https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kerschen@mail.ru

For citation

Kolosova O.N., Kershengolts B.M. Seasonal changes in the level of endogenous ethanol and acetaldehyde in the blood of large herbivorous mammals of the Arctic and Subarctic // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 268–276. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-268-276>

Поступила в редакцию 24.03.2022

Поступила после рецензирования 27.04.2022

Принята к публикации 12.05.2022

Об авторах

КОЛОСОВА Ольга Николаевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, e-mail: kololgonik@gmail.com

КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kerschen@mail.ru

Для цитирования

Колосова О.Н., Кершенгольц Б.М. Сезонные изменения уровня эндогенных этанола и ацетальдегида в крови крупных растительоядных млекопитающих Арктики и Субарктики // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022, Т. 27, № 2. С. 268–276. (на англ. яз.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-268-276>

Биологические ресурсы

УДК 630.*8.

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-277-281

Анализ таксационных показателей лиственничных лесов долины средней Лены

К.В. Алексеев

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
alkirill1993@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена характеристике древостоев лесов Центральной Якутии, уникальных по своим качествам и выполняемым функциям. Леса региона, произрастающие на мерзлотно-таежных почвах, характеризуются низкими показателями биологической продуктивности, сильной ранимостью и уязвимостью к воздействию антропогенных факторов. Лиственничные леса разнотравно-брусничные в районе исследования являются господствующим типом леса на надпойменной террасе и на водораздельных участках из-за специфических эдафических условий произрастания. Древостои с низкой производительностью, оцениваются V–Va классами бонитета чистые, обычно без примеси других пород. Средняя высота деревьев в местности колеблется от 6 до 11 м. Целью проведенных исследований является анализ структуры древостоев основных типов лиственничных лесов долины Средней Лены в пределах Намского улуса Республики Саха (Якутия). В статье рассмотрена взаимосвязь основных таксационных показателей лиственничных древостоев брусничной группы. Анализ основных таксационных показателей выявил имеющиеся зависимости между морфометрическими параметрами древостоев лиственничников разнотравно-брусничных. Проведенные исследования обнаружили высокую степень достоверности выведенных уравнений между рядом показателей. На основе данных замера таксационных показателей выявлены взаимосвязи между разными показателями в виде уравнений зависимости, что может стать основой комплексной оценки древостоев на основе оценки замера лишь нескольких таксационных показателей. Выявленные закономерности будут использованы в создании стандартных таблиц, оценивающих основные параметры структуры лиственничных древостоев долины Средней Лены в пределах Намского улуса, и позволяют получить комплексную характеристику древостоев на основе оценки нескольких таксационных показателей.

Ключевые слова: Республика Саха (Якутия), лиственничные леса, древостой, продуктивность, таксационные показатели

Благодарности. Работа выполнена в рамках базового проекта ИБПК СО РАН 0297-2021-0023 «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование».

Введение

Лиственница Каяндера является доминирующим видом дерева на территории Республики Саха (Якутия) [1–4]. Своеобразие формирования лесных фитоценозов и дальнейшее их развитие обусловлено общими причинами климатического плана, спецификой эдафических условий – близким залеганием мерзлого грунта [5–7].

Леса Якутии уникальны по своим качествам и выполняемым функциям. Они характеризуются низкими показателями биологической продуктивности, сильной ранимостью и уязвимостью к

воздействию антропогенных факторов [8]. При этом они остаются одним из крупных мировых резерватов неосвоенных девственных лесов [9].

Методы и материалы исследования

Целью исследований был анализ структуры древостоев основных типов лиственничных лесов долины Средней Лены. Исследования проводились на территории Намского района в окрестностях с. Хатырык. Изучены 10 лесных массивов лиственничника разнотравно-брусничного. Описание растительного покрова проведено с ис-

Таблица 1

**Коэффициенты корреляции
между основными таксационными характеристиками лиственничных древостоев**

Table 1

Correlation coefficients between certain taxation propensities of larch stands

	Количество стволов (N), экз./га Number of stems (N), ind./ha	Диаметр ствола (D _{1.3}), см Barrel diameter (D _{1.3}), cm	Высота ствола (H), м Shaft height (H), m	Высота прикрепления кроны (H _{кр}), м Crown attachment height (H _{ср}), m
Количество стволов (N), экз./га Number of stems (N), ind./ha		-0,67	-0,44	0,14
Диаметр ствола (D _{1.3}), см Barrel diameter (D _{1.3}), cm	-0,67		0,83	0,53
Высота ствола (H), м Shaft height (H), m	-0,44	0,83		0,79
Высота прикрепления кроны (H _{кр}), м Crown attachment height (H _{ср}), m	0,14	0,53	0,79	

Таблица 2

**Уравнения зависимости основных таксационных показателей
древостоев лиственничников разнотравно-брусничных**

Table 2

Equations of dependence of the main taxation indicators of forest stands

	Количество стволов (N), экз./га Number of stems (N), ind./ha	Диаметр ствола (D _{1.3}), см Barrel diameter (D _{1.3}), cm	Высота ствола (H), м Shaft height (H), m	Высота прикрепления кроны (H _{кр}), м Crown attachment height (H _{ср}), m
Количество стволов (N), экз./га Number of stems (N), ind./ha		$N = -555,6 \cdot D_{1.3} + 7827,8$	$N = -1428,6 \cdot H + 14145,7$	$N = 10000 \cdot H_{кр} - 35858$
Диаметр ствола (D _{1.3}), см Barrel diameter (D _{1.3}), cm	$D_{1.3} = -0,0018 \cdot N + 14,09$		$D_{1.3} = 1,87 \cdot H - 5,28$	$D_{1.3} = 5,24 \cdot H_{кр} - 10,79$
Высота ствола (H), м Shaft height (H), m	$H = -0,0007 \cdot N + 9,90$	$H = 0,54 \cdot D_{1.3} + 2,83$		$H = 2,28 \cdot H_{кр} - 0,89$
Высота прикрепления кроны (H _{кр}), м Crown attachment height (H _{ср}), m	$H_{кр} = 0,0001 \cdot N + 3,59$	$H_{кр} = 0,19 \cdot D_{1.3} + 2,06$	$H_{кр} = 0,4379 \cdot H + 0,39$	

пользованием стандартных методических подходов [10].

Лиственничные леса разнотравно-брусничные в районе исследования являются господствующим типом леса на надпойменной террасе и на водораздельных участках. Древостои характеризуются низкой производительностью, оцениваются V–Va классами бонитета. Древостои чистые, обычно без примеси других пород. Средняя высота деревьев в местности колеблется от 6 до 11 м.

Результаты исследования

Анализ основных таксационных показателей выявил имеющиеся зависимости между собой морфометрических параметров древостоев лиственничников разнотравно-брусничных (табл. 1). Высокая степень зависимости выявлена между показателями средней высоты и средним диаметром стволов ($r = 0,83$). Также высока степень сопряженности между показателями средней высоты и высотой прикрепления крон ($r = 0,79$). Довольно значимая, но с отрицательным знаком зависимость выявлена между показателями количества стволов на 1 га и диаметром стволов ($r = -0,67$).

На основе данных замера таксационных показателей определены их зависимости между собой (табл. 2). Проведенные исследования выявили высокую степень достоверности связи между рядом показателей: средним диаметром ствола и количеством стволов на 1 га, средней высотой древостоя и средней высотой ствола. Между остальными параметрами древостоя достоверная зависимость не просматривается, о чем свидетельствуют низкие и средние показатели коэффициента корреляции.

Заключение

Полученные данные о продуктивности основных таксационных показателей будут использованы для дополнения стандартных таблиц, тем

самым повышая достоверность при учете. Вычислены формулы зависимости таксационных показателей между собой и количеством экземпляров на га. По мере накопления данных уравнения будут корректироваться.

Литература

1. Аболин Р.И. Геоботаническое и почвенное описание Лено-Вилуйской равнины // Тр. комиссии по изучению Якутской АССР. Т. 10. Л., 1929. 372 с.
2. Поздняков Л.К. Даурская лиственница / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т леса и древесины им. В. Н. Сукачева. М.: Наука, 1975. 312 с.
3. Щербаков И.П. Типы леса Южной Якутии // Леса Южной Якутии. М.: Наука, 1975. С. 5-109.
4. Щербаков И.П. Лесной покров северо-востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 344 с.
5. Поздняков Л.К. Лес на вечной мерзлоте. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1983. 96 с.
6. Поздняков Л.К. Мерзлотное лесоведение. Новосибирск: Наука, 1986. 140 с.
7. Лес и вечная мерзлота: Особенности состава и структуры лесов мерзлотного региона, проблемы рационального ведения хозяйства и охраны / Отв. ред. Исаев А.П. Якутск: Якутский госуниверситет, 2000. 190 с.
8. Исаев А.П. Естественная и антропогенная динамика лиственничных лесов криолитозоны (на примере Якутии): Автореф. дисс. ... докт. биол. н. Якутск, 2011. 46 с.
9. Нефедьев В.В., Седельник Н.Д., Соколов П.А., Шматкова Л.Е., Исаев А.П., Тимофеев П.А., Шурдук И.Ф., Максимов Т.Х. Обзор состояния бореальных лесов и приоритетные направления в решении проблем их сохранения и устойчивого использования (на примере Республики Саха (Якутия)) // Стратегия сохранения, восстановления и устойчивого использования бореальных лесов: Материалы международного семинара 16–17 декабря 1996 г., г. Якутск, Республика Саха (Якутия). М.: МСОП, 1997. С. 183–202.
10. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.

Поступила в редакцию 16.12.2021

Поступила после рецензирования 15.02.2022

Принята к публикации 22.03.2022

Об авторе

АЛЕКСЕЕВ Кирилл Васильевич, лаборант, аспирант, Институт биологических проблем криолитозоны, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, e-mail: alkirill1993@mail.ru

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-277-281

Analysis of taxational indicators of the larch forests in the Middle Lena valley (Central Yakutia)

K.V. Alekseev

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
alkirill1993@mail.ru*

Abstract. *In this paper we present a description of the forest stands in Central Yakutia. Forests of the region growing on the permafrost-taiga soils are characterized by low biological productivity, fragility and vulnerability to anthropogenic factors. Larch forests containing mixed herbs and lingonberries are the dominant forest type on the floodplain terrace and in the watershed areas due to the specific edaphic conditions. Forest stands with low productivity belong to the V-Va bonitet classes and demonstrate purity, usually without admixture of other species. We aim to analyze the structure of the main types of larch forests in the Middle Lena valley within the Namsky district of the Republic of Sakha (Yakutia). We have examined the correlation between the main taxational indicators of the larch stands within the lingonberry forest group. The analysis of their main taxational indicators has revealed their correlation with the morphometric parameters of the larch stands belonging to the mixed herb-lingonberry forest type. The analysis has proved a high degree of reliability of the established equations between a number of their indicators. The measurement data of taxational indicators demonstrated correlation between different indicators in the form of the equations of dependence. The results can lead to a comprehensive evaluation of the stands on the basis of the measurement assessment of their few taxational indicators. The revealed regularities will be used in standard tables evaluating the main structure parameters of the larch stands in the Middle Lena valley within the Namsky district. They will allow us to obtain a comprehensive characterization of the stands on the basis of evaluation of their several taxational indicators.*

Keywords: Republic of Sakha (Yakutia), larch forests, stands, productivity, taxational indicators

Acknowledgements. *The research was carried out within the the basic project of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS : «Vegetation of the permafrost zone of the taiga Yakutia: biodiversity, environment-forming functions, protection and rational use» (number 0297-2021-0023).*

References

1. Abolin R.I. Geobotanicheskoye i pochvennoye opisanie Leno-Vilyuyskoy ravniny / Tr. komissii po izucheniyu Yakutskoy ASSR. Vol. 10. L., 1929. 372 p.
2. Pozdnyakov L.K. Daurskaya listvennitsa / AN SSSR. Sib. otd-niye. In-t lesa i drevesiny im. V.N. Sukacheva. M.: Nauka, 1975. 312 p.
3. Shcherbakov I.P. Tipy lesa Yuzhnoy Yakutii // Lesa Yuzhnoy Yakutii. M.: Nauka, 1975. 344 p.
4. Shcherbakov I.P. Lesnoy pokrov severo-vostoka SSSR. Novosibirsk: Nauka, 1975. 344 p.
5. Pozdnyakov L.K. Les na vechnoy merzlotte. Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-e, 1983. 96 p.
6. Pozdnyakov L.K. Merzlotnoye lesovedeniye. Novosibirsk : Nauka, 1986. 140 p.
7. Les i vechnaya merzlota: Osobennosti sostava i struktury lesov merzlotnogo regiona. problemy ratsionalnogo vedeniya khozyaystva i okhrany / Otv. red. Isayev A.P. Yakutsk: Yakutskiy gosuniversitet, 2000. 190 p.
8. Isayev A.P. Estestvennaya i antropogennaya dinamika listvennichnykh lesov kriolitozony (na primere Yakutii): Avtoref. diss. ... dokt. biol. n. Yakutsk, 2011. 46 p.

9. Nefedev V.V., Sedelnik N.D., Sokolov P.A., Shmatkova L.E., Isayev A.P., Timofeyev P.A., Shurduk I.F. Maksimov T.Kh. Obzor sostoyaniya borealnykh lesov i prioritnyye napravleniya v reshenii problem ikh sokhraneniya i ustoychivogo ispolzovaniya (na primere Respubliki Sakha (Yakutiya)). Strategiya sokhraneniya. vosstanovleniya i

ustoychivogo ispolzovaniya borealnykh lesov: Materialy mezhdunarodnogo seminara 16–17 dekabrya 1996 g., g. Yakutsk. Respublika Sakha (Yakutiya). Moskva: MSOP, 1997. P. 183–202.

10. Sukachev V.N., Zonn S.V. Metodicheskiye ukazaniya k izucheniyu tipov lesa. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. 144 p.

Submitted 16.12.2021

Revised 15.02.2022

Accepted 22.03.2022

About the author

ALEKSEEV, Kirill Vasilevich, laboratory assistant, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, e-mail alkirill1993@mail.ru

For citation

Alekseev K.V. Analysis of taxational indicators of the larch forests in the Middle Lena valley (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 277–281. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-277-281>

Фитоценотическая характеристика ломкоколосниково-терескеновой степи в Якутии

Н.С. Данилова¹, С.З. Борисова^{2,*}, А.А. Егорова¹

¹Институт биологических проблем криолитозоны ФИЦ СО РАН, Якутск, Россия

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

*borisova_sz@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена фитоценотическая характеристика ломкоколосниково-терескеновых степей на территории Якутии. Исследования проводились в Центральной и Юго-Западной Якутии. Исследуемые степи приурочены к хорошо прогреваемым южным безлесным крутым (45–50°) склонам коренного берега р. Лена, отличаются низким разнообразием и включают 28 видов, объединенных в 26 родов и 15 семейств. Для ломкоколосниково-терескеновых степей характерна разреженность. В спектре биоморф значительную долю занимают древесные и стержнекорневые травянистые растения, что обусловлено засушливыми условиями обитания. Эти же условия определяют экологический диапазон произрастающих здесь видов – ведущую позицию занимают ксерофиты. Все изученные сообщества находятся вне зоны влияния сети особо охраняемых природных территорий, и в течение последних десятилетий произошло значительное сокращение площадей обитания терескена (*Krascheninnikovia ceratoides*). Уникальным реликтовым терескеновым сообществам необходимо придать статус ботанических памятников природы, тем более что в ломкоколосниково-терескеновых степях одновременно с терескеном произрастают охраняемые в республике виды *Hedysarum gmelinii*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Sibbaldianthe adpressa*, *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*.

Ключевые слова: терескеновые степи, *Krascheninnikovia ceratoides*, фитоценоз, видовое разнообразие, Якутия

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме №0297-2021-0023, регистрационный номер АААА-А21-121012190038-0.

Введение

Своеобразием растительного покрова Якутии является распространение в зоне тайги изолированных участков степной растительности. Один из наиболее крупных ее очагов расположен на склонах коренного берега и надпойменных террасах р. Лена в среднем течении. Особый интерес здесь представляют опустыненные полукустарниковые степи, сформированные терескеном.

Терескен обыкновенный (*Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst., syn: *Krascheninnikovia lenensis* (L.) Gueldenst., *Ceratoides papposa* (L.) Botsch. et Ikonnikov, *Eurotia lenensis* Kumin.) – пустынностепной вид, реликт плейстоценовых лесостепных ландшафтов, местообитания которого приурочены к древним субстратам [1]. М.М. Ильин [2] и Е.П. Коровин [3] относят его возникновение к концу мела–палеогену. Проникновение вида в Якутию, по мнению М.Н. Ка-

раваева [1], произошло в середине плейстоцена, в один из ксеротермических периодов совместно с другими дауро-монгольскими и ангаро-монгольскими степными видами.

Терескен давно привлекает интерес исследователей, изучены состояние его ценопопуляций, онтогенез, созданы интродукционные популяции. Но остаются неизученными уникальные экстразональные опустыненные полукустарниковые степи, сформированные в зоне тайги на северо-востоке России. Терескеновые степи в Якутии представлены несколькими формациями, но наиболее распространенной является формация, в состав которой входит ломкоколосниково-терескеновая ассоциация, встречающаяся в различных точках ареала вида. Цель данной статьи – дать фитоценотическую характеристику ломкоколосниково-терескеновых сообществ Центральной и Юго-Западной Якутии.

Материалы и методы исследования

Исследования были проведены в 2013–2019 гг. в долине среднего течения р. Лена в окр. сел Октемцы, Булгунняхтах, Улахан-Ан (Центральная Якутия) и Абага (Юго-Западная Якутия). Расстояние по долине Лены между крайними точками описаний (с. Октемцы и с. Абага) составляет 609 км.

Природные условия районов исследования различны. Климат меняется от континентального, умеренно-влажного на юго-западе до резко-континентального в центральной части Якутии. Прослеживается постепенное уменьшение осадков по мере движения с запада на восток, годовое их количество в Юго-Западной составляет 300–400 мм, в Центральной – 200 мм [4].

Объектами исследования служили опустыненные ломкоколосниково-терескеновые степи, распространенные в долине р. Лена. Описания растительных сообществ выполнены согласно общепринятым геоботаническим методам [5]. Видовое сходство сообществ (коэффициент Сørenсена K_s) определено по формуле

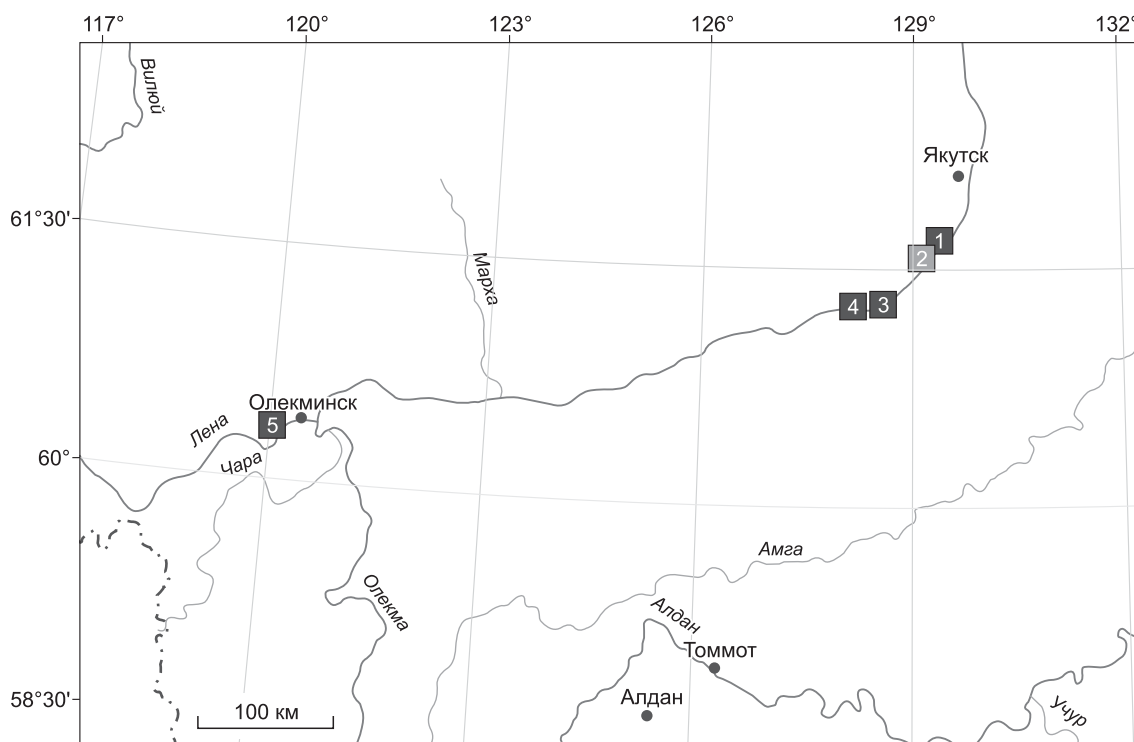
$$K_s = 2c / (a + b) \times 100,$$

где c – число видов общих для двух сообществ, a , b – число видов в одном и другом.

В основу биоморфологического анализа положена система жизненных форм И.Г. Серебрякова [6]. Названия видов приведены в соответствии с «Конспектом флоры Азиатской России» [7].

Результаты и обсуждение

Ареал *Krascheninnikovia ceratoides* в Якутии тянется вдоль р. Лена тонкой цепью, прерывающейся на сотни километров от с. Октемцы в Центральной Якутии до с. Абага в Юго-Западной Якутии. Популяции вида занимают небольшие участки от 0,8 до 10,0 км. В Якутии в настоящее время известны пять точек местопроизрастания терескена: 1) Октемцы, 2) Ой, 3) Булгунняхтах, 4) Улахан-Ан, 5) Абага-Кятчи (см. рисунок). Единичные сборы были сделаны С.З. Скрыбиным в 90-е годы прошлого столетия в бассейне р. Нюя, левом притоке р. Лена. Исследованиями последних лет в этой местности вид не удалось обнаружить [8]. Все местообитания *K. ceratoides* в Яку-



Районы исследований на территории Якутии. Места обитания *Krascheninnikovia ceratoides*; черные квадраты – ломкоколосниково-терескеновые сообщества; серый квадрат – полынные сообщества с терескеном; 1 – Октем; 2 – Булгунняхтах; 3 – Улахан-Ан; 4 – Ой; 5 – Абага.

Areas of research in Yakutia. *Krascheninnikovia ceratoides* habitats are marked with squares; black squares – *Psathyrostachys caespitosa*-*Krascheninnikovia ceratoides* communities; gray squares – wormwood communities with *Krascheninnikovia ceratoides*; 1 – Oktem; 2 – Bulgunnyakhtakh; 3 – Ulakhan-An; 4 – Oj; 5 – Abaga.

тии находятся в долине среднего течения р. Лена и не попадают в зону влияния сети особо охраняемых природных территорий [9].

Ломкоколосниково-терескеновые сообщества встречаются на октемском, булгунняхтахском, улахан-анском и абагинском участках ареала, в окр. с. Ой распространены только терескеновые сообщества полынной формации [8, 10–13]. В пределах Центральной Якутии ломкоколосниково-терескеновые сообщества распространены на коренном берегу р. Лена, они строго приурочены к хорошо прогреваемым южным безлесным крутым склонам, лишенным снега зимой, где летом почва прогревается до 45, а зимой охлаждается до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14]. В результате солифлюкции склоны имеют ступенчатое строение, на булгунняхтахском участке они сильно эродированы, местами на поверхность выходят скалистые породы. На улахан-анском участке сообщество произрастает на очень крутом склоне южной экспозиции ($50\text{--}55^{\circ}$), на глинистых обнажениях с тяжелой почвой, с выходами отвесных плиточных скал. В окр. с. Октемцы терескеновые степи приурочены к юго-восточным склонам коренного берега, также достаточно крутым, до 45° . В Юго-Западной Якутии терескен также занимает южные безлесные склоны коренного берега р. Лена, здесь вид приурочен к красноцветным кембрийским глинам. Отличительной чертой участков является отсутствие на этих склонах ступенчатого строения солифлюкционного происхождения, характерного для долины Лены в Центральной Якутии.

Травянистый покров ломкоколосниково-терескеновых степей разрежен, дернины ломкоколосника и особи терескены отстоят друг от друга на расстоянии от 25 до 45 см. Редко между ними отмечаются другие виды, чаще почва между ними лишена растений. Общее проективное покрытие (ОПП) колеблется в центрально-якутских сообществах от 5 до 45 % на разных участках, в абагинском составляет 17 %. При этом основную долю ОПП составляют доминанты и содоминанты, проективное покрытие *K. ceratoides* в среднем 20 %, *Psathyrostachys caespitosa* (Sukacz.) Peschkova – 15 %. Травостой сложен двумя ярусами, но ярусность, вследствие разреженности травостоя, выражена не явно.

Ломкоколосниково-терескеновые степи бедны флористически (8–13 видов), видовое разнообразие в сообществах не проявляет большой изменчивости. Общее число видов во всех сообщест-

вах составляет всего 28, из которых шесть занесены в Красную книгу РС (Я) [9]. Среди них четыре вида – это уязвимые компоненты сокращающихся степных группировок Центральной Якутии: сокращающие численность популяций (категория 2a) *Krascheninnikovia ceratoides*, *Ephedra monosperma* С.А. Мей., *Phlojodicarpus sibiricus* (Fisch. ex Spreng.) К.-Пол., узкоареальный эндемик *Astragalus lenensis* Shemetova, Schaulo et Lomon. (категория 3a) и два редких вида (*Hedysarum gmelinii* Ledeb. и *Sibbaldianthe adpressa* (Bunge) Juz.), произрастают на северных границах их ареалов.

Изучение ломкоколосниково-терескенового сообщества в окр. с. Октемцы прослежено на материалах с 15-летним разрывом (табл. 1). В настоящее время эта точка является самой северной и находится в 38 км южнее г. Якутск. За последние 15 лет долина р. Лена на этом участке претерпела большие негативные изменения. Терескеновые степи здесь подвергаются сильному антропогенному воздействию, которое проявляется в неконтролируемом выпасе крупного рогатого скота, усилении рекреации, весенних палов и близости междугородной автомагистрали.

Все это не могло не иметь последствий, видовой состав ломкоколосниково-терескеновой ассоциации в 2019 г. по сравнению с 2004 г. значительно обеднен (см. табл. 1), из него выпали уникальные реликтовые степные виды *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*. В определенной мере это обусловило среднюю степень сходства видового состава с сообществами в окр. сел Булгунняхтах и Улахан-Ан ($K_s = 59,25$ и $K_s = 58,33$ соответственно).

Первое описание ломкоколосниково-терескеновой степи в окр. с. Булгунняхтах было проведено в 1967 г. В.П. Ивановой [14]. Сравнивая это описание и наши 2013 г., можно видеть, что сообщество находится в удовлетворительном состоянии – основное его ядро (*Krascheninnikovia ceratoides*, *Psathyrostachys caespitosa*, *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*, *Goniolimon speciosum*) сохранилось в течение почти полувека, но обилие видов заметно снизилось (табл. 2).

Усиливающаяся эксплуатация растительного покрова и загрязнение окружающей среды постепенно привели к тому, что некогда устойчивое сообщество разрушается и это сопровождается сокращением численности видов. В октемском сообществе процесс деградации привел к полному уничтожению генетических ресурсов

отдельных популяций *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*.

Ломкоколосниково-терескеновая ассоциация в окр. с. Улахан-Ан была изучена нами в 2005 г. [13]. Удаленная от булгунняхтахского сообщества на сравнительно небольшое расстояние (20 км) она проявляет большое сходство с ним в видовом составе, что обусловлено сходными условиями их произрастания. Это подтверждает и высокое значение коэффициента Сёренсена ($K_s = 78,26$). С сообществом в окр. с. Октемцы отмечается средняя степень сходства ($K_s = 58,33$).

Исследования ломкоколосниково-терескенового сообщества вблизи с. Абага проводились с 2009 по 2013 г. Антропогенное воздействие на сообщество слабое, в виде нерегулярного выпаса скота, но следствием этого явилось появление рудеральных растений (*Lappula squarrosa* (Retz.) Dumort.). Видовой состав сообщества беден и в разные годы обнаруживает небольшие колебания, но при этом разнообразие видов сохраняется на одном уровне (табл. 3).

Произрастающее на красноцветных кембрийских глинах это сообщество по флористическому составу значительно отличается от центральнаякутских. Обращает внимание отсутствие в видовом составе полыней, обычных в центральных районах. О низком сходстве видового состава абагинского фитоценоза с центральнаякутскими свидетельствует невысокий коэффициент Сёренсена, который составляет от 34,78 (в паре «Абага–Улахан-Ан»), 30,76 (в паре «Абага–Булгунняхтах») и 37,03 (в паре «Абага–Октемцы»). Это обусловлено различиями в рельефе, климате и флоре районов. В видовом составе присутствуют краснокнижные виды (*Hedysarum gmelinii*, *Sibbaldianthe adpressa*), ареал которых ограничивается Юго-Западной Якутией. Из 13 видов, произрастающих в этой ассоциации, пять подлежат республиканской охране – *Astragalus lenensis*, *Hedysarum gmelinii*, *Krascheninnikovia ceratoides*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Sibbaldianthe adpressa* [9].

Общее число видов, встречающихся во всех ломкоколосниково-терескеновых сообществах, составляет 28 видов, из них – 20 в центральнаякутских степях и 13 в юго-западной. Лидерскую позицию среди 15 семейств занимает Asteraceae, в целом на долю пяти ведущих семейств приходится почти две трети всего видового состава. Остальные 10 семейств представлены по одному виду (табл. 4). Ведущий род –

Таблица 1
Ломкоколосниково-терескеновые сообщества
в окр. с. Октемцы

Table 1

Psathyrostachys caespitosa-
Krascheninnikovia ceratoides communities
in the Oktem village vicinity

Вид Species	2004 г. Year of study	2019 г. Year of study
Номер описания Description Number	1	2
ОПП травостоя, % / GPC, %	10–25	30
ПП терескена, % / PC, %	7–15	15
Угол склона, град. Slope angle, degree	45	45
Координаты Coordinates	N 61°41'56.3", E 129°23'03.3"	
<i>Alyssum lenense</i>	sol	sp
<i>Artemisia commutata</i>	sp	sp
<i>Artemisia frigida</i>	sp	sp
<i>Astragalus lenensis</i>	sp	
<i>Carex duriuscula</i>	sp	
<i>Ephedra monosperma</i>	sol	
<i>Euphorbia esula</i>	sol	
<i>Heteropappus biennis</i>		sp
<i>Kitagawia baicalensis</i>	sol	
<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	cop ₂	cop ₂
<i>Potentilla bifurca</i>	sp	sp
<i>Psathyrostachys caespitosa</i>	cop ₂	cop ₂
<i>Serratula marginata</i>	sp	
<i>Stipa capillata</i>	cop ₁	sp
Число видов Number of species	13	8
Общее число видов Total number of species	14	

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3 ОПП – общее проективное покрытие, ПП – проективное покрытие *Krascheninnikovia ceratoides*

Note. Here and in tables 2 and 3 GPC – general projective cover, PC – *Krascheninnikovia ceratoides* projective cover.

Artemisia. Наиболее часто встречаемыми видами являются *Artemisia frigida* Willd., *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*, *Heteropappus biennis* (Ledeb.) Tamamsch. ex Grub., реже встречаются *Alyssum lenense* Adam, *Artemisia commutata* Bess.,

**Ломкоколосниково-терескеновые сообщества
в окр. сел Булгунняхтах и Улахан-Ан (Центральная Якутия)**

Table 2

***Psathyrostachys caespitosa*-*Krascheninnikovia ceratoides* communities
in the Bulgunnyakhtakh and Ulakhan-An villages vicinity (Central Yakutia)**

Вид Species	Булгунняхтах Bulgunnyakhtakh		Улахан-Ан Ulakhan-An
	1967* г. Year of study	2013 г. Year of study	2005 г. Year of study
Номер описания Description Number	3	4	5
ОПП травостоя, % GPC, %	25–30	от 5 до 10–25	40–45
ПП терескена, % PC, %	5–20	5–10	20
Угол склона, град. Slope angle, degree	45	45	50–55
Координаты Coordinates	N 61°17'266", E 128°34'512"		N 61°16'462", E 28°09'185"
<i>Alyssum lenense</i>			Sol
<i>Androsace turczaninovii</i>	sp		
<i>Artemisia commutata</i>	sp		
<i>Artemisia frigida</i>		sol	Sol
<i>Artemisia tanacetifolia</i>		sol	
<i>Aster alpinus</i>			Sol
<i>Astragalus lenensis</i>	sp	sol-sp	Sp
<i>Carex duriuscula</i>	sp-cop ₁		
<i>Ephedra monosperma</i>	sp	sol	Sp
<i>Goniolimon speciosum</i>	sp	sol	
<i>Heteropappus biennis</i>	sp		Sp
<i>Koeleria cristata</i>		sol	Sp
<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	cop ₁	cop ₁	cop ₁
<i>Orostachys spinosa</i>		sol-sp	Sp
<i>Psathyrostachys caespitosa</i>	cop ₁	sp-cop ₁	cop ₁
Число видов Number of species	9	9	10
Общее число видов Total number of species	13		10

Примечание. * – по [14].

Note. * – according to [14].

Goniolimon speciosum (L.) Boiss., *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Orostachys spinosa* (L.) C.A. Mey., *Potentilla bifurca* L.

Кроме видового состава характеристикой условий местообитаний являются отношение

числа видов к числу семейств (в/с), числа видов к числу родов (в/р), числа родов к числу семейств (р/с) [15]. Эти показатели в ломкоколосниково-терескеновых фитоценозах крайне низки и составляют соответственно 1,8, 1,1 и 1,7,

Таблица 3

Ломкоколосниково-терескеновая степь в окр. с. Абага (Юго-Западная Якутия)

Table 3

*Psathyrostachys caespitosa-Krascheninnikovia ceratoides communities
in the Abaga village vicinity (Southwestern Yakutia)*

Вид Species	2009 г. Year of study	2010 г. Year of study	2013 г. Year of study
Номер описания Description Number	6	7	8
ОПП травостоя, % GPC, %	17	10–15	17
ПП терескена, % PC, %	10	7–10	10
Угол склона, град. Slope angle, degree	45	45	45
Координаты Coordinates	N 60°19'49.4", E 120°01'33.2"		
<i>Astragalus lenensis</i>		sp	
<i>Bupleurum bicaule</i>		sp	
<i>Hedysarum gmelinii</i>	sp	sp	sp
<i>Heteropappus biennis</i>	sol	sp	sp
<i>Krascheninnikovia ceratoides</i>	cop ₂	cop ₂	cop ₁
<i>Lappula squarrosa</i>	sp		sp
<i>Phlojodicarpus sibiricus</i>		sol	
<i>Potentilla bifurca</i>	sp		sp
<i>Psathyrostachys caespitosa</i>	cop ₂	cop ₁	cop ₁
<i>Scorzonera radiata</i>	sp	sp	sp
<i>Sibbaldianthe adpressa</i>			sp
<i>Taraxacum dissectum</i>	sp	sp	sp
<i>Veronica incana</i>		sp	
Число видов Number of species	8	10	9
Общее число видов Total number of species	13		

что свидетельствует об экстремальности условий их местообитания, которая проявляется в крайней засушливости. Эти условия определяют экологический диапазон произрастающих здесь видов – во всей ценофлоре ведущую позицию занимает ксерофитная группа растений (от 80 до 100 %) (табл. 5).

Биоморфологический анализ растений изученных сообществ показал, что значительную долю в спектре жизненных форм занимают древесные растения (от 23,1 до 40,0 %). Это является характерной чертой полупустынных сообществ

(см. табл. 5). Следует отметить, что растения именно этих жизненных форм *Artemisia frigida*, *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma* являются наиболее постоянными, часто встречающимися в этих сообществах видами (см. табл. 1–3). Ощутима доля стержнекорневых растений, что связано с особенностями рельефа и необходимостью в нем закрепляться, а также с возможностью растений этой жизненной формы добывать влагу из разных горизонтов почвы. Присутствие однолетников, двулетников и плотнoderновинных злаков может свидетельство-

Ведущие семейства ломкоколосниково-терескеновых сообществ

Table 4

Leading families of *Psathyrostachys caespitosa*-*Krascheninnikovia ceratoides* communities

Семейство Family	Общее число родов Total number of genres	Общее число видов Total number of species	Доля от общего числа видов, % Share of the total number of species, %
Asteraceae	6	8	28,57
Apiaceae	3	3	10,71
Poaceae	3	3	10,71
Fabaceae	2	2	7,14
Rosaceae	2	2	7,14
Всего в 5 ведущих семействах Subtotal: 5 leading families	16	18	64,29
Остальные семейства Other families	10	10	35,71
Всего Total	26	28	100

вать о нарушенности или неустойчивости сообществ.

Несмотря на небогатый видовой состав ломкоколосниково-терескеновых сообществ, разнообразие географических элементов достаточно высоко. В целом, в фитоценозах представлены виды, обладающие девятью типами ареалов. Среди них наиболее многочисленна евразийская группа (35,7 %), ощутима доля азиатских (17,8 %) и сибирско-монгольских видов (17,8 %). Если же рассматривать конкретные сообщества, то обращает внимание обеднение спектра географических элементов при продвижении с востока на юго-запад. Если в октемском и булгунняхском сообществах представлены виды с девятью типами ареалов, то на юго-западе отсутствуют виды с американскими связями. Но во всех сообществах наблюдается преобладание видов с восточными генетическими связями (50–60 %). Постоянным видом во всех сообществах является эндемичный вид *Astragalus lenensis*.

Преобладающая часть видов изученных сообществ (89,2 %) относится к степному комплексу видов, основу которых составляют виды, принадлежащие к собственно степной и горно-степной поясно-зональным группам, а также лесостепной и пустынно-степной. Всего тремя видами представлена светлохвойная лесная группа (*Euphorbia esula* L., *Artemisia tanacetifolia* L., *Scorzonera radiata* Fisch. ex Ledeb.).

Выводы

1. Ломкоколосниково-терескеновые степи на территории Якутии приурочены к хорошо прогреваемым южным безлесным крутым (45–50°) склонам коренного берега в среднем течении р. Лены.

2. Видовой состав ломкоколосниково-терескеновых степей в долине р. Лена отличается низким разнообразием и включает 28 видов, объединенных в 26 родов и 15 семейств. Видовая насыщенность конкретных сообществ составляет 10–15 видов.

3. Для ломкоколосниково-терескеновых степей характерна разреженность травостоя. Общее проективное покрытие колеблется в сообществах в Центральной Якутии от 5 до 45 % на разных участках. При этом основную долю ОПП составляют доминанты и содоминанты.

4. Ценофлора ломкоколосниково-терескеновых степей представлена преимущественно видами степного комплекса, преобладают виды с восточными генетическими связями. В спектре биоморф значительную долю занимают древесные и стержнекорневые травянистые растения, что обусловлено засушливыми условиями обитания. Эти же условия определяют экологический диапазон произрастающих здесь видов – ведущую позицию занимают ксерофиты.

5. Все изученные сообщества находятся вне зоны влияния сети особо охраняемых природ-

**Эколого-морфологический спектр видового состава
ломкоколосниково-терескеновых сообществ**

Table 5

**Ecological and biological range
of *Psathyrostachys caespitosa*-*Krascheninnikovia ceratoides* communities**

Группы растений Plant groups	Общее число видов Total number of species	Число видов в сообществах Number of species in plant communities			
		Октемцы Oktem	Булгунняхтах Bulgunnyakhtakh	Улахан-Ан Ulakhan-An	Абага Abaga
1	2	3	4	5	6
Экологический спектр Range of ecological plant groups					
Ксерофиты Xerophytes	20	11	11	8	10
Мезоксерофиты Mesoxerophytes	5	3	—	2	1
Ксеромезофиты Xeromesophytes	2	—	1	—	2
Мезофиты Mesophytes	1	—	1	—	—
Биоморфологический спектр Range of life forms					
Древесные, из них: Woody and shrubby plants, including:	5	5	4	4	3
кустарнички Shrubs	1	1	1	1	—
Полукустарники Semishrubs	2	2	2	2	1
полукустарнички Dwarf semishrubs	2	2	1	1	2
Травянистые, из них: Herbaceous plants, including:	23	9	9	6	10
Многолетники, в т.ч.: Perennial grasses, including:	20	8	7	5	8
длиннокорневищные Long-rhizomatous	1	1	1	—	—
короткокорневищные Short-rhizomatous	3	1	2	1	1
Плотнoderновинные Dense-tussock	3	2	2	2	1
стержнекорневые Taproot-fibrous	10	4	2	2	6
Двулетники Biennial plants	1	1	1	1	1
Однолетники Annual plants	2	—	1	—	1

1	2	3	4	5	6
Ареалогический спектр					
Range of area types					
Евразийско-североамериканский Eurasian and North American	2	1	2	1	-
Евразийский Eurasian	10	3	2	3	5
Евросибирский Euro-Siberian	1	1	1	—	—
Азиатско-американский Asian-American	1	1	1	—	—
Азиатский Asian	5	1	2	1	4
Восточноазиатский East Asian	1	1	1	1	
Сибирско-монгольский Siberian and Mongolian	5	4	1	1	2
Сибирский Siberian	2	1	2	2	1
Эндемик Endemic	1	1	1	1	1
Эколого-ценотические группы					
Ecological-cenotic groups					
Собственно степные Steppe	11	5	6	2	4
Горностепные Mountain-steppe	10	5	4	5	5
Пустынно-степные Desert-steppe	2	2	2	2	2
Лесостепные Forest-steppe	2	1	—	1	1
Светлохвойные лесные Light coniferous forests	3	1	1	—	1
Всего Total	28	14	13	10	13

ных территорий, и в течение последних десятилетий произошло значительное сокращение площадей обитания *K. ceratoides*. Уникальным реликтовым терескеновым сообществам необходимо придать статус ботанических памятников природы, тем более что в ломколоосниково-терескеновых степях одновременно с *K. ceratoides* произрастают другие охраняемые в республике виды. В окр. с. Абага – *Hedysarum gmelinii*,

Phlojodicarpus sibiricus, *Sibbaldianthe adpressa*, в центрально-якутских сообществах – *As-tragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*.

Литература

1. Караваев М.Н. Новые данные о терескене *Eurotia lenensis* Kumin. // Ботанические материалы Гербария БИН им. В.Л. Комарова. Л.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 17. С. 112–121.

2. Ильин М.М. Флора пустынь Средней Азии, ее происхождение и этапы развития // Материалы по истории и растительности СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Вып. 3. С. 128–229.
3. Коровин Е.П. Растительность Средней Азии и Южного Казахстана. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1961. 452 с.
4. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов Земли. Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. 206 с.
5. Корчагин А.А. Видовой (флористический) состав растительных сообществ и методы его изучения // Полевая геоботаника. М.; Л.: Наука, 1964. Т. 3. С. 39–62.
6. Серебряков И.Г. Жизненные формы растений и их изучение // Полевая геоботаника. М.: Наука, 1964. Т. 3. С. 56–78.
7. Конспект флоры Азиатской России: Сосудистые растения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.
8. Егорова А.А., Борисова С.З., Кардашевская В.Е., Захарова В.И. Современное состояние популяций *Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel. в Якутии // Вестник КрасГАУ, 2015. № 7. С. 28–33.
9. Красная книга Республика Саха (Якутия). Т 1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов. М: Реарт, 2017. 412 с.
10. Иванова В.П., Говорина Т.П. Терескен ленский – *Ceratoides lenensis* (Kumin.) Jurtz. et Kam. // Биология растений Сибири, нуждающихся в охране. Новосибирск: Наука, 1985. С. 114–129.
11. Данилова Н.С., Борисова С.З. Крашенинниковия ленская (*Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel.) в природе и культуре // Бюлл. Гл. ботан. сада, 2006. Вып. 190. С. 7–12.
12. Данилова Н.С., Борисова С.З. Популяции *Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel. на территории Якутии // Вестник Якутского гос. ун-та, 2010. Т. 7, №2. С. 19–22.
13. Егорова А.А., Нестерова А.А. Реликтовые ассоциации терескена ленского (*Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel.) на средней Лене // Природный парк «Ленские Столбы»: прошлое, настоящее и будущее. Якутск, 2007. С. 163–172.
14. Иванова В.П. Степные фитоценозы с терескеном ленским (*Eurotia lenensis* Kumin.) в долине р. Лены // Ученые записки ЯГУ. 1971. Вып. 18. С. 65–69.
15. Бурдуковская Г.В., Аненхонов О.А. Флора бассейна реки Иволги и ее антропогенные изменения (Западное Забайкалье). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 267 с.

Поступила в редакцию 24.01.2022

Поступила после рецензирования 15.03.2022

Принята к публикации 30.03.2022

Об авторах

ДАНИЛОВА Надежда Софроновна, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, профессор, Институт биологических проблем криолитозоны, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, Author ID: 144580, Researcher ID: S-8136-2016, e-mail: nad9.5@mail.ru

БОРИСОВА Саргылана Захаровна, начальник отдела, кандидат биологических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1562-9816>, Author ID: 144581, Researcher ID: A-4953-2014, e-mail: borisova_sz@mail.ru

ЕГОРОВА Ангелина Алексеевна, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, Институт биологических проблем криолитозоны, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6887-1000>, Author ID: 317412, e-mail: angelalegor@yandex.ru

Для цитирования

Данилова Н.С., Борисова С.З., Егорова А.А. Фитоценотическая характеристика ломкоколоосниково-терескеновой степи в Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 282–293. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-282-293>

Phytocenotic characteristics of *Psathyrostachys caespitosa*-*Krascheninnikovia* *ceratoides* communities in Yakutia

N.S. Danilova¹, S.Z. Borisova^{2,*}, A.A. Egorova¹

¹*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia*

²*Ammosov North-East Federal University, Yakutsk, Russia*

*borisova_sz@mail.ru

Abstract. In this article we describe the phytocenotic characteristics of the winterfat steppes dominated by *Krascheninnikovia ceratoides* and *Psathyrostachys caespitosa* in Central and Southwestern Yakutia. The winterfat steppes under study are located in the well-warmed southern treeless steep slopes (45–50°) on the valley side of the Lena River. The communities are characterized by low diversity and include 28 species (26 genera and 15 families). Moreover, they have sparse distribution pattern. Woody and rooted herbaceous plants, representing a significant part of the life forms, are determined by an arid environment. In these conditions the leading position belongs to xerophytes. All the studied communities are located outside the borders of Specially Protected Natural Sites. Over the past decades, the habitat area of the winterfat (*Krascheninnikovia ceratoides*) has significantly decreased. These unique relic steppes are valid for the status of protected botanical monuments of nature. Particularly as the rare species protected in the republic (*Hedysarum gmelinii*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Sibbaldianthe adpressa*, *Astragalus lenensis*, *Ephedra monosperma*) grow together with *Krascheninnikovia ceratoides* in winterfat communities.

Keywords: winterfat steppes, *Krascheninnikovia ceratoides*, phytocenotic, species diversity, Yakutia

Acknowledgements. The research was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project number 0297-2021-0023; registration number AAAA-A21-121012190038-0).

References

1. Karavaev M.N. Novye dannye o tereskene *Eurotia lenensis* Kumin. // Botanicheskie materialy Gerbariya BIN im. V.L. Komarova. L.: Izd-vo AN SSSR, 1955. Vol. 17. P. 112–121.
2. Il'in M.M. Flora pustyn' Srednej Azii, ee proiskhozhdenie i etapy razvitiya // Materialy po istorii i rastitel'nosti SSSR. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1958. Iss. 3. P. 128–229.
3. Korovin E.P. Rastitel'nost' Srednej Azii i Yuzhnogo Kazakhstana. Tashkent: Izd-vo AN UzSSR, 1961. 452 p.
4. Gavrilova M.K. Klimaty holodnykh regionov Zemli. Yakutsk: Izd-vo SO RAN, 2003. 206 p.
5. Korchagin A.A. Vidovoj (floristicheskij) sostav rastitel'nykh soobshchestv i metody ego izucheniya // Polevaya geobotanika. M.; L.: Nauka, 1964. Vol. 3. P. 39–62.
6. Serebryakov I.G. Zhiznennye formy rastenij i ih izuchenie // Polevaya geobotanika. M.: Nauka, 1964. Vol. 3. P. 56–78.
7. Konspekt flory Aziatskoj Rossii: Sosudistye rasteniya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 640 p.
8. Egorova A.A., Borisova S.Z., Kardashevskaya V.E., Zaharova V.I. Sovremennoe sostoyanie populyacij *Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel. v Yakutii // Vestnik KrasGAU, 2015. No. 7. P. 28–33.
9. Krasnaya kniga Respublika Saha (Yakutiya). Vol. 1: Redkie i nahodyashchiesya pod ugrozoy ischeznoeniya vidy rastenij i gribov. M.: Izd-vo «Reart», 2017. 412 p.
10. Ivanova V.P., Govorina T.P. Teresken lenskij – *Ceratoides lenensis* (Kumin.) Jurtz. et Kam. // Biologiya rastenij Sibiri, nuzhdayushchihsya v ohrane. Novosibirsk: Nauka, 1985. P. 114–129.
11. Danilova N.S., Borisova S.Z. *Krascheninnikoviya lenskaya* (*Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel.) v prirode i kul'ture // Byull. Gl. botan. sada, 2006. Iss. 190. P. 7–12.
12. Danilova N.S., Borisova S.Z. Populyacii *Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel. na territorii Yakutii // Vestnik Yakutskogo gos. un-ta. 2010. Vol. 7, No. 2. P. 19–22.
13. Egorova A.A., Nesterova A.A. Reliktovye associacii tereskena lenskogo (*Krascheninnikovia lenensis* (Kumin.) Tzvel.) na srednej Lene // Prirodnyj park «Lenskije Stolby»: proshloe, nastoyashchee i budushchee. Yakutsk, 2007. P. 163–172.
14. Ivanova V.P. Stepnye fitocenozy s tereskenom lenskim (*Eurotia lenensis* Kumin.) v doline r. Leny // Uchenye zapiski YAGU, 1971. Iss. 18. P. 65–69.

15. Burdukovskaya G.V., Anenhonov O.A. Flora bassejna reki Ivolgi i ee antropogennye izmeneniya (Zapadnoe Zabajkal'e). Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2009. 267 p.

Submitted 24.01.2022

Revised 15.03.2022

Accepted 30.03.2022

About the authors

DANILOVA, Nadezhda Sofronovna, Dr. Sci. (Biology), chief researcher, professor, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<http://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, Author ID: 144580, Researcher ID: S-8136-2016, e-mail: nad9.5@mail.ru

BORISOVA, Sargylana Zakharovna, Cand. Sci. (Biology), head of the department, associate professor, Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky st., Yakutsk, 677000, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-1562-9816>, Author ID: 144581, Researcher ID: A-4953-2014, e-mail: borisova_sz@mail.ru

EGOROVA, Angelina Alekseevna, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-6887-1000>, Author ID: 317412, e-mail: angelalegor@yandex.ru

For citation

Danilova N.S., Borisova S.Z., Egorova A.A. Phytocenotic characteristics of *Psathyrostachys caespitosa-Krascheninnikovia ceratoides* communities in Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 282–293. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-282-293>

Пути адаптации *Stellaria humifusa* на приморских территориях Западного Шпицбергена

Н.Ю. Шмакова^{1,*}, Е.Ф. Марковская², К.В. Морозова², О.В. Ермолаева¹, Т.И. Литвинова¹

¹Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН, Кировск, Россия

²Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

*shmanatalya@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности адаптации *Stellaria humifusa* (Caryophyllaceae) на скальных экотопах приморских территорий острова Западный Шпицберген. Растение образует жизненную форму мат и представляет собой монодоминантное растительное сообщество. Показано, что жизненная форма мат – сложная структура, которая образована системой надземных и подземных органов и почвенным горизонтом. Надземные органы представлены верхним слоем (коричневый) отмерших растений предыдущего года. На его поверхности располагаются цветоносные побеги текущего года жизни с белыми цветами. Следующий слой мата – органогенный, основная ассимилирующая система. Представлена зелеными побегами, листья которых на уровне анатомических структур и функциональных показателей адаптированы к локальным условиям обитания в мате. Нижний слой – органо-минеральный горизонт. Представляет собой почвенный субстрат, который является источником минерального питания всей структуры. Химический состав почвенного субстрата растительного мата *Stellaria humifusa* сходен с естественным почвенным профилем приморской территории. Отмечено, что растительный мат способствует большему накоплению органики, активизирует гумификацию и обеспечивает благоприятные условия для произрастания *Stellaria humifusa*.

Ключевые слова: *Stellaria humifusa*, Caryophyllaceae, растительный мат, анатомия листа, органический углерод, азот, остров Западный Шпицберген

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Государственного задания Полярно-альпийского ботанического сада-института (ПАБСИ) КНЦ РАН «Растительно-почвенные ресурсы, совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия и оптимизации среды обитания человека на архипелаге Шпицберген» (№ 0189-2019-0025; № гос. регистрации 1021032422551-2-1.6.11).

Введение

Пути и закономерности продвижения растений в высокие широты Арктики связаны с особенностями адаптации растений разных экологических групп и географических ареалов. Разнородный состав флоры, включающий таксономические группы разного исторического возраста и разных центров миграции, может свидетельствовать о различных путях адаптации. Климатические условия этого региона включают экстремально низкие и высокие температуры, их градиент, короткий вегетационный период с круглосуточным полярным летом и полярной ночью. Часть видов, мигрирующих на свободные пространства высоких широт, приспособились к этим условиям, а для других видов это стало преградой [1]. Одним из общих

путей адаптации высших сосудистых растений является снижение биомассы и линейных размеров [2]. Для растений Арктики возможны две основные стратегии – «избегание» и «адаптация». Первая группа выбирает путь, связанный с наименьшими затратами на адаптацию, и ее распространение ограничено, а другая включает дополнительные механизмы адаптации, связанные с различными аспектами жизнедеятельности и устойчивости [1, 3]. *Stellaria humifusa*, обитающая на локальных приморских экотопах побережья Грендален Западного Шпицбергена, относится ко второй группе. В условиях Западного Шпицбергена этот вид образует растительные маты на скальных выходах, которые представляют собой монодоминантные сообщества. В литературе этот вид изучен недостаточно и

механизмы его образования и жизнедеятельности остаются слабо изученными.

В задачу настоящего исследования входило изучение структурно-функциональных особенностей растительного мата *Stellaria humifusa* в условиях Западного Шпицбергена.

Материалы и методы

Работа выполнена на приморских арктических территориях вблизи п. Баренцбург в долине Грендален острова Западный Шпицберген (N: 78°03'54", E: 14°28'28").

Stellaria humifusa Rottb. (сем. Caryophyllaceae) – циркумпольярное, преимущественно арктическое, многолетнее травянистое растение, распространенное на солончаках, увлажненных участках морского побережья в Арктике, в Европе достигающее юга Северной Норвегии, Северной России. Растение с матообразующей жизненной формой, высотой 5–12 см с широко разветвленной системой стелющихся, укореняющихся, четырехгранных надземных и столонообразующих подземных побегов. *Stellaria humifusa* имеет очень тонкие корни длиной до 2–3 см. Зеленые листья находятся под прикрытием генеративных органов и отмерших побегов предыдущих лет жизни. В пазухах листьев формируются побеги с укороченными междоузлиями. Листья 3–4 мм длиной, 1–5 мм шириной. Цветки одиночные, редко 2–3, почти в 2–3 раза крупнее листьев, расположены в пазухах листьев и на концах цветonoсных побегов, белые с резким ароматом. Половое размножение семенами, вегетативное размножение происходит путем укоренения стелющихся надземных побегов и отдельными частями подземных побегов. Растение обильно цветет на Шпицбергене [4].

Анатомические исследования. Для изучения анатомии брали побеги со сформированными листьями без признаков повреждения и фиксировали в 70%-м этаноле. На временных препаратах измеряли параметры анатомической структуры 10 листьев из средней части пяти побегов в 50-кратной повторности при помощи светового микроскопа МИКМЕД–6 (ЛОМО, Россия) с использованием окуляр-микрометра WF10X/22 мм при увеличении 4×, 10×, 40×. Площадь устьица (Sys) вычисляли по формуле [5]

$$\text{Sys} = \pi DL/4,$$

где D – длина устьица, L – его ширина.

Объем клеток (V) отдельно палисадного и губчатого мезофилла рассчитывали по формуле [6]

$$V = (4/3\pi)(L/2)(d/2)^2,$$

где L – длина клетки, d – ширина клетки.

После предварительной мацерации клеток в 1 н. растворе соляной кислоты при 80 °C [6] готовили суспензию для определения количества хлоропластов и клеток палисадной, губчатой паренхимы. Измерения проводили в 10 повторностях каждого листа в 100 больших квадратах камеры Горяева.

Почвенные исследования. Полевые работы проводили в июле в условиях максимального оттаивания почв. Валовой и химический состав почвы и растений определяли после сплавления прокаленной навески смесью соды и буры [7]. Общее содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) определяли по методу И.В. Тюрина [8]. Групповой и фракционный состав органического вещества определяли по методу Тюрина в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [9]. Органический азот ($N_{\text{орг}}$) определяли методом Кьельдаля [7]. В минеральных образцах был определен гранулометрический состав пипеточным методом [10]. При определении типа почв и индексов горизонтов придерживались классификации 2004 года [11].

Статистический анализ. Статистическая обработка данных проведена в среде Microsoft Excel, пакетах программ Microsoft Excel 7 и Statistica for Windows.

Для обработки данных было использовано оборудование группы экспериментальной экологии, лаборатории почвоведения ПАБСИ КНЦ РАН, кафедры ботаники и физиологии растений ИБЭАТ ПетрГУ.

Результаты

Анатомо-морфологический анализ листьев *Stellaria humifusa*. *Stellaria humifusa* имеет листья минимального размера даже для растений Арктики. Средняя площадь листа побегов *Stellaria humifusa* составляет около 0,06 см². Толщина листовой пластинки *Stellaria humifusa* составляет 242 мкм (табл. 1). Лист имеет дорзовентральный тип строения мезофилла (рис. 1). Палисадный мезофилл расположен на адаксиальной стороне листа и состоит из одного слоя плотно, частично рыхло расположенных овальных и прямоугольных клеток (индекс формы – отношение длины к ширине – 1,7). Губчатый мезофилл расположен на абаксиальной стороне и представлен 3–5 слоями овальных и почти округлых клеток (индекс формы – 1,2) с межклетниками. Коэффициент палисадности (отношение тол-

Параметры анатомической структуры листа *Stellaria humifusa*

Table 1

Anatomical indices of *Stellaria humifusa* leaves

Показатель Index	M±m
Толщина листа, мкм Leaf thickness, μm	241,6±5,8
Толщина кутикулы, мкм Cuticle thickness, μm	3,4±0,2
Длина клеток эпидермы, мкм, В/Н Length of the epidermis cells, μm , U/L	21,0±0,4 / 25,2±0,6
Ширина клеток эпидермы, мкм, В/Н Width of the epidermis cells, μm , U/L	16,1±0,5 / 18,0±0,5
Длина клеток мезофилла, мкм, П/Г Length of mesophyll cells, μm , P/S	51,5±1,4 / 42,7±0,8
Ширина клеток мезофилла, мкм, П/Г Width of mesophyll cells, μm , P/S	30,6±0,8 / 34,3±1,3
Объем клетки мезофилла, тыс. мкм ³ , П/Г Cell volume of mesophyll, thousand μm^3 , P/S	26,4±1,7 / 31,1±2,1
Число клеток мезофилла, тыс. см ⁻² , П/Г Cell number of mesophyll, thousand cm ⁻² , P/S	10±0,8 / 18±1,2
Число хлоропластов на клетку, шт., П/Г Chloroplast number per cell, pieces, P/S	50±1,0 / 31±0,7

Примечание. M±m – среднее арифметическое ± стандартная ошибка; Эпидерма: В – верхняя (адаксиальная), Н – нижняя (абаксиальная); Мезофилл: П – палисадный, Г – губчатый.

Note. M±m – mean ± standard error; Epidermis: U – upper (adaxial), L – lower (abaxial); Mesophyll: P – palisade, S – spongy.

щины палисадного слоя к толщине губчатого) у исследуемого вида низкий и не превышает 0,4.

Число хлоропластов в клетках палисадной паренхимы в 1,6 раза больше, чем в губчатой парен-

химе (см. табл. 1). В мезофилле находятся три коллатеральных проводящих пучка, которые ограничены от межклетников и клеток мезофилла плотно сомкнутыми обкладочными клетками.

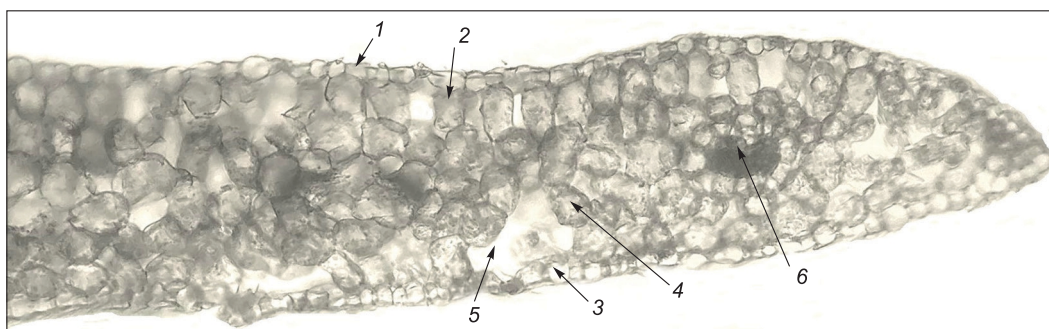


Рис. 1. Фрагмент поперечного среза листа *Stellaria humifusa* (увеличение $\times 10$; фото Морозовой К.В.): 1 – верхняя эпидерма, 2 – палисадный мезофилл, 3 – нижняя эпидерма, 4 – губчатый мезофилл, 5 – межклетник, 6 – проводящий пучок.

Fig. 1. Fragment of a cross-section of a leaf of *Stellaria humifusa* (magnification $\times 10$; photo by Morozova K.V.): 1 – upper epidermis, 2 – palisade mesophyll, 3 – lower epidermis, 4 – spongy mesophyll, 5 – intercellular, 6 – conducting bundle.

Покровная ткань представлена однослойной верхней и нижней эпидермой, тонкие клетки которой имеют сильно извилистые стенки. Клетки нижней эпидермы несколько крупнее, чем клетки верхней эпидермы (25×18 и 21×16 мкм соответственно). При этом индекс формы клеток эпидермы на обеих сторонах листовой пластинки одинаковый – 1,3–1,4. Поверхность эпидермальных клеток покрыта кутикулой толщиной около 3,4 мкм.

Листовая пластинка *Stellaria humifusa* амфистоматического типа, т. е. устьица расположены на обеих сторонах. Устьица аномоцитные, замыкающие клетки окружены четырьмя околоустьичными клетками, которые не отличаются от клеток эпидермы. Устьица на верхней эпидерме несколько крупнее по размеру, чем на нижней эпидерме (33×26 и 28×22 мкм соответственно). Несмотря на некоторые различия в размерах, устьица на обеих сторонах имеют округлую форму (индекс формы – 1,3). Площадь устьиц на нижней эпидерме в 1,4 раза меньше по сравнению с таковыми на верхней эпидерме, а количество их в 1,6 раза больше в 1 мм² поверхности листовой пластинки (табл. 2).

Химический состав почвы и растительного мата *Stellaria humifusa*. Химический анализ живой и отмершей массы органического вещества, почвы в виде слоев растительного мата *Stellaria humifusa*, который сформировался на каменном

субстрате, показал, что прослеживается три слоя по 1,5–3 см. По этим слоям можно проследить динамику изменения качественного состава исходного живого органического вещества *Stellaria humifusa*, которое трансформируется в процессе формирования мата (табл. 3).

Таблица 2
Параметры устьиц листа *Stellaria humifusa*

Table 2
Indices of the stomatal apparatus of *Stellaria humifusa* leaves

Показатель Index	M±m
Длина устьица, мкм, В/Н Length of the stomata, μm, U/L	33,1±0,4 / 27,7±0,4
Ширина устьица, мкм, В/Н Width of the stomata, μm, U/L	25,6±0,3 / 21,5±0,3
Площадь устьица, мкм ² , В/Н Stomata area, μm ² , U/L	668,3±14,2 / 472,8±14,6
Число устьиц эпидермы, шт. мм ⁻² , В/Н Number of stomata of the epidermis, pieces mm ⁻² , U/L	101±1 / 161±2

Примечание. M±m – среднее арифметическое ± стандартная ошибка; Эпидерма: В – верхняя (адаксиальная), Н – нижняя (абаксиальная).

Note. M±m – mean ± standard error; Epidermis: U – upper (adaxial), L – lower (abaxial).

Таблица 3
Химический состав почвенных слоев и фитомассы растительного мата *Stellaria humifusa*

Table 3
Chemical composition of soil layers and phytomass of plant mat-forming *Stellaria humifusa*

Показатель Index	pH	C _{org} , %	N _{org} , %	C:N
Фитомасса (стебли+корни) (0–3 см) Phytomass (stems+roots) (0–3 cm)	6,35	38,5	5,89	6,5
АО1 органогенный слой (3–4,5 см) / почвенный разрез 377* (0–4 см) АО1 organogenic layer (3–4,5 cm) / soil profile 377* (0–4 cm)	6,54	37,3 / 24,6	0,94 / 1,22	39,5 / 20,2
АО+ АУао органоминеральный слой (4,5–6 см) / почвенный разрез 377* (4–10 см) АО+ АУао organomineral layer (4,5–6 cm) / soil profile 377* (4–10 cm)	6,53	12,1 / 4,5	0,56 / 0,37	21,6 / 12,2

Примечание. Почвенный разрез 377* [12].

Note. Soil profile 377* [12].

Исходная живая масса имеет высокое содержание углерода, азота, низкое значение их соотношения и более кислую pH по сравнению с нижележащими почвенными горизонтами. Органогенный слой (АО1) включает в большей степени уже отмершие остатки растений. На фоне исходного высокого содержания углерода отмечается значительное (в 6 раз) снижение содержания азота, что резко увеличивает их соотношение. В следующем органоминеральном слое (АО+АУао) отмечается снижение содержания углерода в 3 раза, азота почти в 2 раза и, соответственно, уменьшение значения их соотношения на фоне нейтрального pH (6,5), который поддерживается и каменным субстратом под растительным матом *Stellaria humifusa*.

Обсуждение

У арктических видов преобладает гомогенный тип строения мезофилла [13], дорзовентральный тип выражен слабо и встречается реже. Виды растений с таким типом строения мезофилла листа обладают значительной экологической пластичностью, что позволяет им произрастать в широком диапазоне условий обитания [14–16]. По данным проведенного исследования, листья *Stellaria humifusa* имеют слабо выраженный, но дорзовентральный тип строения мезофилла, характеризуются хорошо развитой губчатой хлоренхимой, однослойной палисадной хлоренхимой, часть клеток которой расположены рыхло. Эти особенности свидетельствуют о достаточно благоприятных условиях внутри мата, в которых находится ассимиляционный аппарат этого вида. Подобное строение мезофилла было выявлено нами у листьев *Rubus chamaemorus* L., редкого вида, обнаруженного в окрестностях п. Баренцбург на территории о. Западный Шпицберген [17].

У *Stellaria humifusa* побеги с цветами располагаются на поверхности верхнего слоя отмерших побегов предыдущих лет вегетации в условиях высокой освещенности, а вегетативные побеги с фотосинтезирующими листьями текущего года находятся внутри мата под почти полным прикрытием генеративных органов и отмерших побегов в условиях затенения. Эти более благоприятные условия, прежде всего по температуре, обеспечили возможность дифференциации мезофилла листа на палисадный и губчатый у растений *Stellaria humifusa* в мате. Кроме того, хорошо развитая губчатая хлоренхима в отличие

от палисадной – характерный признак для видов, обитающих в условиях затенения [18].

Листья *Stellaria humifusa* имеют низкий коэффициент палисадности, что, как указывает О.В. Кудрявцева с соавторами [19], связано с изменением в небольшом диапазоне длины клеток столбчатой хлоренхимы. Низкие значения коэффициента палисадности были отмечены и для других видов растений, исследованных в этом районе [17]. В листьях *Stellaria humifusa* палисадный мезофилл развит слабо, но содержит хлоропластов в 1,6 раза больше, чем в клетках губчатого мезофилла. Это свидетельствует о значительном вкладе палисадной хлоренхимы в общую продуктивность фотосинтеза у изучаемого вида, а хорошо развитая губчатая хлоренхима с межклетниками активно участвует в процессах газообмена, происходящих с помощью устьиц, которые расположены на обеих сторонах листовой пластинки. Следует отметить формирование слоя обкладочных клеток хлоренхимы вокруг проводящих пучков у *Stellaria humifusa*, также содержащих хлоропласты и участвующих в процессе фотосинтеза. Возможно, наличие в листьях таких клеток компенсирует слабое развитие клеток палисадного мезофилла и способствует поддержанию оптимальной интенсивности фотосинтеза у данного вида в суровых климатических условиях.

Число и объем клеток палисадной и губчатой хлоренхимы, количество хлоропластов в клетках этих тканей листьев *Stellaria humifusa* соотносятся с данными других исследователей [20, 21] для видов, встречающихся в местообитаниях со средним уровнем освещенности.

Клетки однослойной эпидермы в листьях *Stellaria humifusa* – с тонкими извилистыми стенками, что характерно для растений в условиях затенения [22]. Большее число устьиц на нижней стороне листьев связано с меньшей освещенностью и нагревом на солнце, что важно для снижения потерь воды листом в процессе транспирации. На верхней стороне листовой пластинки устьиц меньше по количеству, но они крупнее по площади. Листовые пластинки покрыты кутикулой, которая служит защитой от высокой инсоляции, особенно у листьев цветоносных побегов, находящихся на поверхности мата.

Толщина листовой пластинки у *Stellaria humifusa* существенно больше, чем у листьев теневыносливых растений (120–180 мкм) [21]. На Се-

вере отмечено уменьшение площади листовых пластинок и увеличение их толщины, что связано с возрастанием числа слоев мезофилла [23–26]. Таким образом компенсируются потери площади внутренней ассимиляционной поверхности в результате сокращения листовой поверхности [24].

Травянистые виды растений, к которым относится *Stellaria humifusa*, в условиях Арктики характеризуются не только уменьшением линейных размеров вегетативных органов, но и приземистой формой роста [27]. Причиной миниатюризации растений и их органов в Арктике является уменьшение энергетических ресурсов, невозможность добывать необходимые элементы питания при пониженных температурах и в условиях короткого вегетационного периода в достаточных количествах.

Stellaria humifusa на о. Западный Шпицберген произрастает в форме мата, который формирует разветвленные подземные побеги, надземные стелющиеся побеги с очень мелкими по площади листьями и побеги с укороченными междоузлиями. Растения в мате обитают в более теплой приземной экологической нише, а их отмершие побеги прошлых лет вегетации играют роль укрытия вегетирующих побегов от высокой инсоляции, суточных перепадов температур, холодного влияния ветра. В таких условиях в анатомическом строении листьев у изучаемого вида выявлены адаптивные признаки, позволяющие поддерживать оптимальный уровень транспирации и газообмена. К таким признакам относятся: дорзовентральный тип строения мезофилла, слабо развитая палисадная хлоренхима, губчатая хлоренхима с межклетниками, клетки обкладки вокруг проводящих пучков, увеличение толщины листовой пластинки, на обеих сторонах последней имеются устьица, число которых больше на нижней эпидерме, однослойная верхняя и нижняя эпидерма, большее количество хлоропластов в клетках палисадного мезофилла.

Для сравнения с естественными процессами почвообразования был выбран разрез на восточном побережье Гренфьорда (катена «Грендален»), в частности разрез 377 [12]. Он был заложен под угнетенной ивково-травяно-зеленомошной растительностью на пологой автономной возвышенности в конусе выноса и характеризовал серогумусовую (дерновую) глееватую почву на пролювиальных отложениях. Микрорельеф представлен пятнами пучения, оголенными или

покрытыми редкими лишайниками. В большинстве разрезов серогумусовых почв, обследованных на побережьях острова Западный Шпицберген, распределение органического вещества в профиле имело аккумулятивный характер. Наиболее высокие значения содержания органического вещества свойственны верхним органо-генным горизонтам – О или АО; в минеральной части – горизонту АУ_{ао}, где сосредоточена основная масса корней растений. Содержание органического вещества в большинстве случаев снижается до глубины 40–50 см. Этот разрез характеризуется мощным подстильно-торфянистым горизонтом О [12].

Общие запасы азота в почве могут изменяться в широких пределах в зависимости от климатических условий. Поскольку большая часть почвенного азота входит в состав органического вещества, между содержанием углерода и азота в почвах наблюдается тесная корреляция. Соотношение С:N характеризует обогащенность органического вещества азотом. В горизонте О в почвах Западного Шпицбергена этот показатель варьирует от 13 до 36. В минеральных горизонтах соотношение углерода и азота становится более узким [12].

Сопоставление почвы под монодоминантным матом *Stellaria humifusa* с химическим составом почвенных разрезов (разрез 377) выявило, что содержание углерода в органо-генном слое АО в растительном варианте в 1,5 раза выше по сравнению с почвой, а азота в 1,3 раза ниже, и соответственно соотношение С:N в мате повышается почти в 2 раза по сравнению с почвой и достигает 39. Следует отметить, что это максимальное значение для почв Западного Шпицбергена. В органо-минеральном слое (АО+АУ_{ао}) растительного мата отмечено увеличение углерода по сравнению с почвой в 3 раза, азота в 1,5 раза и повышение соотношения до 22, что остается высоким для этих территорий. То есть процессы изменения химического состава происходят сходно как на почвенном разрезе под растительным матом *Stellaria humifusa*, так и в сравниваемом естественном почвенном профиле. Однако за счет растительного мата в субстрате гумифицируется больше органического вещества по сравнению с естественной почвой, что обеспечивает более благоприятные условия для произрастания растений в этой жизненной форме [12].

Таким образом, химический состав разреза, который характеризует серогумусовую (дерновую)

глееватую почву на пролювиальных отложениях, по составу верхних горизонтов оказался сходным с субстратом под матом *Stellaria humifusa*.

По содержанию хлорофиллов *Stellaria humifusa* входит в группу видов флоры Западного Шпицбергена с низкими значениями (0,4–0,8 мг/г сырой массы), что свидетельствует о высоком уровне адаптации ассимиляционного аппарата к условиям среды. Относительно низкое содержание флавоноидов у этого вида (3 % абсолютно сухой массы) свидетельствует, что эта группа защитных веществ слабо участвует в адаптации [28].

Исследование антиоксидантных ферментов в листьях *Stellaria humifusa*, произрастающих в условиях Шпицбергена, показало, что пероксидазная активность была низкая (1,04–2,2 ТГ/мг белка), а активность каталазы, наоборот, очень высокая – 366 мкмоль H_2O_2 /мг белка [28]. Низкие значения активности пероксидазы свидетельствуют о том, что не происходит чрезмерного накопления перекиси водорода, которое наблюдается в стрессовых условиях. Высокие показатели каталазной активности могут стать следствием высокой интенсивности дыхания и обменных процессов в связи с участием фермента в кислородном обмене. Установлено, что каталаза отсутствует в анаэробных условиях и индуцируется кислородом при повышении интенсивности дыхания [29].

Содержание суммарных липидов у *Stellaria humifusa* составляет 85,8 мг/г абсолютно сухой массы. Содержание насыщенных жирных кислот (НЖК) у *Stellaria humifusa* составляет 27 %, а ненасыщенных жирных кислот (ННЖК) – 73 % от суммы суммарных липидов. У этого вида отмечено максимальное значение диеновых ННЖК, содержание основной из них линолевой ЖК составляет около 30 %, что свидетельствует о высокой функциональной активности вида. Главной триеновой ЖК является α -линоленовая $C18:3(n-3)$, у *Stellaria humifusa* содержание триеновых оказалось ниже, чем диеновых ЖК. У некоторых видов Западного Шпицбергена обнаружена также γ -линоленовая кислота $C18:3(n-6)$ с максимальным количеством (4,2 %) в листьях *Stellaria humifusa*. Особенности вида являются наличие длинноцепочных тетраеновых ЖК (20:4) и доминирование диеновых ННЖК [30].

Заключение

Проведенные исследования показали, что *Stellaria humifusa* в форме растительного мата как по

структурным, так и по функциональным показателям адаптирована к условиям произрастания на скальных экотопах приморской территории. Такая жизненная форма способствует поддержанию более благоприятных светотемпературных условий для формирования ассимиляционного аппарата, а также высокого содержания минеральных и органических веществ в почвенном субстрате на скальных выходах. Химический состав органоминерального горизонта сходен с наиболее богатыми почвенными фрагментами на исследуемой территории.

Литература

1. Матвеева Н.В. Зональность в растительном покрове Арктики. СПб., 1998. 218 с.
2. Гамалей Ю.В. Транспортная система сосудистых растений. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 424 с.
3. Чернов Ю.И. Природная зональность и животный мир суши. М.: Мысль, 1975. 222 с.
4. Elven R., Arnesen G., Alsos I.G., Sandbakk B. Svalbardflora. Second edition. Vascular plants in Svalbard. 2020. URL: <http://svalbardflora.no/> (дата обращения: 10.04.2022)
5. Мокроносов А.Т., Борзенкова Р.А. Методика количественной оценки структуры функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1978. Т. 61, вып. 3. С. 119–133.
6. Борзенкова Р.А., Храмова Е.В. Определение мезоструктурных характеристик фотосинтетического аппарата растений. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2006. 14 с.
7. Ариушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
8. Тюрин И.В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании и плодородии: Учение о почвенном гумусе. М.; Л.: Сельхозгиз, 1957. 287 с.
9. Пономарева В.В., Плотинова Т.А. Гумус и почвообразование. Л.: Наука, 1980. 190 с.
10. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.
12. Литвинова Т.И., Кацулина Г.М. Органическое вещество почв побережий фьордов острова Западный Шпицберген. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 122 с.
13. Василевская Н.В. Экология растений Арктики. Мурманск: МГПУ, 2010. 184 с.
14. Антипов Н.Н. О возникновении и развитии экологических групп растений в процессе эволюции // Проблемы эволюционной физиологии растений. Л., 1974. С. 119–122.
15. Горышина Т.К. Фотосинтетический аппарат растений и условия среды. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 204 с.

16. Пьянков В.И. Роль фотосинтетической функции в адаптации растений к условиям среды: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 1993. 103 с.
17. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю., Морозова К.В., Ермолаева О.В. Морфо-физиологические особенности ассимиляционного аппарата листьев *Rubus chamaemorus* (Rosaceae) на Западном Шпицбергене // Бот. журн. 2019. Т. 104, № 11. С. 1740–1752. DOI: 10.1134/S0006813619110115
18. Иванова Л.А., Пьянков В.И. Структурная адаптация мезофилла листа к затенению // Физиология растений. 2002. № 3. С. 467–480.
19. Кудрявцева О.В., Шмакова Н.Ю., Кузьмин А.В. Количественно-анатомическая и продуктивная характеристики ассимилирующих органов растений-доминантов горных тундр Хибин // Бот. журн. 2001. Т. 86, № 9. С. 108–115.
20. Дьяченко А.П. Сравнительный анализ структурных и функциональных особенностей фотосинтетического аппарата различных экологических групп высших растений // Мезоструктура и функциональная активность фотосинтетического аппарата. Свердловск, 1978. С. 93–102.
21. Иванова Л.А. Адаптивные признаки структуры листа растений разных экологических групп // Экология. 2014. № 2. С. 109–118.
22. Барыкина Р.П., Чубатова Н.В. Экологическая анатомия цветковых растений. М.: КМК, 2005. 77 с.
23. Борисовская Г.М., Евплатова М.Г. Изменчивость анатомо-морфологических признаков листа багульника (*Ledum palustre* L.) в различных популяциях тундры и бореальной зоны // Вестн. ЛГУ. 1991. Сер. 3. Вып. 2, № 10. С. 32–38.
24. Борисовская Г.М., Хитун О.В. О некоторых чертах структурной адаптации бореальных растений к условиям Арктики // Вестн. ЛГУ. 1993. Сер. 3, вып. 1. № 8. С. 15–22.
25. Кудрявцева О.В. Структурно-функциональная характеристика листьев рода *Vaccinium* в Хибинах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб, 1995. 18 с.
26. Меньшакова М.Ю. Онтогенез и изменчивость анатомической структуры листьев видов семейства Ericaceae Juss. в различных экосистемах бореальной зоны и Субарктики: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 21 с.
27. Мазуренко М.Т. Биоморфологические адаптации растений Крайнего Севера. М.: Наука, 1986. 210 с.
28. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю. Растения и лишайники Западного Шпицбергена: экология, физиология. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2017. 270 с.
29. Павлова В.А., Нефедьева Е.Э., Лысак В.И., Шайхиев И.Г. Влияние импульсного давления на некоторые биохимические процессы семян гречихи при прорастании // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 21. С. 199–203.
30. Марковская Е.Ф., Розенцвиг О.А., Шмакова Н.Ю., Зорина А.А., Ильинова М.А. Участие липидов в адаптации высших сосудистых растений к условиям Западного Шпицбергена // Журн. общей биологии. 2021. Т. 82, № 6. С. 419–430. DOI: 10.31857/S0044459621060063.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Поступила после рецензирования 21.04.2022

Принята к публикации 17.05.2022

Об авторах

ШМАКОВА Наталья Юрьевна, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, Кольский научный центр Российской академии наук, 184250, Кировск, Мурманская обл., Россия,

<http://orcid.org/0000-0001-8342-1764>, e-mail: shmanatalya@yandex.ru

МАРКОВСКАЯ Евгения Федоровна, доктор биологических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Россия,

<http://orcid.org/0000-0002-0658-6845>, e-mail: volev10@mail.ru

МОРОЗОВА Кира Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет, 185910, Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Россия,

<http://orcid.org/0000-0001-6655-5197>, e-mail: mkv25@bk.ru

ЕРМОЛАЕВА Ольга Владимировна, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, Кольский научный центр Российской академии наук, 184250, Кировск, Мурманская обл., Россия,

<http://orcid.org/0000-0002-6310-3846>, e-mail: olia.ermolik@yandex.ru

ЛИТВИНОВА Татьяна Ивановна, младший научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт, Кольский научный центр Российской академии наук, 184250, Кировск, Мурманская обл., Россия,
<http://orcid.org/0000-0002-2203-1188>, e-mail: lita_0409@mail.ru

Для цитирования

Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф., Морозова К.В., Ермолаева О.В., Литвинова Т.И. Пути адаптации *Stellaria humifusa* на приморских территориях Западного Шпицбергена // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 294–304. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-294-304>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-294-304

Stellaria humifusa adaptation on the western coast of Svalbard

N.Yu. Shmakova^{1,*}, E.F. Markovskaya², K.V. Morozova², O.V. Ermolaeva¹, T.I. Litvinova¹

¹Polar-Alpine Botanical Garden-Institute KSC RAS, Kirovsk, Murmansk reg., Russia

²Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

*shmanatalya@yandex.ru

Abstract. We study adaptation features of *Stellaria humifusa* (Caryophyllaceae) on the rocky ecotopes of the west coast of Svalbard. *Stellaria humifusa*, a mat-forming herb, is a monodominant plant community. In this paper we show that the mat life form is a complex structure, which is represented by a system of aboveground and underground organs, and a soil horizon. Aboveground organs are the top layer of the dead plants from the previous year. Flowering shoots of the current year plants with white flowers can be seen on the ground surface. The next layer of the mat is organogenic, which the main assimilating system. The layer is represented by the green leaves of *Stellaria humifusa*, which by their anatomical structures and functional indicators are adapted to the local habitat conditions in the mat. The bottom layer is the organomineral horizon. The layer represents a soil substrate, which is a source of mineral nutrition for the entire structure. The chemical composition of the soil substrate of the mat *Stellaria humifusa* is similar to the natural soil profile of the coastal area. The plant mat contributes to a greater accumulation of organic matter; activates humification and provides favorable conditions for the growth of *Stellaria humifusa*.

Keywords: *Stellaria humifusa*, Caryophyllaceae, mat-forming, leaf anatomy, organic carbon, organic nitrogen, West Svalbard

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the State Assignment for the Polar Alpine Botanical Garden-Institutes of the Kola Science Centre of the RAS «Plant and soil resources, improvement of methods of management of protected natural territories under conditions of climatic changes and anthropogenic impact and optimization of human habitat in the Svalbard archipelago» (number 0189-2019-0025; registration number 1021032422551-2-1.6.11).

References

1. Matveeva N.V. Zonal'nost' v rastitel'nom pokrove Arktiki. SPb., 1998. 218 p.
2. Gamalej Yu.V. Transportnaya sistema sosudistyh rastenij. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2004. 424 p.
3. Chernov Yu.I. Prirodnaya zonal'nost' i zhivotnyj mir sush. M: Mysl', 1975. 222 p.
4. Elven R., Arnesen G., Alsos I.G., Sandbakk B. Svalbardflora. Second edition. Vascular plants in Svalbard. 2020. URL: <http://svalbardflora.no/> (дата обращения: 10.04.2022)
5. Mokronosov A.T., Borzenkova R.A. Metodika kolichestvennoj ocenki struktury funkcional'noj aktivnosti fotosinteziruyushchih tkanej i organov // Trudy po prikladnoj botanike, genetike i selekcii. 1978. Vol. 61, Iss. 3. P. 119–133.
6. Borzenkova R.A., Hramcova E.V. Opredelenie mezostrukturnyh harakteristik fotosinteticheskogo ap-

parata rastenij. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 2006. 14 p.

7. Arinushkina E.V. Rukovodstvo po himicheskemu analizu pochv. M.: Izd-vo MGU, 1970. 487 p.

8. Tyurin I.V. Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v pochvoobrazovanii i plodorodii: Uchenie o pochvennom gumuse. M.; L.: Sel'hozgiz, 1957. 287 p.

9. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Gumus i pochvoobrazovanie. L.: Nauka, 1980. 190 p.

10. Agrohimicheskie metody issledovaniya pochv. M.: Nauka, 1975. 656 p.

11. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii. Smolensk: Ojkumena, 2004. 343 p.

12. Litvinova T.I., Kashulina G.M. Organicheskoe veshchestvo pochv poberezhij f'ordov ostrova Zapadnyj Shpicbergen. Apatity: KNC RAN, 2015. 122 p.

13. Vasilevskaya N.V. Ekologiya rastenij Arktiki. Murmansk: MGPU, 2010. 184 p.

14. Antipov N.N. O vozniknovenii i razvitii ekologicheskikh grupp rastenij v processe evolyucii // Problemy evolyucionnoj fiziologii rastenij. L., 1974. P. 119–122.

15. Goryshina T.K. Fotosinteticheskij apparat rastenij i usloviya sredy. L.: Izd-vo LGU, 1989. 204 p.

16. P'yankov V.I. Rol' fotosinteticheskoy funkicii v adaptacii rastenij k usloviyam sredy: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. M., 1993. 103 p.

17. Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu., Morozova K.V., Ermolaeva O.V. Morphophysiological features of assimilation apparatus of *Rubus chamaemorus* (Rosaceae) leaves in West Svalbard // Bot. Jour. 2019. Vol. 104, No. 11. P. 1740–1752. DOI: 10.1134/S0006813619110115

18. Ivanova L.A., P'yankov V.I. Structural adaptation of the leaf mesophyll to shading // Russian Journal of Plant Physiology. 2022. Vol. 49. No. 3. P. 467–480.

19. Kudryavceva O.V., Shmakova N.Yu., Kuz'min A.V. Quantitative-anatomical and productive characteristics of assimilating organs of dominant plants of mountain tundra Khibiny // Bot. Jour. 2001. Vol. 86, No. 9. P. 108–115.

20. D'yachenko A.P. Sravnitel'nyj analiz strukturnyh i funkcional'nyh osobennostej fotosinteticheskogo appa-

rata razlichnykh ekologicheskikh grupp vysshih rastenij // Mezostuktura i funkcional'naya aktivnost' fotosinteticheskogo apparata. Sverdlovsk, 1978. P. 93–102.

21. Ivanova L.A. Adaptive features of leaf structure in plants of different ecological groups // Ecology. 2014. No. 2. P. 109–118. DOI: 10.7868/S0367059714020024. (In Rus.)

22. Barykina R.P., Chubatova N.V. Ekologicheskaya anatomiya cvetkovykh rastenij. M.: KMK, 2005. 77 p.

23. Borisovskaya G.M., Evpyat'eva M.G. Izmenchivost' anatomo-morfologicheskikh priznakov lista bagul'nika (*Ledum palustre* L.) v razlichnykh populyaciyah tundry i boreal'noj zony // Vestnik LGU. 1991. Ser. 3. Iss. 2, No. 10. P. 32–38.

24. Borisovskaya G.M., Hitun O.V. O nekotorykh chertah strukturnoj adaptacii boreal'nykh rastenij k usloviyam Arktiki // Vestnik LGU. 1993. Ser. 3. Iss. 1, No. 8. P. 15–22.

25. Kudryavceva O.V. Strukturno-funkcional'naya harakteristika list'ev roda *Vaccinium* v Hibinah: Avtoref. dis. ...kand. biol. nauk. SPb., 1995. 18 p.

26. Men'shakova M.Yu. Ontogenez i izmenchivost' anatomicheskoy struktury list'ev vidov semejstva Ericaceae Juss. v razlichnykh ekosistemah boreal'noj zony i Subarktiki: Avtoref. dis. ...kand. biol. nauk. Petrozavodsk, 2006. 21 p.

27. Mazurenko M.T. Biomorfologicheskije adaptacii rastenij Krajnego Severa. M.: Nauka, 1986. 210 p.

28. Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. Rasteniya i lishajniki Zapadnogo Shpicbergena: ekologiya, fiziologiya. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2017. 270 p.

29. Pavlova V.A., Nefed'eva E.E., Lysak V.I., Shajhiev I.G. Vliyanie impul'snogo davleniya na nekotorye biohimicheskie processy semyan grechihi pri prorastanii // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. Vol. 17, No. 21. P. 199–203.

30. Markovskaya E.F., Rozencvet O.A., Shmakova N.Yu., Zorina A.A., Il'inova M.A. Involvement of lipids into adaptations of higher vascular plants to the conditions of West Spitsbergen // Jour. of General Biology. 2021. Vol. 82, No. 6. P. 419–430. DOI: 10.31857/S0044459621060063

Submitted 30.03.2022

Revised 21.04.2022

Accepted 17.05.2022

About the authors

SHMAKOVA Natalia Yurjevna, chief researcher, Dr. Sci. (Biol.), Polar-alpine Botanical Garden-Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Murmansk reg., 184250, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-8342-1764>, e-mail: shmanatalya@yandex.ru

MARKOVSKAYA Evgenia Fedorovna, Dr. Sci. (Biol.), professor, Petrozavodsk State University, 33 Lenina pr., Petrozavodsk 185910, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-0658-6845>, e-mail: volev10@mail.ru

MOROZOVA Kira Vladimirovna, Cand. Sci. (Biol.), docent, Petrozavodsk State University, 33 Lenina pr., Petrozavodsk 185910, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-6655-5197>, e-mail: mkv25@bk.ru

Н.Ю. ШМАКОВА и др.

ERMOLAEVA Olga Vladimirovna, senior researcher, Cand. Sci. (Biol.), Polar-alpine Botanical Garden-Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Murmansk reg., 184250, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-6310-3846>, e-mail: olia.ermolik@yandex.ru

LITVINOVA Tatjana Ivanovna, junior researcher, Polar-alpine Botanical Garden-Institute, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kirovsk, Murmansk reg., 184250, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-2203-1188>, e-mail: lita_0409@mail.ru

For citation

Shmakova N.Yu., Markovskaya E.F., Morozova K.V., Ermolaeva O.V., Litvinova T.I. Stellaria humifusa adaptation on the western coast of Svalbard // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 294–304. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-294-304>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.793.72

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315

Испытания на износ порошковых покрытий и исследования микрогеометрии поверхностей трения в условиях холода

Н.Ф. Стручков*, Д.И. Лебедев, Г.Г. Винокуров

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

*struchkov_n@rambler.ru

Аннотация. Интенсивная эксплуатация техники в природно-климатических условиях Севера часто приводит к преждевременному износу деталей ее узлов трения. При низкой температуре запуска техники происходят повторные термические расширения уже приработанных деталей узлов трения и изменения их геометрических размеров. Повышение вязкости технических смазочных материалов при холоде также снижает износостойкость узлов трения. Снижение ресурса рабочих элементов и деталей ходовой системы землеройной и горнодобывающей техники Севера обусловлено также мерзлыми грунтами в криолитозоне. Основной задачей трибологии для техники Севера становится исследование узлов трения машин и механизмов, эксплуатирующихся в условиях холода. Следует выявить, как низкие климатические температуры внешней среды будут влиять на процессы изнашивания материалов узлов трения, в том числе порошковых износостойких покрытий. Проведены испытания на износ при низких климатических температурах модифицированных порошковых покрытий, профилометрические и теплофизические измерения поверхностей трения. Исследования проводились на специальном низкотемпературном стенде в период зимних низких климатических температур в г. Якутск (ниже -40°C , декабрь 2020 г., январь и декабрь 2021 г.). Выявлены закономерности установления рабочей температуры узла трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при холоде. Получены данные массового износа покрытий и стальных контртел, параметры шероховатости контактных поверхностей при их трении скольжения в условиях низких климатических температур.

Ключевые слова: испытания на износ, низкие климатические температуры, износостойкое покрытие, контртело, трение скольжения, износ, профиль

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующему отделом тепломассобменных процессов ИФТПС СО РАН, к.т.н. К.Н. Большеву за помощь в проведении теплофизических измерений.

Введение

Решения задач трибологии материалов направлены на создание научных основ обеспечения высокой производительности и надежности машин и механизмов. Как известно, вследствие изнашивания узлов трения техники постоянно большие затраты расходуются на изготовление запасных частей, ремонт и восстановление изношенных деталей. Классическими трибологическими исследованиями давно установлено, что повышенный расход топлива и низкие показатели эффективности техники обусловлены, в основном, потерями на трение деталей узлов трения [1]. Проблемы трибологии материалов особенно актуальны для техники Севера, работающей в экстре-

мальных природно-климатических условиях. Интенсивная эксплуатация техники на Севере (низкие температуры запуска, мерзлый грунт криолитозоны и др.) приводит к преждевременному износу узлов трения [2].

Исследования показывают, что в северных регионах средняя производительность техники зимой на открытых работах падает в 1–2 раза, наработка на отказ снижается в 2–3 раза, средний срок службы сокращается в 2,5–3,5 раза. С 80-х годов прошлого столетия в Якутском научном центре СО РАН проводятся систематические исследования фундаментальных проблем трибологии в условиях низких климатических температур [3–7]. Были установлены физиче-

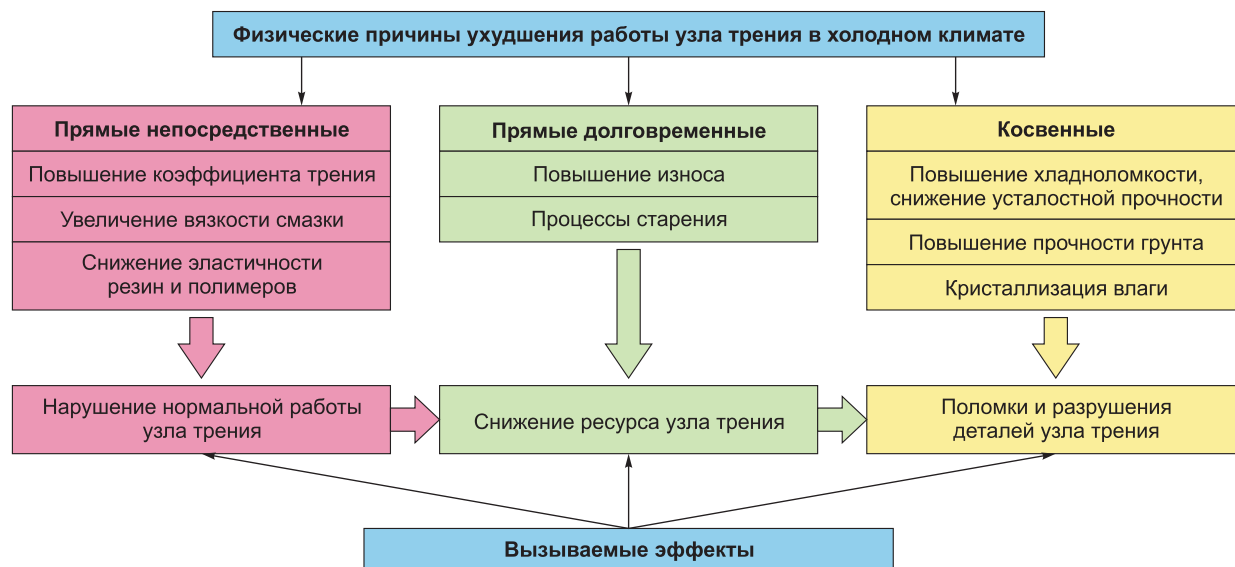


Рис. 1. Физические проблемы (причины) снижения работоспособности узла трения в условиях холодного климата [4].

Fig. 1. Physical problems (reasons) of reduced performance of the friction unit in a cold climate [4].

ские проблемы (причины), которые представляют собой объективные закономерности изменения свойств материалов для узлов трения под влиянием низких температур и других факторов холодного климата (рис. 1). Этот многосторонний комплекс задач также подтверждается современными отечественными и зарубежными исследованиями, которые показывают актуальность исследования влияния низких температур на процессы изнашивания различных материалов и узлов трения [8–12].

В настоящее время для упрочнения и восстановления деталей техники в ремонтном производстве используются перспективные технологии нанесения износостойких порошковых покрытий [13–15]. Структура и физико-механические свойства порошковых покрытий существенно влияют на процессы изнашивания обработанной поверхности деталей техники [16–18].

Поэтому для разработки трибологических основ использования технологий нанесения покрытий для восстановления деталей техники Севера следует выявить, как низкие климатические температуры внешней среды будут влиять на изнашивание узлов трения с порошковым износостойким покрытием. Актуальными задачами в данном направлении являются проведение испытаний на износ пары трения «порошковое покрытие–стальное контртело» в условиях низких климатических температур, изучение установления рабочей температуры и изменения микро-

геометрии контактных поверхностей при трении в условиях холода.

Цель данной работы – выявление закономерностей установления рабочей температуры и процессов изнашивания узлов трения с модифицированными порошковыми покрытиями при трении в условиях низких климатических температур окружающей среды.

Материалы и методика экспериментальных исследований

Объектами исследования являются износостойкие порошковые покрытия с тугоплавкими и ультрадисперсными модифицирующими добавками – разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) [19–21]. Для модифицирования износостойких покрытий были использованы порошки корунда Al_2O_3 и ультрадисперсные порошки шпинелей $CoAl_2O_4$ и $CuAl_2O_4$, получаемых методом плазмохимического синтеза производства Республики Латвия (средний размер частиц около ~ 100 нм). Износостойкие покрытия из порошковых проволок с тугоплавкими добавками корунда Al_2O_3 нанесены на промышленной установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 ООО «Веха-1» (г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах: ток дуги $I = 280–300$ А, дистанция напыления $L = 130$ мм, напряжения дуги равны $U = 30–40$ В. Основу порошкового материала

газопламенных покрытий с ультрадисперсными модифицирующими добавками составляет промышленный самофлюсующийся порошок ПР-Н70ХТ7С4Р4 системы Ni–Cr–Si–B [20, 21].

Для низкотемпературных исследований в работе использовался стенд для испытаний на износ порошковых покрытий в условиях низких климатических температур внешней среды, проведения профилометрических и теплофизических измерений контактных поверхностей трения. Низкотемпературный стенд изготовлен на основе машины трения СМЦ-2 с теплоизолированной камерой типа «обратный балкон»: обеспечение условий окружающей холодной среды предусмотрено открытием окна при низких климатических температурах в зимний период г. Якутск (рис. 2, а). Сначала был изготовлен прямоугольный деревянный каркас стенда из брусев длиной 100 см, который был обшит ориентированно-стружечной плитой толщиной 11 мм. Потом низкотемпературная рабочая камера стенда была покрыта четырьмя слоями из современных теплоизоляционных материалов: ветро-, влагозащитной пленки, утеплителя из минеральной ваты толщиной 100 мм и материала на основе вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой.

На экспериментальном стенде проведены триботехнические, теплофизические и профилометрические исследования поверхностей износостойких порошковых покрытий при трении скольжения со стальными контртелами в условиях низких климатических температур. Для испытаний на износ порошковые покрытия были нанесены на поверхность цилиндрических образцов-дисков диаметром 50 и толщиной 10 мм. На основе изучения методик испытаний на износ была выбрана схема трения «диск–колодка» (рис. 2, б). По данной схеме трения одному циклу машины трения СМЦ-2 соответствует путь трения, равный $1,96 \times 10^{-2}$ м. По соответствующим размерам были изготовлены контртел-колодки из обычной и закаленной сталей марки ШХ15. При этом были измерены твердости контртел: твердость контртел из стали ШХ15 составляет 42–45 по шкале HRC; твердость контртел из закаленной стали ШХ15 составляет 62–64 HRC.

Испытания на износ проведены на машине трения СМЦ-2 низкотемпературного стенда при следующих режимах: нагрузка 147 Н, частота вращения вала 4 об./с, трение сухое. Массовый

износ измерялся взвешиванием дисков с покрытиями и стальных контртел-колодок на электронных весах «Vibra» с точностью до $\pm 0,0001$ г. Измерения массового износа, профилометрирование поверхностей покрытий и стальных контртел на стенде проводились через 3600 циклов машины трения.

Микрогеометрия контактных поверхностей трения покрытий и контртел в работе исследовалась профилометром «Surftest SJ-201P» (Mitutoyo, Япония) и на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000C» (Carl Zeiss Microscopy, Германия). Измерения профилей порошковых покрытий проводились на четырех маркированных противоположных участках образцов, затем полученные данные усреднялись по всей поверхности трения.

Для измерения температуры узла трения использовались кабельные термоэлектрические преобразователи производства ПК «Тесей» типа КТХА (см. рис. 2, б). Для компенсации температуры холодного спая использован платиновый

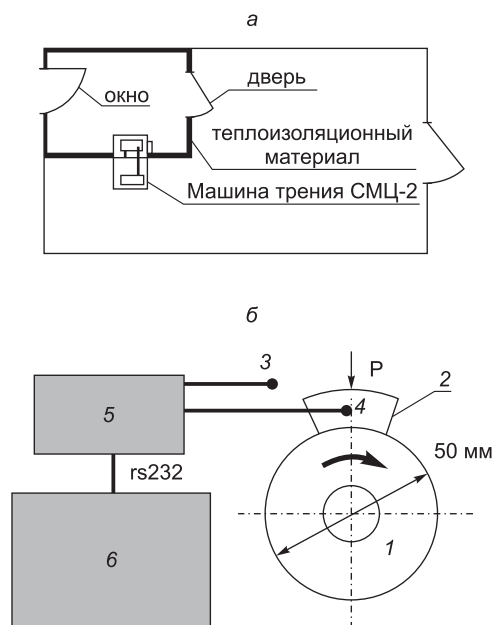


Рис. 2. Низкотемпературный стенд на базе машины трения СМЦ-2:

а – схема «обратный балкон»; б – схема измерений: 1 – образец-диск с покрытием, 2 – контртело-колодка, 3 и 4 – термопары, 5 – преобразователь сигналов Теркон, 6 – компьютер.

Fig. 2. Low-temperature stand based on the SMC-2 friction machine:

a – the «reverse balcony» scheme; б – test bench measurement scheme, 1 – coated disk sample, 2 – counterbody-block, 3 and 4 – thermocouples, 5 – Terkon signal converter, 6 – computer.

термометр сопротивления ТСП-100. Термопара 3 установлена в сквозное отверстие внутри контртела-колодки 1, просверленное до половины толщины образца; термопара 4 измеряет температуру внешней среды. Для преобразования и обработки сигналов термодатчиков использовался прецизионный преобразователь сигналов «Теркон» 5. Регистрация температурных данных осуществлялась с помощью компьютера 6 через интерфейс rs232 с периодом 2–3 с. Дальнейшая обработка температурных данных производилась в MS Excel.

Результаты теплофизических измерений и испытаний на износ узлов трения на низкотемпературном стенде

Исследования на стенде были проведены в период зимних низких климатических температур в г. Якутск (ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, декабрь 2020 г.,

январь и декабрь 2021 г.). С целью сравнительного анализа результатов испытания на износ на стенде проведены с одинаковыми режимами трения при различных температурах окружающей среды: комнатной ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$) и отрицательной климатической (от -43 до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Таким образом, разница температур узла трения является существенной – около $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3, а представлены сравнительные графики изменения температуры узла трения «покрытие с добавками корунда Al_2O_3 – контртело из стали ШХ15» по времени изнашивания в комнатных условиях ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при холодном климате ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Как видно из графиков, изменение температуры узла трения состоит из двух качественно различных стадий:

– стадия I характеризуется начальным интенсивным ростом температуры узла трения (см. рис. 3, а). Резкое повышение температуры в

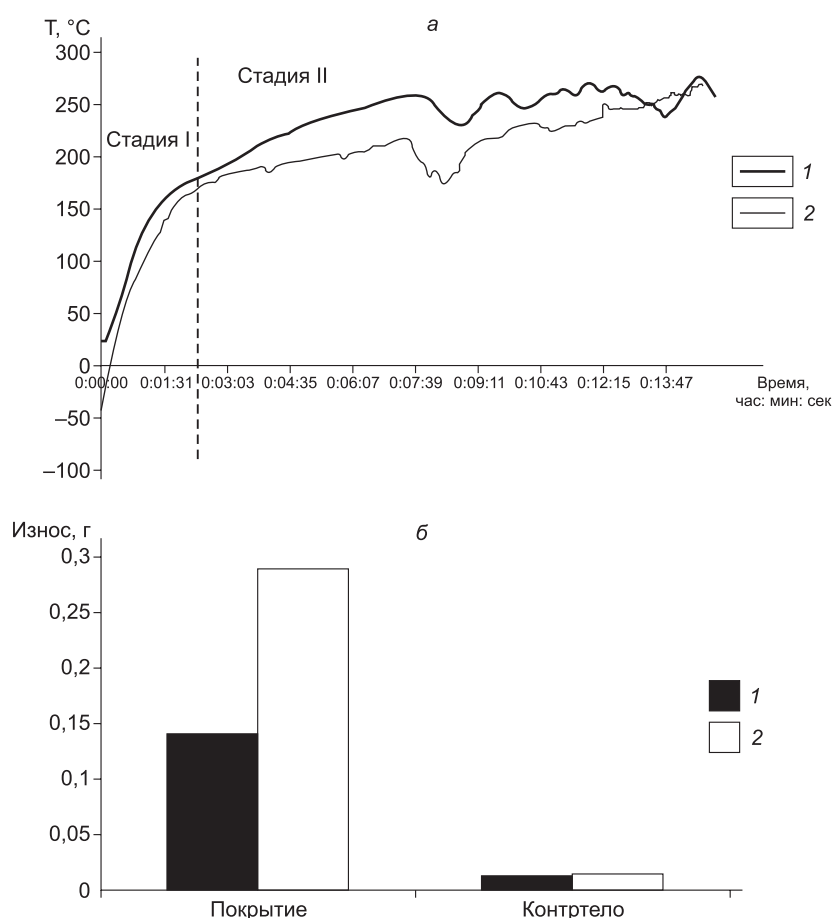


Рис. 3. Изменение температуры (а) и массовый износ (б) узла трения: 1 – в комнатных условиях ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – при холодном климате ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$); покрытие с модифицирующими добавками Al_2O_3 , контртело из стали ШХ15; продолжительность испытаний 15 мин.

Fig. 3. Temperature change (a) and mass wear (b) of the friction unit: 1 – in room conditions ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – in cold climates ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$); coating with modifying additives Al_2O_3 , counterbody made of steel ShKh15; test duration 15 min.

данной стадии объясняется начальной работой сил трения, которые интенсивно нагревают узел трения;

– в стадии II наблюдается равномерное повышение температуры узла трения, наблюдаются ее колебания. Далее, температура узла трения постепенно стабилизируется (см. рис. 3, а).

Как и следовало ожидать, при холодном климате температура узла трения в целом ниже, чем при комнатной температуре (см. рис. 3, а). В обоих случаях на начальном этапе трения (до ≈ 3 мин.) наблюдается быстрое повышение температуры узла трения примерно до ≈ 180 – 200 °С. Далее, вплоть до 12 мин. испытаний наблюдается различие в изменении температуры с разницей пример-

но ≈ 50 °С в комнатных условиях ($+24$ °С) и при холодном климате (-45 °С).

На рис. 3, б приведены сравнительные данные массового износа покрытия с модифицирующими добавками Al_2O_3 и стального контртела из стали ШХ15 в комнатных условиях ($+24$ °С) и при холодном климате (-45 °С). Как видно из рисунка, при температуре -45 °С массовый износ модифицированного покрытия практически в два раза выше чем при комнатной температуре, а у контртела из стали ШХ25 массовый износ возрастает незначительно – примерно на ≈ 12 % (см. рис. 3, б).

На рис. 4, а приведено изменение температуры узла трения в комнатных условиях ($+24$ °С) и при

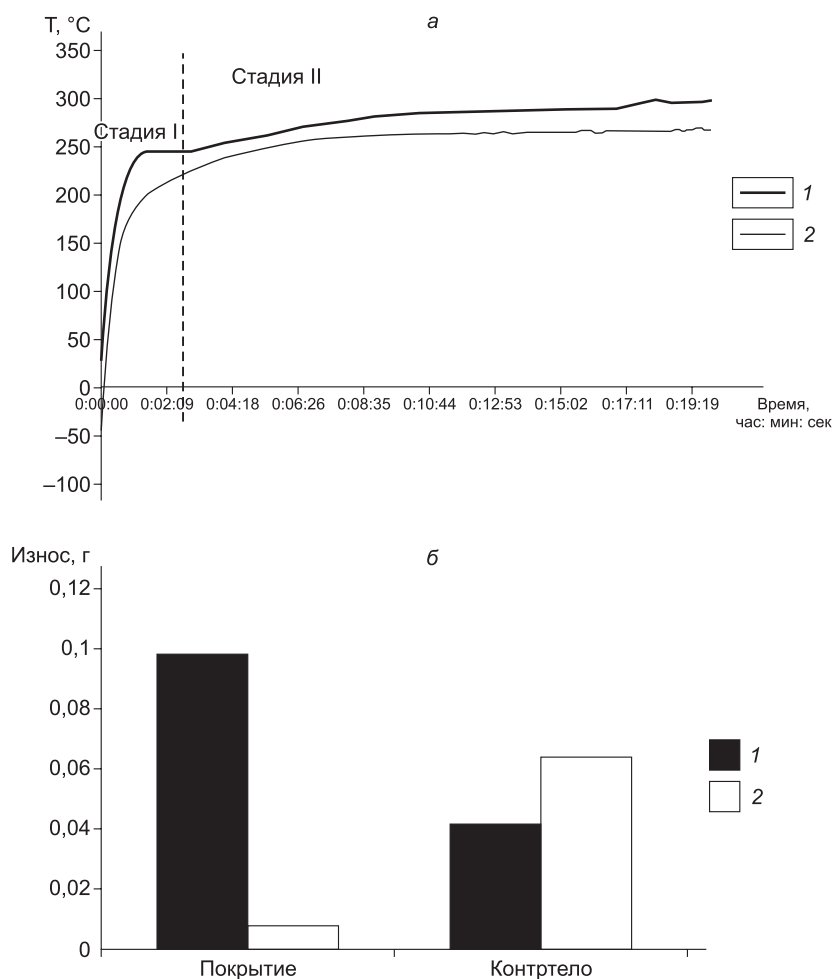


Рис. 4. Изменение температуры (а) и массовый износ (б) узла трения: 1 – в комнатных условиях ($+24$ °С); 2 – при холодном климате (-43 °С); покрытие с ультрадисперсными добавками шпинели $CoAl_2O_4$ 0,2 мас. %, контртелo из закаленной стали ШХ15; продолжительность испытаний 20 мин.

Fig. 4. Temperature change (а) and mass wear (б) of the friction unit: 1 – in room conditions ($+24$ °С); 2 – in cold climates (-43 °С); coating with ultrafine additives of spinel $CoAl_2O_4$ 0.2% wt., counterbody made of hardened steel ShKh 15; test duration 20 min.

холодном климате ($-43\text{ }^{\circ}\text{C}$) для покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели CoAl_2O_4 0,2 мас.% и контртела-колодки из закаленной стали ШХ15; продолжительность испытаний 20 мин. Как видно из графиков, при обоих температурных режимах ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$) изменение температуры узла трения состоит также из двух качественных стадий I и II. В начальной стадии I (до ≈ 2 мин.) происходит резкое повышение температуры узла трения до $\approx 220\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее, начиная со ≈ 2 -й минуты, наблюдается стадия II, когда рост температуры резко снижается и происходит более равномерное медленное повышение. Как видно из графиков, сохраняется различие в изменении температуры с разницей $\approx 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ в комнатных условиях ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при холодном климате ($-43\text{ }^{\circ}\text{C}$).

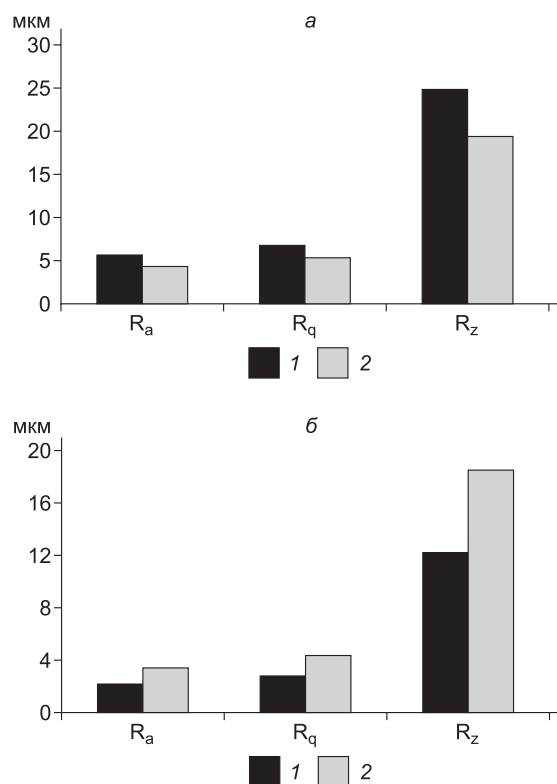


Рис. 5. Параметры шероховатости контактных поверхностей трения покрытия (а) и контртела (б): 1 – в комнатных условиях ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – при холодном климате ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$); покрытие с модифицирующими добавками Al_2O_3 , контртело из стали ШХ15; продолжительность трения скольжения 15 мин.

Fig. 5. Roughness parameters of the contact friction surfaces of the coating (a) and the counterbody (b): 1 – in room conditions ($+24\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2 – in a cold climate ($-45\text{ }^{\circ}\text{C}$); coating with modifying additives Al_2O_3 , counterbody made of steel ShKh 15; duration of sliding friction 15 min.

На рис. 4, б приведены сравнительные данные массового износа покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели CoAl_2O_4 0,2 мас. % и контртела-колодки из закаленной стали ШХ15 в комнатных условиях ($24\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при холодном климате ($-43\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Как видно из графиков, массовый износ в комнатных условиях значительно (примерно на порядок) больше, чем при отрицательной температуре внешней среды, в противоположность закономерности массового износа покрытия с модифицирующими добавками Al_2O_3 (см. рис. 3, б). Массовый износ контртела из закаленной стали ШХ15 при холоде, наоборот, возрастает примерно в $\approx 1,5$ раза. Это свидетельствует, видимо, о большей чувствительности структуры закаленной стали ШХ15 к снижению температуры внешней среды при трении скольжения (см. рис. 4, б).

Результаты профилометрических измерений микрогеометрии контактных поверхностей трения на низкотемпературном стенде

Как известно, сложные многофакторные процессы изнашивания материалов при трении скольжения отражаются на особенностях формирования профилей контактных поверхностей трения [22–26]. Поэтому в работе исследованы параметры микрогеометрии контактных поверхностей в узлах трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при трении скольжения в условиях низких климатических температур. При испытаниях на износ на экспериментальном низкотемпературном стенде определены следующие параметры профилей: шероховатость R_a , среднеквадратическое отклонение R_q , размах отклонений R_z , параметр R_y . Обработка профилометрических данных проводилась в электронных таблицах Excel.

На рис. 5 приведены измеренные параметры микрогеометрии поверхностей трения покрытия с модифицирующими добавками Al_2O_3 и контртела из стали ШХ15. Испытания на износ проведены также при комнатной $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ и низкой климатической $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ исходных температурах узла трения в течение 15 минут. Как видно из графиков, параметры шероховатости поверхности трения покрытия при комнатной температуре больше, чем при отрицательной температуре (см. рис. 5, а). У поверхности трения контртела из стали ШХ15 наблюдаются обратные законо-

мерности – параметры шероховатости выше при отрицательной температуре (см. рис. 5, б).

Профилометрическими измерениями установлено, что у контртела из стали ШХ15 наблюдается особенно большой размах профиля R_z при отрицательной температуре (см. рис. 5, б). Как известно, параметр R_z представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины. Это означает, что высокий уровень данного параметра по сравнению с среднеарифметическим и среднеквадратичным отклонениями R_a и R_q характеризует увеличение неоднородности микрогеометрии поверхности трения стального контртела. Таким образом, изменение микрогеометрии поверхности трения контртела показывает большую чувствительность структуры контртела – колодки из стали ШХ15 к снижению исходной температуры трения.

В заключение следует отметить, что проведенные эксперименты выявили неоднозначный характер влияния низких температур на изнашивание трибосопряжений «порошковое покрытие–стальное контртело». Как показывают многочисленные трибологические исследования, влияние температуры окружающей среды на процессы трения скольжения неоднозначно отражается на значениях коэффициента трения и массового износа контактных поверхностей материалов узла трения [3–12, 22–26]. Как показано выше, что для покрытия с модифицирующими добавками шпинели CoAl_2O_4 износ в комнатных условиях значительно больше, чем при трении скольжения в условиях низкой климатической температуры окружающей среды (см. рис. 4, б). Поэтому объяснение полученных результатов требует подробного изучения, в первую очередь, металлургических аспектов многофакторного процесса изнашивания, как на этапе приработки, так и на стадии установившегося трения с учетом физико-механического поведения контактирующих материалов при изначально низкой температуре внешней среды.

Заключение

1. Проведены испытания на износ, теплофизические и профилометрические исследования узлов трения с модифицированными порошковыми покрытиями и стальными контртелами при

трении скольжения в условиях холода. Исследования проводились на экспериментальном стенде на базе машины трения СМЦ-2, который имеет теплоизолированную камеру для создания зимой условий низких климатических температур. Испытания на износ покрытий проведены в период зимних низких температур в г. Якутск (декабрь 2020 г., январь и декабрь 2021 г.) при одинаковых режимах трения и различных температурах: комнатной ($+24\text{ }^\circ\text{C}$) и низкой климатической (от $-43\text{ }^\circ\text{C}$ до $-45\text{ }^\circ\text{C}$); разница температур составляет $\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Теплофизическими измерениями узла трения установлено, что изменение температуры состоит из двух качественно различных стадий:

первая короткая стадия ($\sim 1\text{--}3$ мин.) характеризуется быстрым ростом температуры узла трения, это объясняется началом работ сил трения, которые интенсивно нагревают узел трения;

во второй стадии происходит медленное равномерное повышение температуры узла трения. Далее температура постепенно стабилизируется, но при холодном климате температура до $15\text{--}20$ мин. трения остается в целом ниже, чем при комнатной температуре.

3. Испытаниями на износ установлено, что при температуре $-45\text{ }^\circ\text{C}$ массовый износ покрытия с корундом Al_2O_3 , практически в два раза выше, чем при комнатной температуре, а массовый износ контртела из стали ШХ25 возрастает незначительно (на $\sim 12\%$). Массовый износ покрытия с добавками шпинели CoAl_2O_4 в комнатных условиях на порядок выше, чем при холоде. При этом массовый износ соответствующего контртела из закаленной стали ШХ15 при холодном климате возрастает примерно в $\sim 1,5$ раза. Это свидетельствует о большей чувствительности структуры закаленной стали ШХ15 к снижению температуры узла трения.

4. Проведены сравнительные профилометрические исследования контактных поверхностей узлов трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при испытаниях на износ в условиях комнатных и низких климатических температур. Параметры шероховатости поверхности трения покрытия с тугоплавкими добавками при комнатной температуре больше, чем при отрицательной температуре. У соответствующего контртела из стали ШХ15 наблюдаются обратные закономерности – параметры шероховатости выше при от-

рицательной температуре. При этом наблюдается большой размах профиля R_z при низкой климатической температуре $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, это отражает большую чувствительность структуры стали ШХ15 к процессам изнашивания при низкой температуре окружающей среды.

Литература

1. Ишлинский А.Ю., Белый В.А. Развитие науки о трении и износе в СССР // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 1. С. 7–12.
2. Ермолаев С.В., Болдаев А.П. Прогнозирование износа деталей тяжелых бульдозеров // Колыма. 1981. № 2. С. 24–26.
3. Ларионов В.П., Ковальчук В.А. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. Новосибирск: Наука, 1976. 206 с.
4. Черский И.Н. О критериях работоспособности и прогнозирования долговечности металлополимерных узлов трения // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 1021–1026.
5. Исследование триботехнических систем в условиях холодного климата. Сборник научных трудов. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1985. 120 с.
6. Черский И.Н., Мороз В.А. Прогнозирование долговечности и оптимизация подшипников и уплотнений из полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов. 1980. № 6. С. 1094–1102.
7. Богатин О.Б., Мороз В.А., Черский И.Н. Основы расчета полимерных узлов трения. Новосибирск: Наука, 1983. 213 с.
8. Пернебеков С.С., Балабеков З.А., Асылбек Г.У., Рахимберды Б.К., Манкараева М.А. Анализ факторов, определяющих интенсивность износа двигателя при низких температурах // Молодой ученый. 2017. № 1 (135). С. 76–77.
9. Андреева И.А., Хомич А.И. Пластические свойства и износ материалов при низких температурах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Технические науки. С. 5–6.
10. Gradt T., Schneider T., Hübner W., Börner H. Friction and wear at low temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 1998. Vol. 23, Iss. 5. P. 397–403. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00070-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00070-0)
11. Ma L., Shi L.B., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition // Wear. 2018. Vol. 394–395. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.10.011>
12. Khadem M., Kim Dae-Eun. Friction and wear behaviors of bare and diamond-like carbon/chromium bilayer coated SKH51 steel at low temperatures // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 412. 127018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127018>
13. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
14. Бороненков В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. 268 с.
15. Архипов В.Е. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. М.: Красанд, 2017. 239 с.
16. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М.: Мир, 2004. 384 с.
17. Усольцев А.А., Кибко Н.В., Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Гусев А.И. Исследование качества металла, наплавленного порошковыми проволоками системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 1 (23). С. 4–9.
18. Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Ващук Е.С., Иванов Ю.Ф. Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78, № 10. С. 1266–1272. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367676514100093>
19. Патент 93019989/02 Российская Федерация. Порошковая проволока для получения покрытий; заявл. 14.04.1993; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 32. 3 с.
20. Патент 2040570 Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для газотермического напыления / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафеецкий Л.П., Цилен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.07.92; опубл. 25.07.95.
21. Патент 2042728 Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для газотермического напыления / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафеецкий Л.П., Цилен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.05.93; опубл. 27.08.95.
22. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
23. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алипина. М.: Машиностроение, 1978. кн. 1, 2. 400 с.
24. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Э.Д. Браун и др. Киев: Наукова думка, 1990. 264 с.
25. Каржавин В.В., Зимин А.И. Трение, износ, смазочные материалы: Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во РГПУ, 2003. 83 с.

26. Лужнов Ю.М., Калачев Ю.Н., Александров В.Д., Морщилов М.В. Анализ видов изнашивания рабочих поверхностей деталей: учебно-методическое пособие. М.: Изд-во МАДИ, 2018. 48 с.

Поступила в редакцию 22.12.2021

Поступила после рецензирования 17.03.2022

Принята к публикации 20.04.2022

Об авторах

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-4176-4771>, e-mail: uranhai@rambler.ru

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru

Для цитирования

Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г. Испытания на износ порошковых покрытий и исследования микрогеометрии поверхностей трения в условиях холода // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 305–315. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315

Wear testing of powder coatings and investigations of microgeometry of friction surfaces under cold conditions

N.F. Struchkov*, D.I. Lebedev, G.G. Vinokurov

V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia

*struchkov_n@rambler.ru

Abstract. Intensive operation of the machinery in the natural and climatic conditions of the North often leads to premature wear of the elements of its friction units. A start-up of the equipment at low temperatures brings repeated thermal expansions of already run-in elements of friction units and changes in their geometric dimensions. An increase in the viscosity of technical lubricants in cold weather also reduces the wear resistance of friction units. The decrease in the resource of working elements and parts of the running system of earth-moving and mining equipment in the North is also due to frozen soils in the permafrost zone. Therefore, the main task of tribology for the technology of the North is the study of friction units of machines and mechanisms operated in cold conditions. The low climatic temperatures effect on the wear processes of materials of friction units, including wear-resistant powder coatings is also a task. We carried out the wear tests of modified powder coatings, profilometric and thermophysical measurements of friction surfaces on a special low-temperature stand during winter in Yakutsk (below -40°C , December 2020, January and December 2021). We have revealed the regularities of establishing the operating temperature

of the friction unit «powder coating–steel counterbody» in the cold. We have also obtained the data of mass wear of coatings and steel counterbodies, roughness parameters of contact surfaces during their sliding friction at low climatic temperatures.

Keywords: wear tests, low climatic temperatures, wear-resistant coating, counterbody, sliding friction, wear, profile

Acknowledgements. *The authors are grateful to Konstantin Bolshev for the help in carrying out thermo-physical measurements.*

References

1. Ishlinskiy A.Yu., Belyy V.A. Razvitiye nauki o trenii i iznose v SSSR // Treniye i iznos. 1980. Vol. 1, No. 1. P. 7–12.
2. Yermolayev S.V., Boldayev A.P. Prognozirovaniye iznosa detaley tyazhelykh bul'dozerov // Kolyma. 1981. No. 2. P. 24–26.
3. Larionov V.P., Koval'chuk V.A. Khladostoykost' i iznos detaley mashin i svarynykh soyedineniy. Novosibirsk: Nauka, 1976. 206 p.
4. Cherskiy I.N. O kriteriyakh rabotosposobnosti i prognozirovaniya dolgovechnosti metallopolimernykh uzlov treniya // Treniye i iznos. 1980. Vol. 1, No. 6. P. 1021–1026.
5. Issledovaniye tribotekhnicheskikh sistem v usloviyakh kholodnogo klimata. Sbornik nauchnykh trudov. Yakutsk: Izd-vo YAF SO AN SSSR, 1985. 120 p.
6. Cherskiy I.N., Morov V.A. Prognozirovaniye dolgovechnosti i optimizatsiya podshipnikov i uplotneniy iz polimernykh i kompozitnykh materialov // Mekhanika kompozitnykh materialov. 1980. No. 6. P. 1094–1102.
7. Bogatin O.B., Morov V.A., Cherskiy I.N. Osnovy rascheta polimernykh uzlov treniya. Novosibirsk: Nauka, 1983. 213 p.
8. Pernebekov S.S., Balabekov Z.A., Asylbek G.U., Rakhimberdy B.K., Mankarayeva M.A. Analiz faktorov, opredelyayushchikh intensivnost' iznosa dvigatelya pri nizkikh temperaturakh // Molodoy uchenyy. 2017. No. 1(135). P. 76–77.
9. Andreyeva I.A., Khomich A.I. Plasticheskiye svoystva i iznos materialov pri nizkikh temperaturakh // Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики. 2014. Tekhnicheskkiye nauki. P. 5–6.
10. Gradt T., Schneider T., Hübner W., Börner H. Friction and wear at low temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 1998. Vol. 23, Iss. 5. P. 397–403. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00070-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00070-0)
11. Ma L., Shi L.B., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition // Wear. 2018. Vol. 394–395. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.10.011>
12. Khadem M., Kim Dae-Eun. Friction and wear behaviors of bare and diamond-like carbon/chromium bilayer coated SKH51 steel at low temperatures // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 412. 127018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127018>
13. Kudinov V.V., Pekshev P.YU., Belashchenko V.Ye., Solonenko O.P., Safullin V.A. Naneseniye pokrytiy plazmoy. M.: Nauka, 1990. 408 p.
14. Boronenkov V.N., Korobov Yu.S. Osnovy dugovoy metallizatsii. Fiziko-khimicheskiye zakonomernosti. Yekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2012. 268 p.
15. Arkhipov V.Ye. Gazodinamicheskoye napyleniye. Struktura i svoystva pokrytiy. M.: Krasand, 2017. 239 p.
16. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeyev V.I. Metody issledovaniya materialov: Struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytiy. M.: Mir, 2004. 384 p.
17. Usol'tsev A.A., Kibko N.V., Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Gusev A.I. Issledovaniye kachestva metalla, naplavlennogo poroshkovymi provolokami sistemy Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2018. No. 1 (23). P. 4–9.
18. Kapralov Ye.V., Raykov S.V., Budovskikh Ye.A., Gromov V.Ye., Vashchuk Ye.S., Ivanov YU.F. Strukturno-fazovyye sostoyaniya i svoystva pokrytiy, naplavlennykh na poverkhnost' stali poroshkovymi provolokami // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2014. Vol. 78, No. 10. P. 1266–1272. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367676514100093>
19. Patent 93019989/02 Rossiyskaya Federatsiya. Poroshkovaya provoloka dlya polucheniya pokrytiy; zayavl. 14.04.1993; opubl. 20.11.1995, Byul. No. 32. 3 p.
20. Patent 2040570 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya gazotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN; zayavl. 06.07.92; opubl. 25.07.95.
21. Patent 2042728 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya gazotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN; zayavl. 06.05.93; opubl. 27.08.95.
22. Kragel'skiy I.V., Dobyichin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na treniye i iznos. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 526 p.
23. Treniye, iznashivaniye i smazka: Spravochnik. V 2-kh kn. / Pod red. I.V. Kragel'skogo, V.V. Alisina. M.: Mashinostroyeniye, 1978. kn. 1, 2. 400 p.

ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

24. *Slovar'-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin* / V.D.Zozulya, Ye.L. Shvedkov, E.D. Braun i dr. Kiyev: Naukova dumka, 1990. 264 p.

25. *Karzhavin V. V., Zimin A. I. Treniye, iznos, smazochnyye materialy: Ucheb. Posobiye*. Yekaterinburg: Izd-vo RGPPU, 2003. 83 p.

26. *Luzhnov Yu.M., Kalachov Yu.N., Aleksandrov V.D., Morshchilov M.V. Analiz vidov iznashivaniya rabochikh poverkhnostey detaley: uchebno-metodicheskoye posobiye*. M.: Izd-vo MADI, 2018. 48 p.

Submitted 22.12.2021

Revised 17.03.2022

Accepted 20.04.2022

About the authors

STRUCHKOV, Nikolay Fedorovich, senior researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

LEBEDEV, Dmitriy Iosifovich, researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-4176-4771>, e-mail: uranhai@rambler.ru

VINOKUROV, Gennady Georgievich, leading researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru

For citation

Struchkov N.F., Lebedev D.I., Vinokurov G.G. Wear testing of powder coatings and investigations of microgeometry of friction surfaces under cold conditions // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 305–315. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315>

Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима

А.Ф. Федорова*, М.Л. Давыдова, Н.В. Шадрин, А.А. Борисова,
А.Л. Федоров, К.П. Антоев, А.Р. Халдеева, В.В. Павлова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

*faitalina@yandex.ru

Аннотация. Повышение надежности и долговечности уплотнительных устройств техники, эксплуатирующихся в условиях холодного климата, главным образом зависит от качества уплотнительного материала. Благодаря высокой эластичности, проявляющейся в широком температурном интервале, хорошей амортизационной способности и другим важным свойствам резины являются самыми распространенными материалами для уплотнительных устройств. Как правило, резиновые уплотнения работают в контакте с рабочими средами углеводородного происхождения, что приводит к резкому изменению их состава и свойств. В связи с этим целью работы являлось исследование совместного действия углеводородных сред и температур окружающей среды на свойства бутадиен-нитрильных резин. Образцы серийно выпускаемой резины марки 98-1 и резины РП-5, полученной по патенту РФ № 2719809, выдерживали в углеводородных средах (индустриальном гидравлическом масле марки И-20А и всесезонном универсальном полусинтетическом моторном масле Gazpromneft Diesel Premium 10W-40), где основным фактором являлась температура окружающей среды, и определяли их стойкость к углеводородным средам по изменению характерных показателей. Экспозицию образцов проводили в январе 2022 г. при следующих условиях: под постоянным влиянием температуры окружающей среды на климатическом полигоне, расположенном в г. Якутск; в помещении при температуре 20–23 °С и при циклическом изменении температуры с целью имитации эксплуатации уплотнений в узлах техники, эксплуатируемой на Крайнем Севере в условиях гаражного хранения. Установлено, что при комнатной температуре и в условиях циклического изменения температуры происходят наибольшие изменения характеристических показателей. Это связано с интенсивным протеканием диффузионных процессов при контакте резин с углеводородными средами. При натурной экспозиции под действием низких температур изменение свойств минимальны. По сравнению с серийно выпускаемой резиной 98-1 резина РП-5 проявила более высокий уровень сохранения основных показателей.

Ключевые слова: бутадиен-нитрильная резина, климатические испытания, вымывания пластификатора, морозостойкость резин

Благодарности. Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Введение

Материалы, предназначенные для применения в условиях Севера, должны проходить климатические испытания, определяющие влияние внешних факторов на их свойства как в лабораторном, так и в натурном варианте [1–3]. Определение способности резин и резиновых изделий сопротивляться воздействию естественных климатических факторов различных климатических районов (солнечного излучения, температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферных осадков, кислорода, озона и других)

проводится в соответствии с ГОСТ 9.066 «Метод испытаний на стойкость к старению при воздействии естественных климатических факторов». Сущность метода заключается в том, что образцы резин подвергают старению на климатических станциях в условиях данного климатического района в режимах, близких к эксплуатационным и определяют один или несколько характерных показателей. Однако данный ГОСТ не позволяет оценить работоспособность маслостойких резин, предназначенных для изготовления уплотнений, контактирующих с

углеводородными средами в широком интервале температур. При разработке рецептур резин уплотнительного назначения необходимо проводить натурные испытания под действием рабочих сред и температур окружающей среды, где процесс старения существенно отличается от старения в воздушной среде, что позволит более детально оценить работоспособность резин на их основе.

В связи с этим целью работы являлось исследование совместного действия углеводородных сред и температур окружающей среды, в том числе термоциклирования, на свойства резин из маслобензостойкого бутадиен-нитрильного каучука, основная область применения которого – уплотнения.

Методы и материалы исследования

Стойкость образцов к углеводородным средам определяли путем анализа изменения характерных показателей после выдержки в углеводородных средах в широком интервале температур при различных условиях экспозиции. В качестве характерных показателей рассмотрены степень набухания (ГОСТ 9.030-74), условная прочность при растяжении (ГОСТ 270-75), условное напряжение при заданном удлинении (ГОСТ 270-75), относительное удлинение при разрыве (ГОСТ 270-75), твердость по Шору А (ГОСТ 263-75), плотность (ГОСТ 267-73), коэффициент морозостойкости при растяжении (ГОСТ 408-78) и тем-

пература хрупкости (ГОСТ 7912-74). Продолжительность экспозиции составляла 4 недели, периодичность определения значений характерных показателей – 7 дней.

Экспонирование образцов в среде масел проводили при следующих условиях:

«Помещение». Образцы выдерживались при температуре 20–23 °С;

«Улица – Помещение» (термоциклирование). Образцы ежедневно утром выносились на улицу и вечером заносятся обратно в помещение. Продолжительность выдержки на улице – 8 ч (с 9:00 до 17:00). Основной целью данного режима является имитация температурного условия эксплуатации уплотнений в рабочих узлах техники, применяемой на Крайнем Севере в условиях гаражного хранения, т. е. утром – выезд техники из гаража, вечером – заезд обратно в гараж;

«Улица». Образцы выдерживались при низких температурах под постоянным влиянием температуры окружающей среды на климатическом полигоне, расположенном в г. Якутск.

Экспонирование образцов резин проводилось с 11 января по 8 февраля 2022 г. Температурные условия экспонирования образцов представлены на рис. 1. За период проведения эксперимента минимальная наружная температура окружающей среды составила –41 °С.

В качестве углеводородных сред выбраны наиболее распространенные рабочие среды, предназначенные для применения в узлах и механиз-

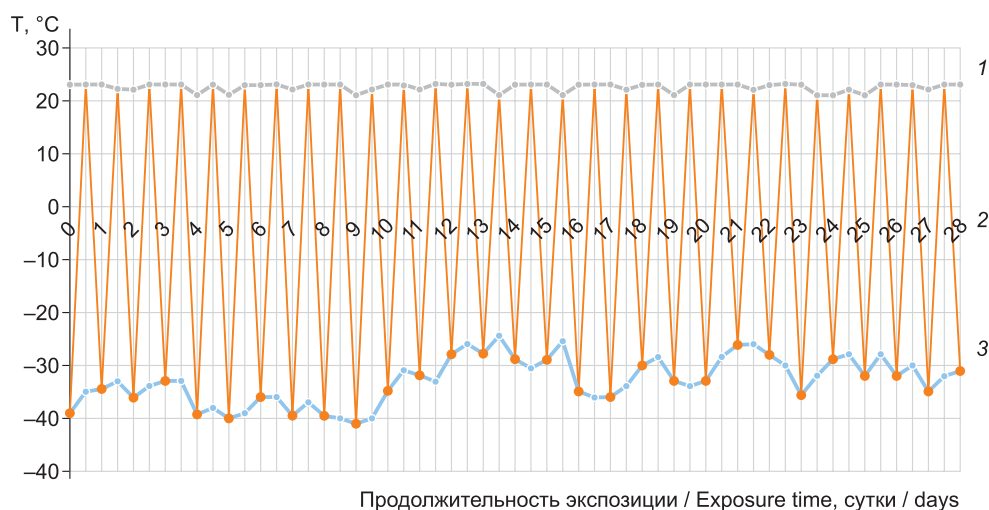


Рис. 1. Изменение температуры окружающей среды при разных условиях экспонирования образцов: 1 – «Помещение», 2 – «Термоциклирование», 3 – «Улица».

Fig. 1. Change in ambient temperature under different conditions of exposure of samples: 1 – «Indoors», 2 – «Thermal cycling», 3 – «Outdoors».

мах техники в условиях низких температур: индустриальное гидравлическое масло марки И-20А (ГОСТ 20799-88, производство ООО «ЛЛК-Интернешнл»), которое представляет собой очищенное дистиллятное или остаточное базовое масло либо их смесь без присадок, и всесезонное универсальное полусинтетическое моторное масло Gazpromneft Diesel Premium 10W-40 (СТО 84035624-061-2012, производство ООО «Газпромнефть-СМ») для смешанного транспортного парка.

В качестве объектов исследования выбраны следующие резины на основе морозостойкого бутадиен-нитрильного каучука с низким содержанием акрилонитрила (17–21 %) [4]:

1) РП-5 – резиновая смесь на основе бутадиен-нитрильного каучука БНКС-18АМН и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), включающая технический углерод марки N550, дибутилсебацат, оксид цинка, 6PPD, 4010, антиоксидант D, стеариновую кислоту, альтакс, CZ, дикумилпероксид и серу (патент РФ на изобретение №2719809) [5];

2) 98-1 НТА – резиновая смесь на основе бутадиен-нитрильного каучука СКН-18 производства ООО «СК-Полимеры» (г. Красноярск), предназначенная для изготовления РТИ для авиационной техники, работоспособная в среде масел при температурах от –60 до +150 °С (ТУ 38.005.1166-98).

Таблица 1

Физико-механические свойства резин РП-5 и 98-1

Table 1

Physical and mechanical properties of RP-5 and 98-1 rubbers

Показатель Property	РП-5 RP-5	98-1 98-1
f_p , МПа	11,4	5,6
f_{100} , МПа	3,3	2,1
ε_p , %	326	249
ρ , г/см ³	1,181	1,146
H, у.е.	59	46

Примечание. f_p – условная прочность при растяжении, f_{100} – условное напряжение при 100%-м удлинении, ε_p – относительное удлинение при разрыве, ρ – плотность; H – твердость по Шору А.

Note. f_p – conventional strength at tension, f_{100} – conventional stress at 100% elongation, ε_p – percent elongation at failure, ρ – density; H – Shore A hardness.

Физико-механические свойства резин РП-5 и 98-1 представлены в табл.1.

Изменение показателей физико-механических свойств (ΔS) после экспонирования рассчитывали по формуле

$$\Delta S = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \cdot 100,$$

где A_0 – значение показателя до экспозиции, A_1 – значение показателя после экспозиции.

Изменение твердости (ΔH) вычисляли по формуле

$$\Delta H = H_1 - H_0,$$

где H_0 – твердость до экспозиции, H_1 – твердость после экспозиции.

Результаты исследований и их обсуждение

Динамика изменения физико-механических свойств, плотности и твердости резин РП-5 и 98-1 при разных условиях экспонирования в среде моторного масла 10W-40 и гидравлического масла И-20А представлены в табл. 2 и 3 соответственно.

Обнаружено, что изменение показателей материалов в большей степени зависит от условий экспонирования, чем от типа рабочих сред. Максимальные изменения условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и твердости в обеих средах наблюдаются в условиях выдержки в помещении и при термоциклировании. При экспонировании образцов в режиме «Улица» в условиях низких температур изменения свойств резин минимальны.

Сравнение динамики изменения показателей исследованных резин показало, что серийная резина 98-1 больше подвержена изменению свойств по сравнению с резиной РП-5. После 28 суток экспонирования резины 98-1 в помещении в маслах 10W-40 и И20-А прочность повышается на 47,4 и 52,4 % соответственно, а при циклическом изменении температур – на 45,5 и 35,4 %, что на 18,7–35,4 % больше, чем у резины РП-5. Высокий уровень сохранения свойств резины РП-5 при одновременном воздействии углеводородных сред и температуры окружающей среды может быть связан с образованием более плотной пространственной структуры вследствие использования комбинированной вулканизующей группы, содержащей серу и дикумил пероксид. При использовании комбинированной вулканизующей системы одновременно протекают два разных механизма вулканизации. Помимо сшивания резины по неопределенным двойным связям через образо-

вание серных «мостиков», происходит сшивка путем формирования С–С-связей, путем образования свободных радикалов, появляющихся при распаде пероксида [4]. Кроме того, замедление процесса старения резины РП-5 может быть связано с содержанием в составе резины полимерного наполнителя СВМПЭ, который содержит меньшее количество ненасыщенных связей по сравнению с каучуком. Известно, что наличие двойных связей в макромолекулах БНКС является причиной протекания термоокислительных процессов резины на его основе [6–8]. Из всех показателей резины РП-5 максимальному изменению (20 %) подвергается условная прочность при растяжении в условиях экспозиции в режиме «Улица – помещение» в среде масла 10W-40.

Вследствие менее плотной пространственной структуры, обуславливающей более интенсивное протекание диффузионных процессов, плотность резин 98-1 также сильнее подвергается изменениям.

Известно [9, 10], что при взаимодействии резин и углеводородных сред протекает ряд одновременно идущих процессов: сорбция среды поверхностью и объемом резины, диффузия среды через резину и экстракция из резины растворимых средой ингредиентов. При взаимодействии исследованных резин с маслами, как с моторным, так и с гидравлическим, происходит уменьшение массы образцов, что связано с преобладанием процесса вымывания пластификаторов из резиновой матрицы. На рис. 2 видно, что потеря в

Таблица 2

**Изменение физико-механических свойств резин
после выдержки в моторном масле 10W-40**

Table 2

**Changes in the physical and mechanical properties of rubbers
after exposure in engine oil 10W-40**

Показатель Indicator	Продолж-ть экспонирования, сутки Duration of exposure	Режим экспонирования Exposure mode					
		Помещение Indoors		Улица-помещение Outdoors-indoors		Улица Outdoors	
		РП-5	98-1	РП-5	98-1	РП-5	98-1
Δf_p , %	7	+11,2	+37,6	+7,6	+20,3	+7,4	+10,3
	14	+17,7	+29,0	+12,7	+19,3	+2,5	+20,4
	21	+17,5	+44,7	+20,0	+41,4	+1,6	+19,1
	28	+17,7	+47,4	+20,0	+45,5	+1,1	+13,8
Δf_{100} , %	7	–6,7	+2,8	–6,4	–8,7	–12,3	–5,7
	14	+1,7	+5,3	–4,2	+15,7	–10,8	–4,0
	21	+2,8	+5,0	+4,8	+13,2	–14,8	–19,3
	28	+1,7	+6,0	–0,2	+15,2	–14,4	–8,3
$\Delta \epsilon_p$, %	7	+15,1	+35,3	+9,6	+30,4	+11,6	+19,7
	14	+14,2	+24,6	+10,9	–3,8	+9,2	+24,3
	21	+9,7	+45,9	+11,4	+30,3	+7,4	+24,2
	28	+11,8	+42,1	+10,4	+43,0	+6,0	+20,7
Δp , %	7	+1,3	+2,6	+1,3	+2,0	+0,9	+1,0
	14	+1,8	+2,9	+1,7	+2,8	+0,4	+0,8
	21	+2,1	+4,2	+1,5	+2,9	+0,4	+0,3
	28	+1,5	+3,9	+1,8	+3,3	+0,4	+0,6
ΔH , усл. ед.	7	+1	+7	+1	+3	+1	+2
	14	+5	+6	+3	+5	0	+2
	21	+7	+9	+6	+9	1	+1
	28	+6	+8	+6	+6	2	+2

Изменение физико-механических свойств резин после выдержки в масле И-20А

Table 3

Changes in the physical and mechanical properties of rubbers after exposure in oil I-20A

Показатель Indicator	Продолж-ть экспонирования, сутки Duration of exposure,	Режим экспонирования Exposure mode					
		Помещение Indoors		Улица-помещение Outdoors-indoors		Улица Outdoors	
		РП-5	98-1	РП-5	98-1	РП-5	98-1
$\Delta f_p, \%$	7	+8,1	+35,1	+8,8	+8,7	+4,9	+22,1
	14	+14,6	+40,0	+15,5	+26,3	+2,5	+11,8
	21	+17,6	+49,3	+19,0	+49,0	+3,7	+9,5
	28	+17,0	+52,4	+16,7	+35,4	-3,1	+7,7
$\Delta f_{100}, \%$	7	-7,0	-6,8	-3,9	+2,7	-10,9	-9,2
	14	+0,9	+0,6	+1,3	-3,5	-2,6	+2,6
	21	-3,7	-4,2	+1,8	-5,9	-10,6	-4,1
	28	-2,7	+6,8	-0,2	+9,0	-6,1	-11,1
$\Delta \epsilon_p, \%$	7	+10,3	+51,8	+9,3	+14,2	+10,1	+22,1
	14	+11,2	+46,4	+9,5	+36,4	+2,6	+12,2
	21	+15,9	+52,0	+12,8	+54,8	+7,4	+16,6
	28	+13,5	+46,5	+11,5	+33,2	-0,7	+17,1
$\Delta \rho, \%$	7	+1,4	+2,3	+1,3	+1,8	+0,7	+1,0
	14	+1,7	+3,1	+1,5	+2,6	+0,5	+0,6
	21	+1,6	+3,4	+1,1	+2,5	+0,5	+0,8
	28	+1,4	+3,3	+1,5	+2,9	+0,5	+0,6
$\Delta H, \text{ усл. ед.}$	7	+3	+6	+3	+7	+1	+4
	14	+4	+4	+2	+4	+1	0
	21	+5	+8	+6	+6	+1	+3
	28	+6	+9	+6	+6	+2	+3

массе при выдержке в среде моторного и гидравлического масел у резины РП-5 по сравнению с серийной резиной 98-1 существенно меньше. Особенно отчетливо это заметно при выдержке в данных средах в помещении. При термоциклировании разница в маслостойкости проявляется менее существенно, а при низких температурах, когда замедляются диффузионные процессы, практически незаметна.

Анализ полученных результатов показывает, что существенным недостатком влияния углеводородных сред является вымывание ингредиентов, особенно пластификатора, отвечающего за морозостойкость резин, что также было обнаружено в работах [11–15]. Для оценки потери морозостойкости определены коэффициент морозостойкости (K_m) резин при -45°C до и после экспонирования, а также динамика изменения

температуры хрупкости (T_{xp}). T_{xp} является одним из показателей, характеризующих морозостойкость материала, и показывает температуру, при которой полимер разрушается в момент достижения предела вынужденной эластичности [16].

На рис. 3 видно, что при экспонировании в помещении и в условиях термоциклирования, когда наблюдалось наибольшее уменьшение массы образцов, K_m при растяжении существенно уменьшается. K_m резины РП-5 как до, так и после выдержки в обоих маслах имеет более высокие значения по сравнению с резиной 98-1. K_m серийной резины 98-1, выдержанной в помещении, уменьшается на 97,0–97,5 %, в условиях термоциклирования – на 95,2–94,8 %, в условиях низких температур – на 24,9–34,6 %. K_m резины РП-5, выдержанной в помещении, уменьшается на 82,4–83,9 %, в условиях термоцикли-

рования – на 75,1–77,7 %, в условиях низких температур – на 21,3–24,9 %.

Динамика изменения T_{xp} резин в процессе экспонирования в маслах при разных условиях представлена на рис. 4. Значение T_{xp} резины РП-5 до начала экспозиции в маслах на 7 градусов выше по сравнению с резиной 98-1 и составляет -54°C . Скорее всего это объясняется особенностями механизма разрушения резины РП-5, в состав которой входит СВМПЭ. При ударном воздействии, путем которого определяется T_{xp} , происходит разрушение по межфазной границе каучука и СВМПЭ. Поэтому T_{xp} у резины РП-5 определяется не только температурой стеклования каучука, но и структурными особенностями межфазной границы между резиной и СВМПЭ.

Видно, что при экспонировании образцов резин в помещении и в условиях термоциклирования T_{xp} резин изменяется значительно, чем T_{xp} образцов, экспонированных на улице при низких температурах, что коррелирует с динамикой уменьшения объема резин. При экспонировании в помещении максимальное повышение T_{xp} (на 16 градусов) зафиксировано у резины 98-1 в среде масла И20-А, в условиях термоциклирования – на 13 градусов также у резины 98-1 в среде масла И20-А. При действии отрицательных температур окружающей среды, вследствие замедления протекания диффузионных процессов, температура хрупкости после 4 недель экспозиции меняется незначительно, у резины 98-1 наблюдается повышение T_{xp} на 4 градуса в обеих средах, у резины РП-5 – на 1 градус в среде И20-А и не изменяется в среде 10W-40.

Заключение

Сравнение результатов изменения свойств после экспонирования резин в моторном и гидравлическом маслах при различных температурных режимах показывает, что при комнатной температуре и в условиях циклического изменения температуры, имитирующих эксплуатацию уплотнений в узлах техники, используемой на Крайнем Севере в условиях гаражного хранения, происходят наибольшие изменения характерных показателей. Это связано с интенсивным протеканием диффузионных процессов при контакте резин с углеводородными средами.

В условиях воздействия углеводородной среды при разных температурных режимах экспонирования резина РП-5, полученная по патенту РФ № 2719809, по сравнению с серийно выпуска-

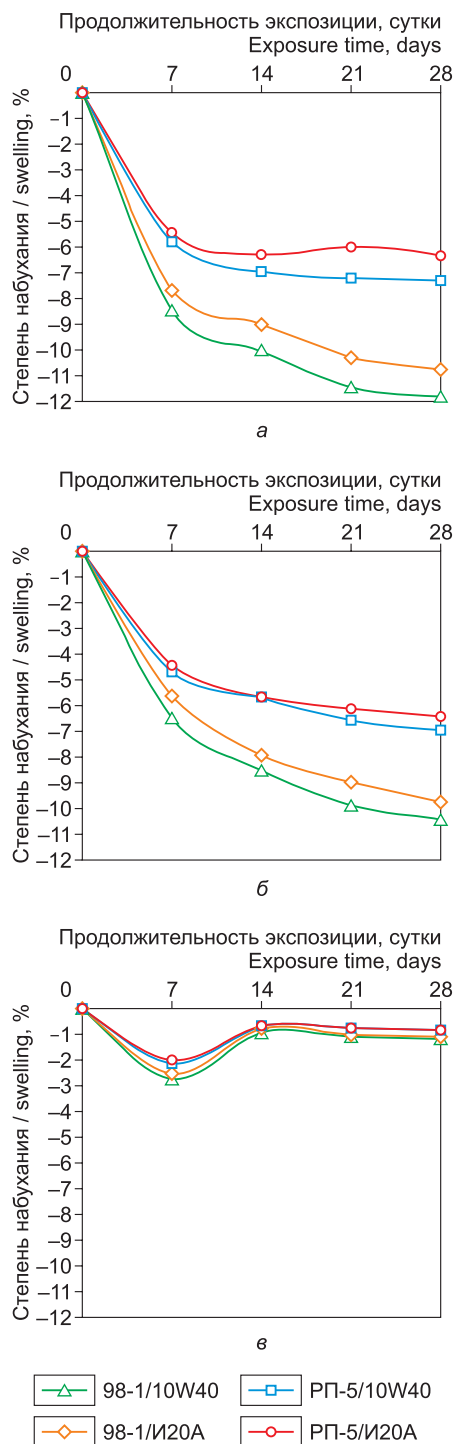


Рис. 2. Кинетика набухания резин в маслах в условиях выдержки резин в помещении (а), термоциклирования (б), на улице (в).

Fig. 2. Kinetics of rubber swelling in oils under conditions of rubber exposure (a) indoors, (b) thermal cycling and (c) outdoors.

емой резиной 98-1, проявила более высокий уровень сохранения основных физико-механических показателей и низкотемпературных свойств.

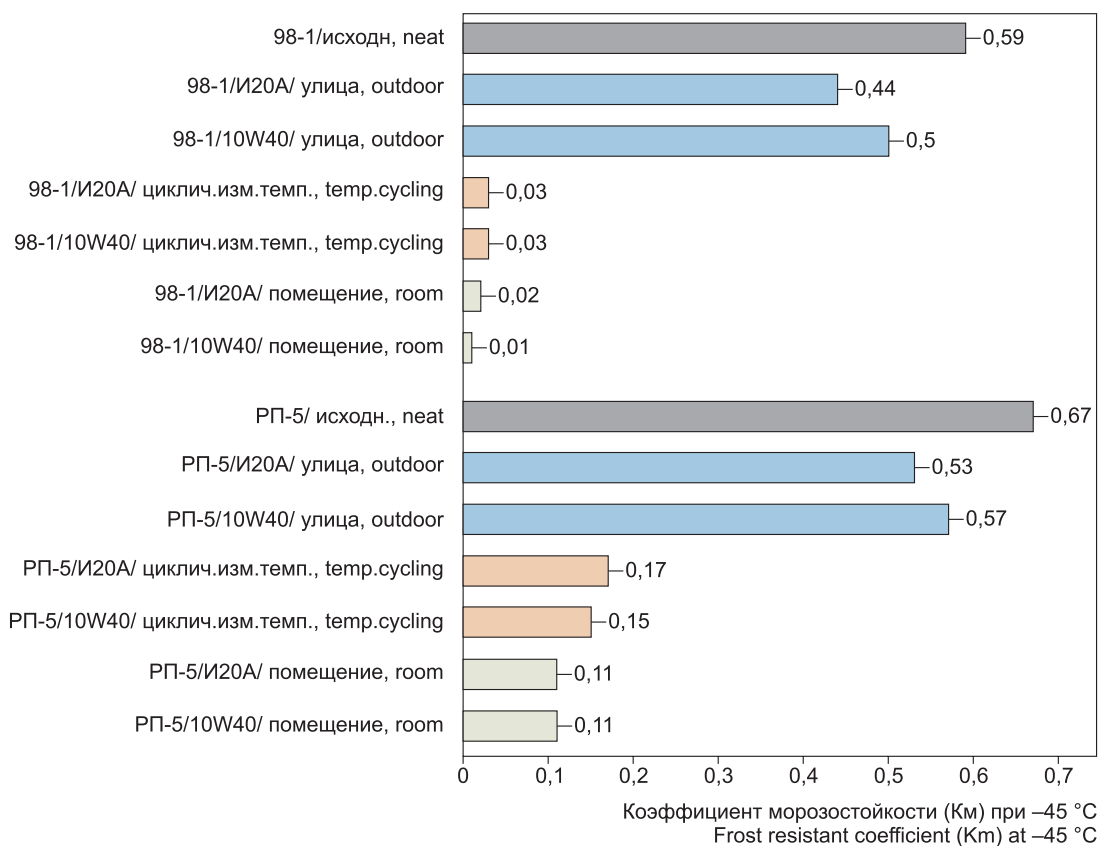


Рис. 3. Коэффициент морозостойкости резин при -45 °C.

Fig. 3. Coefficient of rubbers frost resistance at -45 °C.

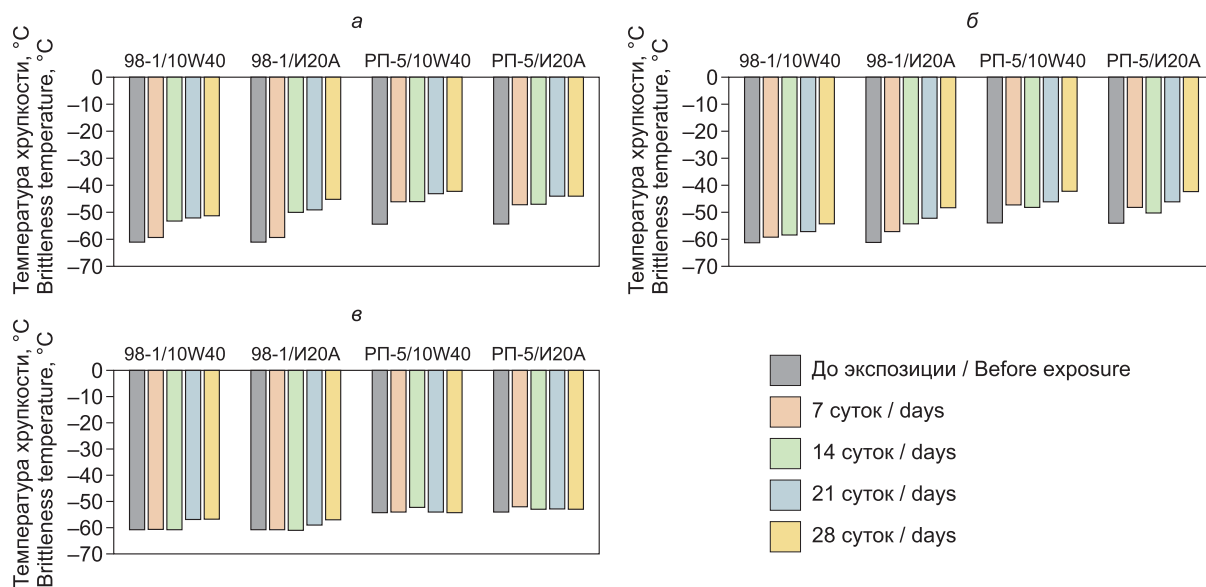


Рис. 4. Изменение температуры хрупкости резин при экспонировании в маслах в помещении (а), термоциклирования (б), на улице (в).

Fig. 4. Change in the temperature of the brittleness of rubbers when exposed in oils indoors (a), under thermal cycling conditions (б) and outdoors (в).

Литература

1. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1 (11). С. 98–107.
2. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // Вестник Российской академии наук. 2017. № 9 (87). С. 827–839.
3. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2(51). С. 47–58.
4. Корнев А.Е., Буканов А.М., Швердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: НППА «Истек», 2009. 504 с.
5. Шадрин Н.В., Борисова А.А., Халдеева А.Р., Павлова В.В., Антоев К.П., Соколова М.Д. Маслостойкая морозостойкая резиновая смесь с повышенной термостойкостью. Патент РФ 2719809, бюл. № 12 от 23.04.2020.
6. Shadrinov N.V., Borisova A.A. Thermophysical and Dynamic Properties of Nitrile Butadiene Rubber Filled with Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // Inorganic Materials. Applied Research. 2021. Vol. 12. P. 1112–1119. <https://doi.org/10.1134/S2075113321040389>
7. Вольфсон С.И., Охотина Н.А., Нигматуллин А.И., Сабиров Р.К. Исследование упруго-гистерезисных характеристик динамических термоэластопластов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 11 С. 100–101.
8. Заикин А.Е., Бобров Г.Б. Влияние содержания акрилонитрила в бутадиен-нитрильном каучуке на свойства динамических термоэластопластов на его основе // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 16. С. 105–109.
3. Зув Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. М.: Химия, 1972. 232 с.
10. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов. М.: Химия, 1974. 270 с.
11. Федорова А.Ф. Влияние низких температур и нефтяной среды на свойства морозостойких уплотнительных резин: дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2003. 169 с.
12. Петрова Н.Н., Попова А.Ф., Федотова Е.С. Исследование влияния низких температур и углеводородных сред на свойства резин на основе пропиленоксидного и бутадиеннитрильного каучуков // Каучук и резина. 2002. № 3. С. 6–9.
13. Khalaf A.I., Yehia Abbas., Ismail M.N. et al. High performance oil resistant rubber // Kaut gummi kuns rubberpoint. 2013. Vol. 66, No. 9. P. 28–32.
14. Zielinska M., Seyger R., Dierrkes W.K. et al. Swelling of EPDM rubbers for oil-well applications as influenced by medium composition and temperature. Part I. Literature and theoretical background // Elastomery. 2016. Vol. 20, No. 2. P. 6–17.
15. Fedorova A.F., Davydova M.L., Sokolova M.D., Pavlova V.V. Influence of phenolic antioxidants on strength of butadiene-nitrile rubbers during natural exposure // Polymer Science, Series D. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 312–317.
16. Резниченко С.В., Морозов Ю.Л. Большой справочник резинщика. Ч. 2. Резины и резинотехнические изделия. М.: ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2012. 648 с.

Поступила в редакцию 19.04.2022

Поступила после рецензирования 12.05.2022

Принята к публикации 17.05.2022

Об авторах

ФЕДОРОВА Айталиа Федоровна, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20, Россия, Researcher ID F-8834-2017, <http://orcid.org/0000-0001-6763-5746>, e-mail: faitalina@yandex.ru

ДАВЫДОВА Мария Ларионовна, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20, Россия, Researcher ID A-5434-2014, <http://orcid.org/0000-0003-2252-2515>, e-mail: davmlar@mail.ru

ШАДРИНОВ Николай Викторович, ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20, Россия, Researcher ID A-6417-2014, <http://orcid.org/0000-0002-2694-9615>, e-mail: nshadrinov@gmail.com

БОРИСОВА Александра Афанасьевна, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,

Researcher ID A-5802-2014, <http://orcid.org/0000-0001-7564-4407>, e-mail: karax@mail.ru

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,

Researcher ID A-5442-2014, <http://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, e-mail: gervirb@mail.ru

АНТОЕВ Карл Петрович, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,

Researcher ID AAS-1395-2020, <http://orcid.org/0000-0001-7988-3480>, e-mail: antoevkr@mail.ru

ХАЛДЕЕВА Анна Романовна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,

Researcher ID F-3304-2017, <http://orcid.org/0000-0001-5639-3817>, e-mail: haldeeva-anna@mail.ru

ПАВЛОВА Валерия Валериевна, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение Российской академии наук, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,

Researcher ID-G-1242-2017, <http://orcid.org/0000-0001-5380-5186>, e-mail: pavvaleriya@mail.ru

Для цитирования

Федорова А.Ф., Давыдова М.Л., Шадрин Н.В., Борисова А.А., Федоров А.Л., Антоев К.П., Халдеева А.Р., Павлова В.В. Исследование изменения свойств уплотнительных резин в условиях воздействия углеводородной среды и температурного режима // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 316–326. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326

Investigation of changes in the properties of sealing rubbers under the influence of a hydrocarbon environment and temperature conditions

A.F. Fedorova*, M.L. Davydova, N.V. Shadrinov, A.A. Borisova, A.L. Fedorov,
K.P. Antoev, A.R. Haldeeva, V.V. Pavlova

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

**faitalina@yandex.ru*

Abstract. Increasing the reliability and durability of sealing devices operating in cold climates mainly depends on the quality of the sealing material. Rubbers are the most common materials for sealing devices due to their high elasticity, which manifests itself in a wide temperature range, good damping ability and other important properties. As a rule, rubber seals work in contact with working hydrocarbon media, which leads to a sharp change in their composition and properties. The aim of the work was to study the combined effect of hydrocarbon media and ambient temperatures on the properties of butadiene-nitrile rubbers. Samples of commercially available rubber 98-1 and rubber RP-5, obtained under RF patent No. 2719809, were kept in hydrocarbon media (industrial hydraulic oil grade I-20A and all-season universal semi-synthetic motor oil Gazpromneft Diesel Premium 10W-40), where the main factor was the ambient temperature. We determined their resistance to hydrocarbon environments by changing characteristic indicators. The exposure of the samples was carried out in January 2022 under the following conditions: under the constant influence of ambient temperature at the climatic test site located in Yakutsk; indoors at a temperature of 20–23 °C and with a cyclic change in temperature in order to simulate the operation of seals in the units of equipment operated in the Far North in garage storage conditions. It has been established that the greatest change in indicators occurs at indoors temperature and under conditions of cyclic temperature changes.

The change is associated with intense diffusion processes when rubber comes into contact with hydrocarbon media. At low-temperature exposure, the change in properties is minimal. The RP-5 rubber showed a higher level of preservation of the main indicators compared to the mass-produced rubber 98-1.

Keywords: butadiene-nitrile rubber, climatic tests, washing out plasticizers, frost resistance of rubber

Acknowledgements. The research was carried out using shared core facilities of the Federal Research Center Yakutsk Science Centre SB RAS.

References

1. Buznik V.M., Vasilevich N.I. Materialy' dlya osvoeniya arkticheskikh territorij - vy'zovy' i resheniya // Laboratoriya i proizvodstvo. 2020. No. 1 (11). P. 98–107.
2. Buznik V.M., Kablov E.N. Sostoyanie i perspektivy' arkticheskogo materialovedeniya // Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2017. No. 9 (87). P. 827–839.
3. Kablov E.N., Starcev V.O. Sistemny'j analiz vliyaniya klimata na mexanicheskie svojstva polimerny'x kompozicionny'x materialov po dannym otechestvenny'x i zarubezhny'x istochnikov (obzor) // Aviacionny'e materialy' i tekhnologii. 2018. No. 2(51). P. 47–58.
4. Kornev A.E., Bukanov A.M., Sheverdyayev O.N. Tekhnologiya e'lastomerny'x materialov. Uchebnik dlya vuzov. Izd. 3-e, pererab. i dop. M.: NPPA «Istek», 2009. 504 p.
5. Shadrinov N.V., Borisova A.A., Xaldeeva A.R., Pavlova V.V., Antoev K.P., Sokolova M.D. Maslobenzos-tojkaya morozostojkaya rezinovaya smes' s povys'hennoj termostojkost'yu. Patent RF 2719809, byul. No 12 ot 23.04.2020
6. Shadrinov N.V., Borisova A.A. Thermophysical and Dynamic Properties of Nitrile Butadiene Rubber Filled with Ultra-High Molecular Weight Polyethylene // Inorganic Materials. Applied Research. 2021. Vol. 12. P. 1112–1119. <https://doi.org/10.1134/S2075113321040389>
7. Vol'fon C.I., Oxotina N.A., Nigmatullina A.I., Sabirov R.K. Issledovanie uprugo-gistereznys'x xarakteristik dinamicheskix termoe'lastoplastov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012. Vol. 15, No. 11. P. 100–101.
8. Zaikin A.E., Bobrov G.B. Vliyanie sodержaniya akrilonitrila v butadien-nitril'nom kauchuke na svojstva dinamicheskix termoe'lastoplastov na ego osnove // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2014. Vol. 17, No. 16. P. 105–109.
9. Zuev Yu.P. Razrushenie polimerov pod dejstviem agressivny'x sred. M.: Ximiya, 1972. 232 p.
10. Rejtlinger P.A. Proniczaemost' polimerny'x materialov. M.: Ximiya, 1974. 270 p.
11. Fedorova A.F. Vliyanie nizkix temperatur i neftyanoy sredy' na svojstva morozostojkix uplotnitel'ny'x rezin: diP. ... kand. texn. nauk. Yakutsk, 2003. 169 p.
12. Petrova N.N., Popova A.F., Fedotova E.P. Issledovanie vliyaniya nizkix temperatur i uglevodorodny'x sred na svojstva rezin na osnove propilenoksidnogo i butadiennitril'nogo kauchukov // Kauchuk i rezina. 2002. No. 3. P. 6–9.
13. Khalaf A.I., Yehia Abbas, Ismail M.N. et al. High performance oil resistant rubber // Kaut gummi kuns rubberpoint. 2013. Vol. 66, No. 9. P. 28–32.
14. Zielinska M., Seyger R., Dierckes W.K. et al. Swelling of EPDM rubbers for oil-well applications as influenced by medium composition and temperature. Part I. Literature and theoretical background // Elastomery. 2016. Vol. 20, No. 2. P. 6–17.
15. Fedorova A.F., Davydova M.L., Sokolova M.D., Pavlova V.V. Influence of phenolic antioxidants on strength of butadiene-nitrile rubbers during natural exposure // Polymer Science, Series D. 2021. Vol. 14, No. 2. P. 312–317.
16. Reznichenko P.V., Morozov Yu.L. Bol'shoj spravochnik rezinshhika. Ch.2. Reziny' i rezinotexnicheskie izdeliya. M.: OOO «Izdatel'skij centr «Texinform» MAI», 2012. 648 p.

Submitted 19.04.2022

Revised 12.05.2022

Accepted 17.05.2022

About the authors

FEDOROVA, Aitalina Fedorovna, leading researcher, Cand Sci. (Eng.), Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Researcher ID F-8834-2017, <http://orcid.org/0000-0001-6763-5746>. e-mail: faitalina@yandex.ru

DAVYDOVA, Maria Larionovna, leading researcher, Cand Sci. (Eng.), Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Researcher ID A-5434-2014, <http://orcid.org/0000-0003-2252-2515>. e-mail: davmlar@mail.ru

SHADRINOV, Nikolay Viktorovich, leading researcher, Cand Sci. (Eng.), Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, WOS Researcher ID A-6417-2014. <http://orcid.org/0000-0002-2694-9615>. e-mail: nshadrinov@gmail.com

BORISOVA, Aleksandra Afanasyevna, senior researcher, Cand Sci. (Eng.), Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Researcher ID A-5802-2014. <http://orcid.org/0000-0001-7564-4407>. e-mail: xarax@mail.ru

FEDOROV, Andrey Leonodovich, senior researcher, Cand Sci. (Eng.), Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Researcher ID A-5442-2014. <http://orcid.org/0000-0002-1718-2643>. e-mail: gervirb@mail.ru

ANTOEV, Karl Petrovich, junior researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Research ID- AAS-1395-2020. ORCID - 0000-0001-7988-3480. e-mail: antoevvp@mail.ru

HALDEEVA, Anna Romanovna, junior researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Research ID-F-3304-2017. ORCID - 0000-0001-5639-3817. e-mail: haldeeva-anna@mail.ru

PAVLOVA, Valeriya Valeriyevna, junior researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Avtodorojnaya st., Yakutsk 677007, Russia, Research ID-G-1242-2017. ORCID - 0000-0001-5380-5186. e-mail: pavvaleriya@mail.ru

For citation

Fedorova A.F., Davydova M.L., Shadrinov N.V., Borisova A.A., Fedorov A.L., Antoev K.P., Haldeeva A.R., Pavlova V.V. Investigation of changes in the properties of sealing rubbers under the influence of a hydrocarbon environment and temperature conditions // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 316–326. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-316-326>

ПАМЯТЬ

Филиппов Василий Васильевич (01.04.1951–31.05.2022)

31 мая 2022 года на 72-м году жизни скоропостижно скончался Президент Академии наук Республики Саха (Якутия), Почетный работник высшего образования Российской Федерации, лауреат Государственной премии Республики Саха (Якутия) им. М.К. Аммосова в области государственного строительства, Заслуженный деятель науки Республики Саха (Якутия), доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, главный редактор журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики» Филиппов Василий Васильевич.

В.В. Филиппов – выдающийся представитель якутского народа, внесший большой вклад в развитие науки, образования и культуры страны. Родился 1 апреля 1951 года в селе Мытах Горного района Якутии. В 1968 году он поступил в Якутский государственный университет (ЯГУ) на строительное отделение инженерно-технического факультета (ИТФ). С 3-го курса его как исключительно способного студента перевели в самый передовой в этой области Московский строительный институт (МИСИ) им. В.В. Куйбышева. Он доказал, что это было закономерно – после окончания обучения в 1973 году, а затем аспирантуры МИСИ он в 1978 году блестяще защитил кандидатскую диссертацию. В Якутский государственный университет Василия Васильевича приняли в 1973 году на должность лаборанта, а уже в 1989 году он стал деканом ИТФ. В 1991 году, в возрасте 40 лет, он защитил докторскую диссертацию и был избран ректором Якутского госуниверситета. Под руководством ректора В.В. Филиппова 1991–1998 годы стали периодом мощного развития ЯГУ: строились новые корпуса, жилые дома, лаборатории университета оснащались самым современным оборудованием, многократно вырос корпус докторов наук, развивалось теснейшее взаимодействие с академическими институтами и крупными промышленными предприятиями. Якутский госуниверситет вошел в число 15 лучших вузов России. В.В. Филиппов был избран членом Президиума ректоров России.

Основное направление научных исследований В.В. Филиппова – совершенствование методов



оценки надежности и долговечности металлических конструкций производственных зданий и инженерных сооружений, эксплуатирующихся в экстремальных природных условиях Якутии. Работая в Якутском государственном университете, он организовал лабораторию надежности стальных конструкций, создал научную школу по обоснованию безопасности применения металлических конструкций в агрессивных средах. В 1992 году ему было присвоено звание профессора, а в 1997 году он был избран членом-корреспондентом Российской академии наук. Им опубликовано более 150 научных работ, включая восемь монографий. В.В. Филиппов соавтор первого всероссийского трехтомного учебника по стальным конструкциям для студентов строительных вузов. Под его руководством защищены 14 кандидатских диссертаций, он был научным консультантом докторских диссертаций. Результаты его научных исследований включены в нормативные документы и внедрены в горнодобывающих и энергетических предприятиях Якутии.

В 1994 году В.В. Филиппов стал первым президентом Академии наук Республики Саха (Якутия). С перерывами, он 15 лет возглавлял работу

ПАМЯТЬ

одной из четырех национальных академий страны, внес неоценимый вклад в ее становление и развитие. Деятельность Академии наук РС(Я) способствовала созданию и развитию не только академических учреждений, входящих в ее состав, но и подразделений Якутского научного центра СО РАН, отраслевой и вузовской науки, развитию приоритетных направлений региональных научных исследований. За последние годы под его мудрым и энергичным руководством Академия наук РС(Я) достигла значительных успехов в организации и первых шагах становления Научно-образовательного центра мирового уровня «Север: территория устойчивого развития», в реализации второго этапа Программы комплексных научных исследований Якутии. У него были грандиозные планы по дальнейшему становлению и развитию родной Академии – высшего научного учреждения Республики Саха (Якутия).

Значителен вклад В.В. Филиппова в формирование государственной региональной политики в качестве председателя Палаты Республики Государственного собрания (Ил Тумэн) Республики Саха (Якутия) (1998–2003 гг.). В эти годы он сосредоточил свою деятельность на оценке социально-экономической ситуации в республике, на состоянии и развитии базовых отраслей на-

родного хозяйства, социальной сферы, на контроле исполнения законов. Им были установлены прямые контакты с парламентами ряда субъектов Российской Федерации, включая Башкортостан, Татарстан, Москву, Бурятию, Иркутскую область. Он продолжил укреплять эти связи в последние годы в качестве члена Совета по региональной политике РАН. Деятельность В.В. Филиппова способствовала укреплению авторитета Государственного собрания (Ил Тумэн) как в Якутии, так и за ее пределами.

Научная и вузовская общественность Республики Саха (Якутия), Академия наук РС(Я) понесли огромную, невосполнимую утрату. Василий Васильевич оставил о себе светлую память как о талантливом ученом, крупном организаторе науки и высшего образования, видном государственном деятеле, сильной личности и патриоте, полном планов и предложений по сохранению и развитию научного потенциала республики, по усилению региональной политики страны в области науки, образования.

Уроки Василия Васильевича Филиппова, члена-корреспондента РАН – уроки верности науке, стойкости, работоспособности и требовательности – останутся в наших сердцах, имя его – в истории науки.

*Члены Академии наук РС (Я),
редколлегия журнала*