

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



ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

2020

т. 25 № 3

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2020, Том 25, № 3

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

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

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.yakutia.science>

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
Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС (Я), 2020
© Якутский научный центр СО РАН, 2020
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2020
© Министерство образования и науки РС (Я), 2020

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 «Nauka i Obrazovanie»)

Scientific journal

2020, Vol. 25, No. 3

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. of Physico-Mathematical Sciences

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<http://nras.yakutia.science>

The certificate of registration of PI No. TU14-00503
of February 15, 2018, issued by the Board 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 Catalog – ПР046
Included in the Russian Science Citation Index database (RSCI)

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2020
© Yakut Scientific Center of SB RAS, 2020
© M.K. Ammosov North-Eastern
Federal University, 2020
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2020

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)
Кондратьев С.А. – д.т.н., ИГД СО РАН
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
Хуббертсен 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
Кершенгольц 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
Морозов Н.Ф. – акад. РАН, СПбГУ
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. (Geology and Mineralogy), prof., AS RS(Ya)
S.A. Kondratiev – Dr. Sci. (Tech.), Inst. of Mining of the North SB RAS
R.V. Kutugin – 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., Tufts Univ., USA
V.V. Lepov – Dr. Sci. (Tech.), Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS
N.F. Morozov – Acad. RAS, St Petersburg State Univ.
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>Kudrin M.V., Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Yu., Aristov V.V., Tarasov Ya.A.</i> Geochemistry and the form of «invisible» gold in pyrite from metasomatites of the Khangalas deposit, North-East of Russia.....	7
<i>Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н.</i> Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия).....	15
<i>Трунилина В.А.</i> Позднемеловой Право-Кыринский массив щелочно-полевошпатовых гранитов (Верхояно-Колымская орогенная область).....	27
<i>Плотников В.В., Мащенко Е.Н.</i> Новые данные о границах ареала шерстистого носорога (<i>Coelodonta antiquitatis</i> Blumenbach, 1799) в позднем плейстоцене.....	40

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Спектор В.В., Jin Huijun, Торговкин Н.В., Максимов Г.Т., Спектор В.Б., Сыромятников И.И.</i> Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия).....	49
---	----

Обогащение полезных ископаемых

<i>Матвеев А.И., Винокуров В.Р.</i> Разработка конструкции нового измельчителя горных пород комбинированного действия.....	63
--	----

Общая биология

Экология

<i>Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Охлопков И.М., Сидоров М.М., Данилов В.А.</i> Население млекопитающих бассейна Верхней Муны (Арктическая зона Западной Якутии): современное состояние и прогноз.....	74
<i>Воронов И.В.</i> Содержание флавоноидов в биомассе <i>Atriplex patula</i> L. при механоактивной обработке.....	89
<i>Порядина Л.Н.</i> Материалы к лишенобиоте Центральной Якутии.....	97

Биологические ресурсы

<i>Чикидов И.И.</i> Особенности произрастания кедровостланиковых сообществ на Олекмо-Чарском нагорье Якутии.....	110
<i>Рожина С.М., Слепцов И.В., Журавская А.Н.</i> Химический состав липидно-белковой фракции, выделяемой при производстве биопрепарата «Эпсорин».....	117
<i>Краснова А.Н., Польшина Т.Н.</i> Редкая аномалия «ветвистость» <i>Typha grossheimii</i> Pobed. гидрофильного рода <i>Typha</i> L. (Typhaceae).....	123

Металлургия и материаловедение

Материаловедение

<i>Данилова С.Н., Ярусова С.Б., Охлопкова А.А., Гордиенко П.С., Слепцова С.А., Буравлев И.Ю., Ванг Лянсай, Цзяо Ян. Разработка износостойких полимер-полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ.....</i>	<i>130</i>
<i>Лепов В.В., Ачикасова В.С., Махарова С.Н., Захаров В.Е., Павлов Н.В. Анализ разрушения материала трубы поддува котельной, эксплуатируемой в экстремальных условиях Арктики.....</i>	<i>143</i>
<i>Романов И.О., Макиенко В.М., Востриков Я.А. О парадигме «надежность материала».....</i>	<i>152</i>

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

<i>Kudrin M.V., Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Yu., Aristov V.V., Tarasov Ya.A.</i> Geochemistry and the form of «invisible» gold in pyrite from metasomatites of the Khangalas deposit, North-East of Russia.....	7
<i>Oparin N.A., Oleinikov O.B., Baranov L.N.</i> Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia).....	15
<i>Trunilina V.A.</i> Late Cretaceous Right-Kyrin massif of alkali-feldspar granites (Verkhoyano-Kolyma orogeny region).....	27
<i>Plotnikov V.V., Mashchenko E.N.</i> New data on the range boundaries of the woolly rhinoceros (<i>Coelodonta antiquitatis</i> Blumenbach, 1799) in the late Pleistocene.....	40

Engineering geology, permafrost and soil science

<i>Spektor V.V., Huijun Jin, Torgovkin N.V., Maksimov G.T., Spektor V.B., Syromyatnikov I.I.</i> Structural features of Pleistocene cryogenic deposits in the Lena and Amga Rivers Plain (Central Yakutia).....	49
---	----

Mineral processing

<i>Matveev A.I., Vinokurov V.R.</i> Development of the design of a new chopper of combined action.....	63
--	----

General biology

Ecology

<i>Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L., Okhlopkov I.M., Sidorov M.M., Danilov V.A.</i> Mammalian population of the Upper Muna Basin (the Arctic Zone of the West Yakutia): Current state and forecast.....	74
<i>Voronov I.V.</i> The content of flavonoids in <i>Atriplex patula</i> L. biomass during mechanical activation treatment.....	89
<i>Poryadina L.N.</i> Materials on the lichenbiota of Central Yakutia.....	97

Biological resources

<i>Chikidov I.I.</i> Features of the growth of <i>Pinus pumila</i> (Pall.) Regel communities in the Olekmo-Charsky highlands of Yakutia.....	110
<i>Rozhina S.M., Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N.</i> Chemical composition of the lipid-protein fraction separated in the production of Epsorin biopreparation.....	117
<i>Krasnova A.N., Polshina T.N.</i> A rare branching anomaly of <i>Typha grossheimii</i> Pobed. of the hydrophilic genus <i>Typha</i> L. (Typhaceae).....	123

Metallurgy and materials science

Materials science

<i>Danilova S.N., Yarusova S.B., Okhlopko A.A., Gordienko P.S., Sleptsova S.A., Buravlev I.Yu., Wang Liansai, Jiao Yang.</i> The development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE.....	130
<i>Lepov V.V., Achikasova V.S., Makharova S.N., Zakharov V.E., Pavlov N.V.</i> Failure analysis of the material of water boiler pipe operated in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia).....	143
<i>Romanov I.O., Makienko V.M., Vostrikov Y.A.</i> About the «reliability of the material» paradigm.....	152

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 550.4 (553.08, 549.08, 552.1)

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-1

Geochemistry and the form of «invisible» gold in pyrite from metasomatites of the Khangalas deposit, North-East of Russia

M.V. Kudrin^{1,*}, L.I. Polufuntikova^{1,2}, V.Yu. Fridovsky¹, V.V. Aristov^{1,3}, Ya.A. Tarasov¹

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

³Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russia

*kudrinmv@mail.ru

Abstract. The Khangalas orogenic gold deposit is located in the central part of the Yana–Kolyma gold belt, Northeastern Russia. Gold occurs in the native form in quartz veins, and in the so-called invisible form in pyrite and arsenopyrite of quartz-carbonate-sericite metasomatites. Pyrite and arsenopyrite are the most common ore minerals of the deposit. For the vein-veinlet and veinlet-disseminated types of mineralization of the Khangalas deposit, four generations of pyrite and two generations of arsenopyrite were identified. Despite the widespread occurrence of disseminated pyrite-arsenopyrite mineralization of metasomatites, its mineralogical-geochemical features, isotope-geochemical characteristics and mechanisms of location remain insufficiently studied, and its origin is debatable. The article presents the first results obtained in the studies of the geochemistry of the most common and industrially significant gold-bearing pyrite (Py3) from metasomatites. The elementary composition and morphology of crystals were studied with a JEOL JSM-6480LV electron scanning microscope equipped with an Energy 350 Oxford energy dispersion spectrometer. Trace elements in pyrites were determined using a New Wave Research UP-213 laser ablation system (USA), coupled with an Agilent 7700x quadrupole mass spectrometer (Agilent Technologies, USA). The total amount of impurities in pyrite-3 is 0.48–2.12 %, with an average of 1.11 %. The content of Au in a Py3 gross sample determined by the atomic absorption method is up to 39.2 ppm, silver up to 17.38 ppm. Typomorphic trace elements according to LA-ICP-MS analysis are As (4530–18790 ppm), Ni (8.2–1298 ppm), Co (0.23–505 ppm), Cu (0.5–19 ppm), Zn (3.5–6.4 ppm), Pb (0.5–860 ppm), Sb (0.3–407 ppm), Ag (0.008–1.01 ppm) and Au (0.1–15.9 ppm). Au is closely correlated with As ($r = 0.9$). Of ~ 100 grains of pyrite-3 examined, ~ 20 % contain microinclusions of galena and sphalerite in defects and crystal growth zones; tetrahedrite and freibergite are recorded in single samples. A microinclusion of native gold Au^0 was found only in one sample; it has a size of about 15 μm , fineness of 827 ‰. On the Au – As (mol %) diagram, the data points for Py3 samples from the Khangalas deposit fall below the solubility limit of Au in a solid. This indicates the form of “invisible” gold found in Py3 mainly as structurally bound Au^+ . The presence of gold-bearing pyrite in metasomatites is of great practical importance and makes it possible to significantly expand the raw material potential of the Khangalas ore cluster.

Key words: LA-ICP-MS trace element analysis, auriferous pyrite, form of «invisible» gold, Khangalas deposit, Yana–Kolyma gold belt, NE Russia.

Acknowledgements. This work was supported by the Diamond and Precious Metals Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS), and was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (grant number 18-45-140040 r_a). The authors appreciate the workers of DPMGI SB RAS Zayakina N.V. and Vasileva T.I. for their interest and advice that helped improve the article.

Introduction

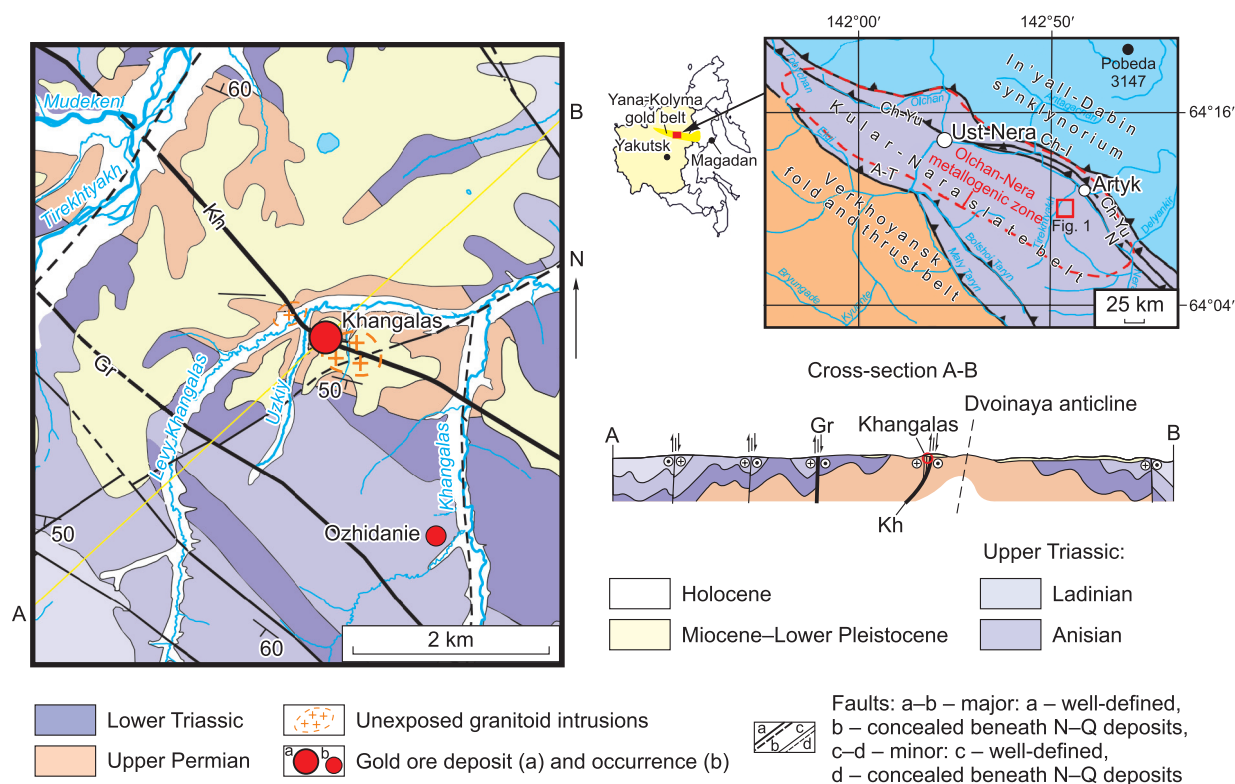
The Yana–Kolyma gold belt (YKGB) is the largest in northeast Russia [1–5]. The disseminated mineralization is widely manifested here both within the gold deposits [6–11] and in the regional sulfidation zones [12–14]. In particular, high gold contents in pyrite and arsenopyrite from metasomatic rocks were established at the Khangalas deposit located in the Olchan–Nera metallogenic zone of the central part of the Yana–Kolyma gold belt [15] (Fig. 1). It was discovered in 1947. When studying and developing the deposit until the 1990s, attention was paid to the vein type of mineralization [16, 17], in the 2000s, to mineralized crush zones with vein-veinlet mineralization [18, 19]. A detailed description of the geological structure of the Khangalas deposit is published in [5].

Pyrite-3 is the most widespread mineral of metasomatic rocks of the Khangalas deposit. Its geochemical characteristics and gold content are poorly studied, which makes it difficult to understand the origin of mineralization and assess the economic potential of the deposit. The article presents the first results of studying trace elements and the forms of

gold in pyrites from metasomatites using modern analytical methods.

Materials and methods

Rock samples for mineralogical-geochemical and isotope-geochemical studies were collected from natural outcrops, walls and dumps of surface and underground mine workings. Mineralogy and textural-structural features of ores were studied with a ZEUS Axio optical microscope. The elementary composition and morphology of crystals were determined using a JEOL JSM-6480LV scanning electron microscope equipped with an Energy 350 Oxford energy dispersion spectrometer (20 kV, 1 nA, beam diameter 1 µm) (analyst Popov A.V., DPMGI SB RAS). Au and Ag grades of more than 2 ppm in a mass of ground pyrite were determined by an Agilent 4200 MP-AES atomic emission spectrometer with a microwave-saturated plasma. Au and Ag grades less than 2 ppm were determined by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization on an iCE 3500 spectrometer manufactured by ThermoScientific (analysts Sannikova A.E., Naryshkina E.L., Mikhailov E.I., IGABM



SB RAS). The detection limits of the elements are from 0.0001 µg/ml and above. Trace elements were identified for 9 pyrite-3 grains from the Khangalas deposit by a New Wave Research UP-213 laser ablation system (USA) coupled with an Agilent 7700x quadrupole mass spectrometer (Agilent Technologies, USA) (analyst Artemyev D.A., Institute of Mineralogy, UrB RAS, Miass) [20–22].

Results and discussion

Several pyrite generations are shown for metasomatites of the Khangalas orogenic gold deposit (Fig. 2). Syngenetic framboidal pyrite (Py1) was formed after sedimentation, during diagenetic processes due to bacterial sulfate reduction. Framboids are represented by spherical intergrowths of pyrite microcrystals ranging in size from 10 to 100 microns. Pyrite microcrystals sometimes have a zonal structure and form dispersed or layered impregnations in a carbon-silica matrix. Epigenetic metamorphogenic pyrite (Py2) is characterized by disseminated areal distribution. Two morphological types of Py2 are distinguished: fine-grained pyrite ranging in size from 5 to 50 µm and coarse-grained from fractions of a millimeters up to 1–3 mm. Py2 is characterized by the cubic form of crystals and the cataclastic and corrosive microtexture. Py3 is developed in metasomatic rocks and associated with early arsenopyrite (Apy1). Those sulfides have a hypidiomor-

phic metagranular structure and form intergrowths with sharp boundaries. They have a disseminated and microtextural texture. Py3 is characterized by complicated cubic or pentagonal dodecahedral forms. The size of the crystals attained 2–3 mm.

The total amount of trace elements is 0.48–2.12 %, with an average of 1.11 %. Table shows the most characteristic trace elements in pyrite-3 from metasomatized rocks of Khangalas deposit. As is the main impurity element of pyrite-3. Its content ranges from 0.45 to 1.88 %. The gold grade in a gross sample is 0.76–39.2 ppm as established by the atomic absorption spectrometry, and that in individual pyrite-3 grains (Fig. 2, *f–n*) estimated by LA-ICP-MS trace element analysis is 0.1–15.9 ppm. A close correlation is observed for Au with As ($r = 0.9$) and Cu ($r = 0.92$). In the ground gross sample the Ag content is 1.15–17.38 ppm as determined by the atomic absorption analysis, and according to LA-ICP-MS trace element analysis, in individual pyrite-3 grains (Fig. 2, *f–n*) silver is contained in a small amount ($C_{Ag} = 0.008–1.01$ ppm).

Silver weakly correlates with Au ($r = 0.19$). 20 % of ~ 100 Py3 grains examined with an optical microscope contain microinclusions of the polysulfide association minerals (galena, rarely sphalerite and chalcopyrite) (Fig. 2, *d*). Tetrahedrite and freibergite were recorded in single samples. A microinclusion of gold was found in only one sample of all

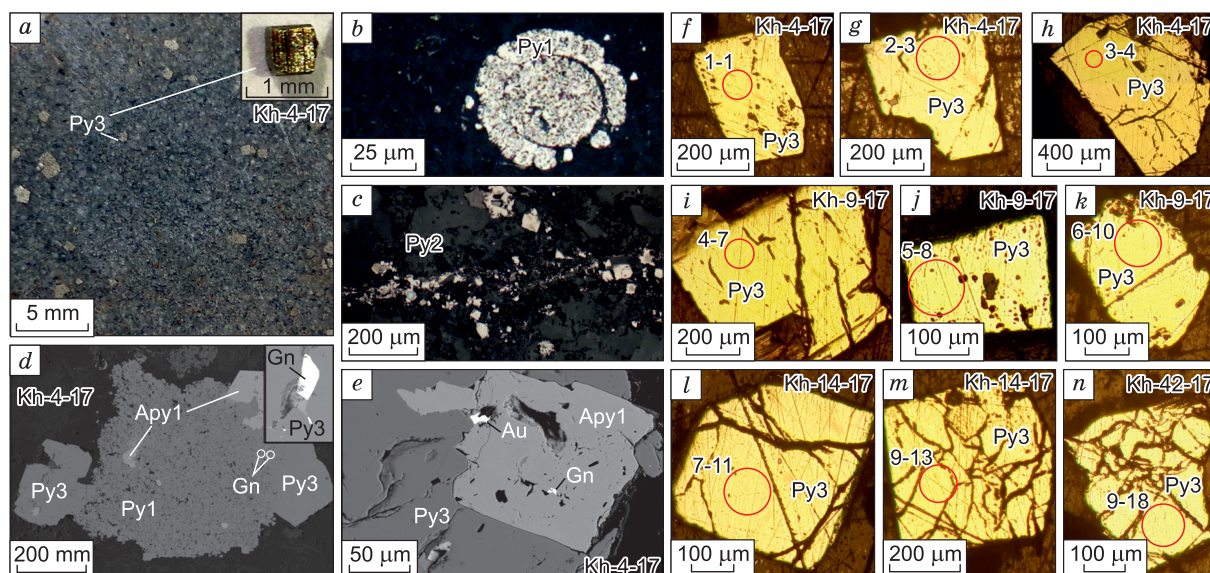


Fig. 2. Pyrite generations from metasomatites of the Khangalas deposit (*a–e*) and spot positions of LA-ICP-MS trace element analysis in Py3 (*f–n*): *a* – cubic crystals of Py3; *b* – syngenetic framboidal pyrite (Py1); *c* – fine-grained Py2; *d* – Py3 with galena inclusions in intergrowth with Apy1; *e* – Py3 in intergrowth with Apy1 with inclusions of gold and galena. Sample numbers and spot positions of LA-ICP-MS trace elements analysis correspond to numbers in Table.

Data of LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite-3 from metasomatic rocks of the Khangalas gold deposit (all values in ppm, bdl – below detection limit)

Sample	Spot position	As	Au	Ag	Co	Ni	Cu	Zn	Pb	Sb	Ti	V	Cr	Mn	Mo	Te
Kh-4-17	1-1	5240	0.955	0.92	1.13	14.4	3.96	3.51	66	10.19	2470	7.16	10.3	0.85	0.079	0.056
	2-3	7630	0.502	0.0076	0.233	8.2	0.54	3.62	0.479	0.25	0.7	0.028	0.38	0.57	0.21	0.21
	3-4	4710	0.236	0.196	17.5	13.4	1.58	3.8	3.71	2	8.6	0.116	0.39	0.82	0.64	0.13
Kh-9-17	4-7	4530	0.507	0.85	1.15	74.9	3	4.2	860	407	0.78	0.058	0.52	0.41	0.059	0.083
	5-8	18790	8.83	0.055	7.05	39	19	4.7	3.35	6.19	36.1	0.35	0.98	0.4	0.047	bdl
	6-10	18550	15.85	0.8	21.3	56.9	18	5.3	26.7	40.1	2390	8.42	7.9	1.53	0.71	0.06
Kh-14-17	7-11	11060	2.5	1.01	505	690	7.3	6.4	23.3	8.42	77	0.235	0.58	7.55	1.04	0.31
	8-13	7340	0.143	0.062	41.6	1298	1.4	4.65	2.75	1.05	79	0.105	1.09	0.74	0.29	0.21
Kh-42-17	9-18	8640	1.028	0.128	43.5	64.9	1.29	4.22	3.34	1	208	0.274	0.77	0.73	bdl	bdl

examined ~ 100 grains, it has a size of about 15 μm , fineness of 827 ‰ (Fig. 2, *f*). It is assumed that native gold was formed synchronously with the lode gold of polysulfide association. Microinclusions in pyrite-3 are confined to defects and crystal growth zones. The Cu grade is low (0.5–19 ppm). The Ni grade ranges from 8.2 to 1298 ppm, with low (8.2–74.9 ppm) values prevailing. Co is also characterized by small grades ($C_{\text{Co}} = 0.23\text{--}43.5$ ppm), in only one sample does C_{Co} reach 505 ppm. Co has a moderate correlation with Ni ($r = 0.42$), and is closely associated with Zn ($r = 0.8$). Zinc is a constant impurity ($v = 20\%$) in pyrite-3; its content varies from 3.5 to 6.4 ppm, an average of 4.5 ppm. The amounts of Pb and Sb vary over a wide range from 0.5 to 860 ppm and from 0.3 to 407 ppm, respectively. There is a very close correlation between them ($r = 0.996$) and their negative correlation with Au is noted. This may indicate late processes superimposed on gold ore mineralization, and indirectly shows the polychronism and polygenicity of the Khangalas deposit. The titanium content varies widely from 0.7 to 2470 ppm, while in most samples the values are small (up to 208 ppm). Ti closely correlates with Cr ($r = 0.99$) and V ($r = 0.96$), the contents of which vary between 0.38–10.3 and 0.028–8.42 ppm, respectively. The sharply increased amounts of Ti (2470, 2390 ppm), Cr (7.9, 10.3 ppm) and V (7.16, 8.42 ppm) can be associated with microinclusions of Ti-, Cr- and V-containing minerals entrained from the host rocks during the growth of pyrite-3 grains. Mn varies from 0.57 to 7.55 ppm, Mo from 0.047 to 1.04 ppm, Te from 0.056 to 0.31 ppm. Figure 3 shows scatterplots of As vs. Au, Ag vs. Au, Zn vs. Au, Pb vs. Au, Cu vs. Au, Sb vs. Au, Te vs. Au, Co vs. Au, Ti vs. Au, As vs. Ni, Au vs. Ni, Zn vs. Ni.

Close relationship ($r > 0.5$) between Au and As in pyrite and arsenic pyrite from various types of gold deposits is noted by many authors [3, 23–26, etc.]. Elevated As contents are typical for pyrite with excess iron ($\text{S/Fe} = 1.9\text{--}1.98$). In the mineral structure, As isomorphically replaces S ($\text{Fe}_{1.00}(\text{S}_{1.98}\text{As}_{0.02})_{2.00}$), in some cases forming arsenic pyrite ($\text{As} > 1.7\%$), which is typical for reducing conditions [24, 27, 28]. Reich M. et al. [24] showed for epithermal and Carlin-type deposits an increase in the solubility of Au in the pyrite structure with increasing As content: $C_{\text{Au}} = 0.02 \cdot C_{\text{As}} + 4 \times 10^{-5}$. Based on the data of EMPA, LA-ICP-MS, SIMS and I-PIXE analyses, Deditius A.P. and co-workers [29], studied the mechanism of Au and As incorporation and the solubility of gold in pyrite from various types of deposits. In addition to the Carlin and epithermal types, pyrites of Cu-porphyry, Cu-Au, orogenic (OGD), volcanogenic-massive sulfide (VHMS), iron-oxide copper-gold (IOCG), and Witwatersrand Au and coal deposits were studied. The authors [29] found that on the Au–As diagram, the analytical results for pyrite from the gold deposits form a wedge-shaped zone and most points fall below the solubility limit of a solid defined by [24] (Fig. 4). They indicate that Au^{1+} is the dominant Au form in the arsenic pyrite of the studied deposits. Analytical data show that the solubility limit of Au in arsenic pyrite is ~ 0.02 for epithermal and Carlin-type deposits [24], and from OGDs ~ 0.004 [29] (Fig. 4). It appears that the solubility limit of Au depends on the crystallochemical properties of pyrite rather than on the geochemical environment of its formation [29]. Our results are in good agreement with the views of Reich M. et al. [24] and Deditius A.P. et al. [29]. Figure 4 shows that in the Au – As coordinates (mol. %), all at the studied

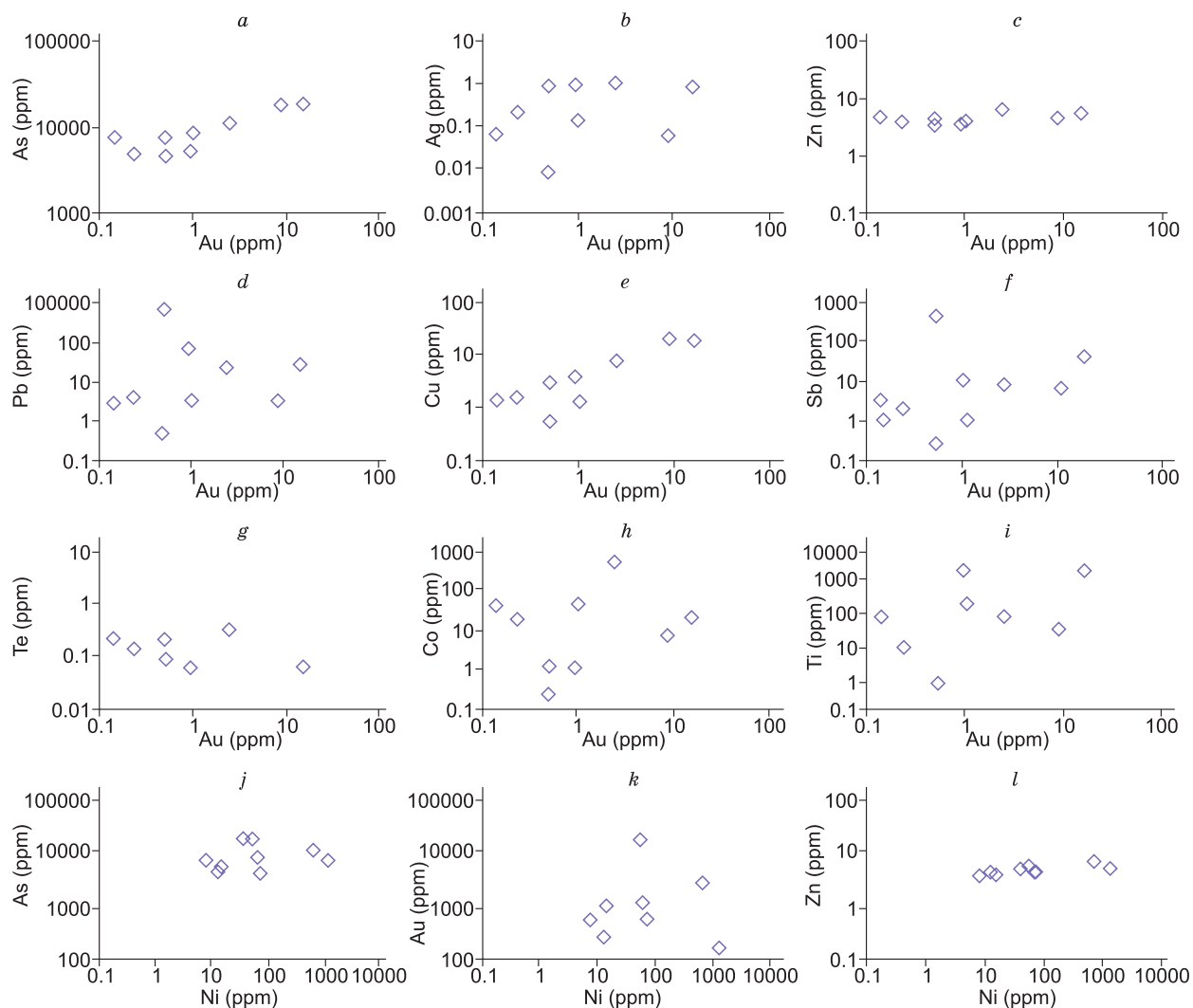


Fig. 3. Scatterplots of As vs. Au (*a*), Ag vs. Au (*b*), Zn vs. Au (*c*), Pb vs. Au (*d*), Cu vs. Au (*e*), Sb vs. Au (*f*), Te vs. Au (*g*), Co vs. Au (*h*), Ti vs. Au (*i*), As vs. Ni (*j*), Au vs. Ni (*k*), Zn vs. Ni (*l*).

samples of pyrites-3 from the Khangalas deposit fall into the field of structurally bound Au^+ gold ($\text{Au}/\text{As} < 0.02$ according to [8] and < 0.004 – according to [29]). Arsenic at the Khangalas deposit controls Au behavior in the same way as observed for the orogenic and Carlin-type deposits (Figs. 3, 4) [24, 29]. These results are confirmed by rather low Au contents in the analyzed pyrites-3 – in most samples, Au does not exceed 2.5 ppm (see Table). This corresponds well with the studies of Tauson et al. [25], who established that the content of the Au structural form in all the samples of pyrite from deposits of different genetic types in Russia (large orogenic Natalka and Degdekan gold-quartz deposits, volcanogenic-plutogenic Dukat Au-Ag deposit, volcanogenic Dalnee and Oroch Au-Ag deposits, giant

Sukhoi Log deposit with a controversial genesis, epithermal Pokrovskoye Au-Ag deposit, Amurskiye Dayki deposit with an unconventional type of mineralization, Zun-Kholbinskoe deposit with a controversial genesis) and Uzbekistan (epithermal Kochbulak and Kyzylalmasay Au-Ag deposits) does not exceed ~ 5 ppm. In only two samples from the metasomatites of the Khangalas deposit does the Au content reach more than 5 ppm (8.83 and 15.85 ppm). This may indirectly confirm the results of microscopic studies on the presence of a certain amount of the native form of gold in pyrites-3. Our results are also consistent with the viewpoints from [29] that pyrite in orogenic deposits usually contains less than 100 ppm Au. Higher contents are mainly associated with the presence of nano- and micro-

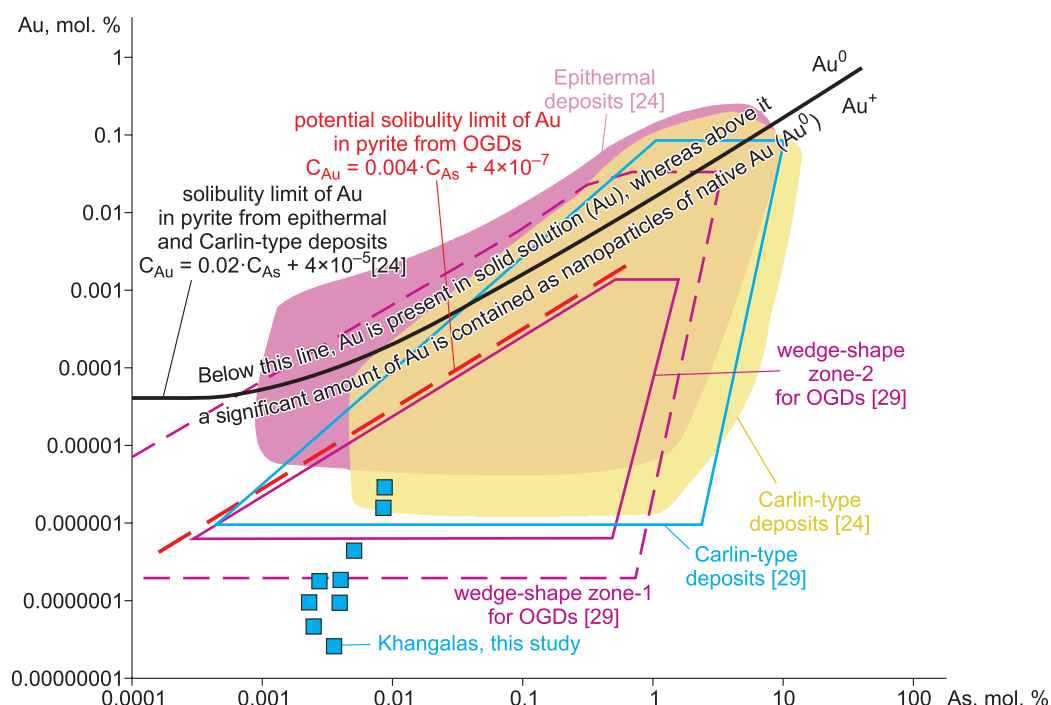


Fig. 4. Plot of log Au vs. log As (in mol. %) [24] for pyrite-3 from metasomatites of the Khangalas deposit.

particles [30]. The presence of native surface-bound (nano- or micro-) Au^0 in sulfides from metasomatites is also observed in deposits of various genetic types [24–26, 31].

Conclusions

In the metasomatites of the Khangalas deposit three pyrite generations were detected. The geochemistry of gold-bearing pyrite-3, as the most common and economically important, was studied. The presence of gold-bearing pyrite in metasomatites is of great practical importance and makes it possible to significantly expand the raw material potential of the Khangalas ore cluster. The total amount of impurities in Py3 is 0.48–2.12 %, with an average of 1.11 %. Arsenic is the main impurity; its grade ranges from 0.45 to 1.88 %. The grades of Au (0.1–15.9 ppm), Ag (0.008–1.01 ppm), Ni (8.2–1298 ppm), Co (0.23–505 ppm), Cu (0.5–19 ppm), Zn (3.5–6.4 ppm), and Pb (0.5–860 ppm) and Sb (0.3–407 ppm) are estimated. The grade of Au in Py3 gross sample determined by the atomic absorption method is up to 39.2 ppm, silver up to 17.38 ppm. The concentration of Au in pyrite-3 is directly proportional to arsenic grade ($r = 0.9$). In the examined ~ 100 grains of pyrite-3, microinclusions of galena and sphalerite are found; in single samples tetrahedrite and freibergite are noted. Microinclusion of

Au^0 gold was found only in one sample; it has a size of about 15 μm , fineness of 827 ‰. It is assumed that it was formed synchronously with the vein gold-polysulfide association. Microinclusions are confined to defects and growth zones of pyrite-3 crystals. On the Au – As (mol %) diagram, the data points for Py3 samples from the Khangalas deposit fall below the solubility limit of Au in a solid. This indicates the form of «invisible» gold found in Py3 pyrite from the Khangalas orogenic gold deposit mainly as structurally bound Au^+ .

References

1. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geology Reviews*. 2014. Vol. 59. P. 123–151. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2013.11.010.
2. Goryachev N.A., Sotskaya O.T., Mikhailitsyna T.I., Goryacheva E.M., Manshin A.P. Estimation of Au-Pt-Pd-Ni in ores of typical deposits (Natalka, Degdekan) in the black shale strata of the Yana-Kolyma gold belt // *Problems of Mineralogy of Russia (special issue of the electronic journal Vestnik ONZ RAS)*. M.: GC RAS. 2012. P. 325–336. DOI:10.2205/2012minerageny-2012 (in Russian).
3. Volkov A.V., Sidorov A.A. Invisible gold // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 87, No. 1. P. 40–49. DOI: 10.7868/S0869587317010121 (in Russian).

4. Fridovsky V.Y., Prokopiev A.V. Tectonics, geodynamics and gold mineralization of the eastern margin of the North Asia Craton // Geological Society, London, Special Publications. 2002. Vol. 204, No. 1. P. 299–317. DOI: 10.1144/GSL.SP.2002.204.01.17.
5. Fridovsky V.Y., Kudrin M.V., Polufuntikova L.I. Multi-stage deformation of the Khangalas ore cluster (Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia): ore-controlling reverse thrust faults and post-mineral strike-slip faults // Minerals. 2018. Vol. 8, No. 7. P. 270. DOI: 10.3390/min8070270.
6. Tyukova E.E., Voroshin S.V. Composition and paragenesis of arsenopyrite in deposits and host rocks of the Upper Kolyma region (to the interpretation of the genesis of sulfide associations). Magadan: NEISRI FEB RAS, 2007. 107 p. (in Russian).
7. Tyukova E.E., Voroshin S.V. Isotopic composition of sulfur in sulfides from ores and host rocks of the Upper Kolyma region (Magadan region) // Russian Journal of Pacific Geology. 2008. Vol. 27, No. 1. P. 29–43 (in Russian).
8. Goryachev N.A., Vikentyeva O.V., Bortnikov N.S., Prokofiev V.Yu., Alpatov V.A., Golub V.V. World-class Natalka gold deposit: REE distribution, fluid inclusions, stable oxygen isotopes and ore formation conditions (North-East of Russia) // Geologiya Rudnyh Mestorozhdenij. 2008. Vol. 50, No. 5. P. 414–444 (in Russian).
9. Gamyanin G.N., Fridovsky V.Y., Vikent'eva O.V. Noble-metal mineralization of the Adycha-Taryn metallogenic zone: Geochemistry of stable isotopes, fluid regime, and ore formation conditions // Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59, No. 10. P. 1271–1287. DOI: 10.15372/GiG20181006.
10. Fridovsky V.Yu., Gamyanin G.N., Polufuntikova L.I. Sana gold-quartz deposit of the Taryn ore cluster // Razvedka i okhrana nedr. 2013. No. 12. P. 3–7 (in Russian).
11. Fridovsky V.Yu., Gamyanin G.N., Polufuntikova L.I. Structures, mineralogy and fluid formation mode of ores of the polygenic Malo-Taryn gold ore field (North-East of Russia) // Russian Journal of Pacific Geology. 2015. V. 34, No. 4. P. 39–52 (in Russian).
12. Babkin P.V., Gelman M.L., Veldyakov F.F., Pavlyuchenko L.A. Prospects for identifying gold mineralization in sulfidization zones in the black shale strata of the North-East USSR // Kolyma. 2001. No. 2. P. 14–22 (in Russian).
13. Izmailov L.I. Pyrrhotite mineralization of metal-bearing zones of the Kolyma river basin. Novosibirsk: Nauka, 1976. 120 p. (in Russian).
14. Goryachev N.A., Sotskaya O.T., Ignatiev A.V. About sulfide mineralization of the zones of large faults of the Yana-Kolyma orogenic belt // Bulletin of the Northeast Scientific Center of the FEB RAS. 2020. No. 1. P. 11 (in Russian).
15. Kudrin M.V. The disseminated mineralization of the Khangalas gold deposit (Yana-Kolyma gold-bearing belt) // New to the knowledge of ore processes: a collection of the All-Russian conference materials. 2018. P. 221–223 (in Russian).
16. Rozhkov I.S., Grinberg G.A., Gamyanin G.A. et al. Late Mesozoic magmatism and gold mineralization of the Upper Indigirsky region. M.: Nauka, 1971. 238 p. (in Russian).
17. Amuzinsky V.A., Anisimova G.S., Zhdanov Yu.Ya. Native gold of Yakutia, Upper Indigirsky District, Novosibirsk: Nauka, 1992. 184 p. (in Russian).
18. Gamyanin G.N. Mineralogical and genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma Mesozoids. M.: GEOS, 2001. 222 p. (in Russian).
19. Akimov G.Yu. Zonal halos of pyritization of the Khangalas gold-quartz deposit (Verkhne-Indigirsky district) as an indicator of polygenicity and polychronism in the formation of the mineral complex // New ideas in Earth sciences. Proceedings of the V international conference, 2001 (in Russian).
20. Wilson S.A., Ridley W.I., Koenig A.E. Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2002. Vol. 17, No. 4. P. 406–409. DOI: 10.1039/b108787h.
21. Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J. Iolite. Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2011. Vol. 26, No. 12. P. 2508–2518. DOI: 10.1039/c1ja10172b.
22. Longerich H.P., Jackson S.E., Günther D. Interlaboratory note. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric transient signal data acquisition and analyte concentration calculation // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 1996. Vol. 11, No. 9. P. 899–904. DOI: 10.1039/ja9961100899.
23. Cook N.J., Chrysosoulis S.L. Concentrations of invisible gold in the common sulfides // The Canadian Mineralogist. 1990. Vol. 28, No. 1. P. 1–16.
24. Reich M., Kesler S.E., Utsunoyiya S., Palenik C.S., Chrysosoulis S., Ewing R.C. Solubility of gold in arsenian pyrite // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69, No. 11. P. 2781–2796. DOI: 10.1016/j.gca.2005.01.011.
25. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Smagunov N.V., Spiridonov A.M., Grebenshchikova V.I., Budyak A.E. Structurally and superficially bound gold in pyrite from deposits of different genetic types // Russian Geology and Geophysics. 2014. Vol. 55, No. 2. P. 273–289. DOI: 10.1016/j.rgg.2014.01.011.
26. Large R.R., Maslennikov V.V. Invisible Gold Paragenesis and Geochemistry in Pyrite from Orogenic and Sediment-Hosted Gold Deposits // Minerals. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 339. DOI: 10.3390/min10040339.
27. Pals D.W., Spry P.G., Chrysosoulis S. Invisible gold and tellurium in arsenic-rich pyrite from the Emperor gold deposit, Fiji: implications for gold distribution and deposition // Economic Geology. 2003. Vol. 98, No. 3. P. 479–493. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.3.479.
28. Gao F., Du Y., Pang Z., Du Y., Xin F., Xie J. LA-ICP-MS Trace-Element Analysis of Pyrite from the

Huanxiangwa Gold Deposit, Xiong'ershan District, China: Implications for ore genesis // *Minerals*. 2019. Vol. 9, No. 3. P. 157. DOI: 10.3390/min9030157.

29. Deditius A.P., Reich M., Kesler S.E., Utsunomiya S., Chrysosoulis S.L., Walshe J., Ewing R.C. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 140. P. 644–670. DOI: 10.1016/j.gca.2014.05.045.

30. Vaughan J.P., Kyin A. Refractory gold ores in Archaean greenstones, Western Australia: mineralogy, gold

paragenesis, metallurgical characterization and classification // *Mineralogical Magazine*. 2004. Vol. 68, No. 2. P. 255–277. DOI: 10.1180/0026461046820186.

31. Moskvitina L.V., Moskvitin S.G., Anisimova G.S. Research of nanoscale gold by methods of tunneling and atomic-powered microscopy with chemical and ion-plasma etching in the Kuchus Deposit (Republic Sakha (Yakutia)) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 272(2). P. 022184. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022184.

Received 05.06.2020

Accepted 23.07.2020

About the authors

KUDRIN Maxim Vasilievich, researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-8375-776X>, kudrinmv@mail.ru;

POLUFUNTIKOVA Lena Idenenovna, Candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher, M.K. Ammosov Northeast Federal University, 46 Kulakovskiy str., 677000 Yakutsk, Russia; Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6024-669X>, pli07@list.ru;

FRIDOVSKY Valery Yuryevich, Doctor of geological and mineralogical sciences, director, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4994-2141>, 710933@list.ru;

ARISTOV Vasily Vasilievich, Candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, RAS, 35 Staromonetny Lane, Moscow 119017, Russia, rstvvv@yandex.ru;

TARASOV Yaroslav Alekseevich, postgraduate student, leading engineer, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, yarik18051996@mail.ru.

Citation

Kudrin M.V., Polufuntikova L.I., Fridovsky V.Yu., Aristov V.V., Tarasov Ya.A. Geochemistry and form of «invisible» gold in pyrite from metasomatites of the Khangalas deposit, North-East of Russia // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 7–14. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-1>

Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия)

Н.А. Опарин^{1,*}, О.Б. Олейников^{1,**}, Л. Н. Баранов^{2,3}

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

*nik3256-1989@yandex.ru, ** olei-oleg@yandex.ru

Аннотация. Апатит – распространенный минерал магматических систем. Этот кальциевый фосфат выступает в роли минерала-концентратора галогенов и стронция, что делает его индикатором эволюции расплава на позднемагматическом этапе. Кимберлиты являются одними из немногих пород, где апатит изучен в ограниченном числе объектов. В настоящей работе обсуждаются результаты исследования зерен апатита кимберлитовых пород, слагающих среднепалеозойскую кимберлитовую трубку Манчары (Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия). Рассматриваются химический состав и зональность апатита из кимберлитовых пород трубки Манчары, а также проводится сравнительная характеристика с апатитами кимберлитовых пород (Канада, ЮАР), карбонатитов (ЮАР), ксенолитов перидотитов из базальтов (Китай) и ксенолитов эклогитов из кимберлитов (Канада). Установлено, что минерал из кимберлитовой трубки Манчары является стронциевым фторапатитом. Изучение зонального строения отдельных кристаллов позволило отразить характер поведения SrO в процессе формирования кимберлитовых пород трубки Манчары. Определена позднемагматическая природа исследуемого апатита, состав которого связан с влиянием флюидов, обогащенных F и Sr. Различия апатита из трубки Манчары и алмазоносных кимберлитовых тел, карбонатитов, ксенолитов перидотитов и эклогитов ЮАР, Канады и Китая указывают на наличие типоморфных особенностей минерала для конкретных магматических систем, флюиды которых обогащены летучими компонентами и стронцием, что позволяет использовать примесный состав апатита в сравнительном изучении кимберлитовых и других пород.

Ключевые слова: апатит, стронций, кимберлитовая трубка, Хомпу-Майское поле, Центральная Якутия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-003).

Введение

Кимберлит является сложной гибридной породой, состав которой значительно искажен контаминацией мантийных и коровых пород, потерями летучих и гидротермальными изменениями [1]. Минералы основной массы могут служить индикаторами состава кимберлитовых магм и флюидного поведения на позднемагматической стадии. Апатит содержит галогены и стронций, что позволяет использовать этот минерал для исследования эволюции расплава [1]. Типоморфизм апатита изучен в многочисленных породах: карбонатитах [2, 3], гранитоидах [4, 5], перидотитах [6, 7], эклогитах [8], габброидах [9, 10], лампрофирах [11], фойяитах [12], нефелиновых сиенитах [12] и лампроитах [13]. Многие исследователи отмечали присутствие этого минерала в

кимберлитах, однако развернуто он был исследован в алмазоносной дайке Снэп Лэйк (Канада) [1], кимберлитовых породах поля Лак де Гра (Канада) [12] и провинции Кимберли (ЮАР) [14]. Настоящее исследование посвящено изучению кристаллов апатита, отобранных из протолочных проб и диагностированных в аншлифах наименее измененных разностей кимберлитовых пород, слагающих трубку Манчары, расположенную в северной части Алданской антеклизы.

Общая характеристика кимберлитов

В Центральной Якутии установлено шесть кимберлитовых трубок, первой из которых была открыта Манчары [15], находящаяся в 100 км южнее г. Якутск (рис. 1), в пределах среднепалеозойского [16] Хомпу-Майского кимберлитового

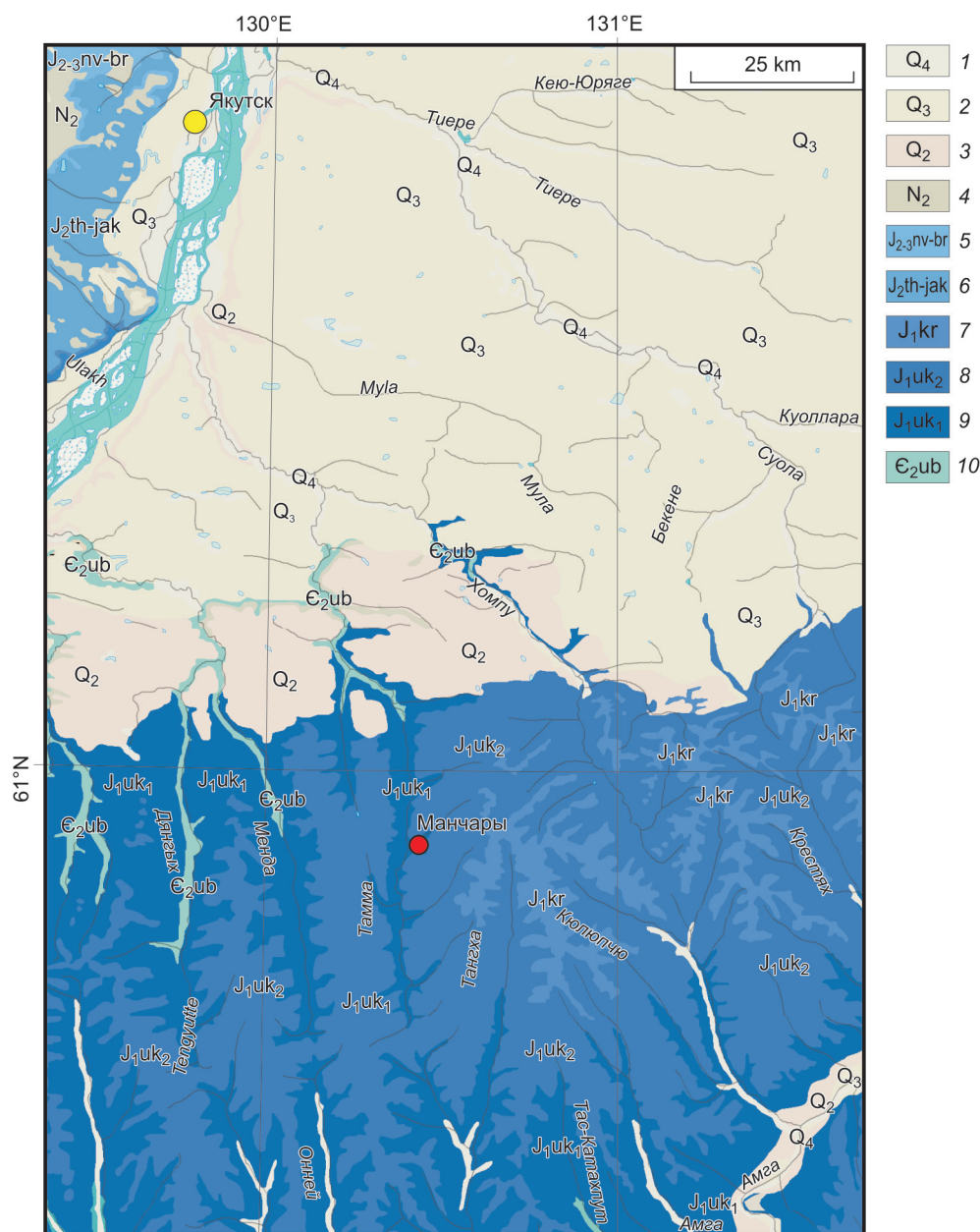


Рис. 1. Геологическая позиция трубки Манчары [17]:

1 – голоцен, Q₄; 2 – плейстоцен, верхнее звено, Q₃; 3 – плейстоцен, среднее звено, Q₂; 4 – отложения неогена, N₂; 5 – юрские отложения, средний отдел, келловейский ярус, нижневильюйская свита – верхний отдел, кимериджский – волжский ярусы, берегинская свита, J₂₋₃nv-br; 6 – юрские отложения, ааленский ярус, верхний подъярус–батский ярус, лохайнские слои (J₂lh) – якутская свита, J₂jak; 7 – юрские отложения, плинсбахский ярус, красноалданская свита, J₁kr; 8 – юрские отложения, плинсбахский ярус, укугитская свита, верхняя подсвита, J₁uk₂; 9 – юрские отложения, плинсбахский ярус, укугитская свита, нижняя подсвита, J₁uk₁; 10 – карбонатные отложения кембрия, E₂ub.

Fig. 1. Geological position of the manchary pipe [17]:

1 – the Holocene, Q₄; 2 – the Pleistocene, Upper, Q₃; 3 – the Pleistocene, Middle, Q₂; 4 – the Neocene, N₂; 5 – the Jurassic, Middle, the Callovian, the Lower Vilyuiskaya suite – Upper, the Kimmeridgian – the Volgian stages, Beregeinskaya suite J₂₋₃nv-br; 6 – the Jurassic, the Aalenskiy stage, the Upper Substage – Batskiy stage, the Lokhainskiy layers (J₂lh) – the Yakutskaya suite J₂jak; 7 – the Jurassic, the Plinsbakhskiy stage, the Krasoaldanskaya suite, J₁kr; 8 – the Jusrassic, the Plinsbakhskiy stage, the Ukugitskaya suite, the lower subsuite, J₁uk₂; 9 – the Jurassic, the Plinsbakhskiy stage, the Ukugitskaya suite, the lower subsuite, J₁uk₁; 10 – Cambrian carbonate deposits, E₂ub.

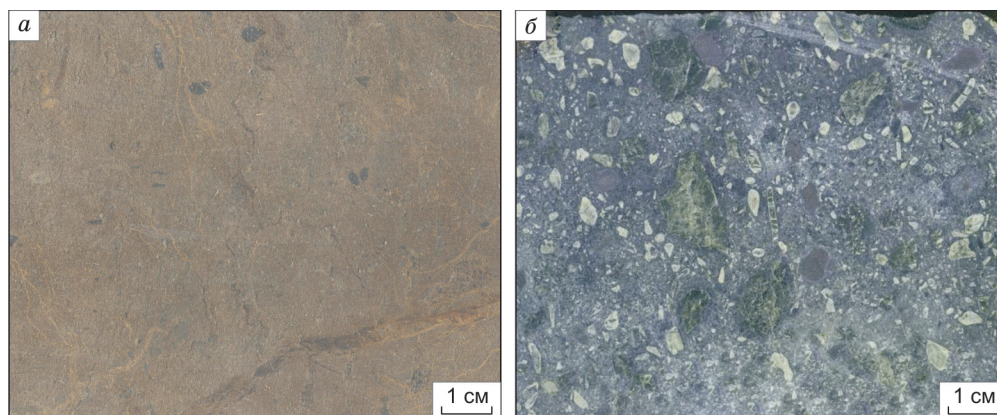


Рис. 2. Образцы кимберлита из трубки Манчары:

a – интенсивно карбонизированный кимберлит с нечетко выраженными структурными признаками, текстура неоднородная, глубина 15 м от поверхности диатремы; *б* – крупнопорфировый кимберлит, структура порфировая, текстура неоднородная, глубина 56 м от поверхности диатремы.

Fig. 2. Kimberlite samples from the Manchary pipe:

a – intensively carbonitized kimberlite with light structural characteristics, uneven texture, 15 m deep from the diatreme surface; *b* – magnophyric kimberlite, porphyritic structure, uneven structure, 56 m deep from the diatreme surface.

поля. Трубка Манчары, диатрема которой достигает 250 м в диаметре, перекрыта юрскими терригенными толщами мощностью около 100 м [15] и вскрыта скважинами на глубину более 100 м. Тело сложено порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией, между которыми, по мере сокращения количества ксенолитов осадочных пород, существуют постепенные переходы. Породы верхних горизонтов (рис. 2, *a*) сильно карбонизированы, окварцованы и гипергенно изменены на глубину около 20 м, о чем свидетельствует присутствие большого количества вторичных карбонатов переменного состава (доломита, магнезита, сидерита, анкерита и магнезиального кальцита), кварца и монтмориллонита. В кимберлитовых породах, слагающих трубку Манчары, присутствуют ксенолиты серпентинитов, осадочных пород, измененных метаморфических пород и слюдитов. Также встречаются мега-, макрокристаллы флогопита, пиропы, пикроильменита, макрокристаллы хромшпинелида и псевдоморфозы серпентина по вкрапленникам оливина. Основная масса наименее измененных кимберлитов глубоких горизонтов (рис. 2, *б*) сложена преимущественно мелкопластинчатым флогопитом, ксеноморфными выделениями серпентина и карбоната. Кроме того, в мезостазисе установлены перовскит, апатит и минералы ряда магнетит–хромшпинелид. К настоящему времени в публикациях рассмотрены общие петрографи-

ческие особенности состава трубки [15] и результаты изучения флогопита [17], хромистой шпинели [18] и пикроильменита [19].

Методика исследования

Строение кристаллов, их зональность и взаимоотношение апатита с другими минералами изучены в аншлифах в ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА. Определение химического состава зерен апатита ($n = 45$) из протоочных проб, наименее измененных кимберлитовых пород, заключенных в отполированные шашки из эпоксидной смолы, проводилось рентгеноспектральным методом на микрозондовом анализаторе JXA-8230 с волновым спектрометром в Центральной аналитической лаборатории НИГП АК «АЛРОСА» (аналитик А.С. Иванов).

Морфология кристаллов и химический состав минерала

Зерна апатита встречаются в мелкозернистой серпентин-карбонатной матрице вместе с лейстами флогопита и ксеноморфными зернами перовскита (рис. 3, *a*). В протоочных пробах и аншлифах апатит диагностирован большей частью в виде водяно-прозрачных кристаллов, имеющих гексагонально-призматический габитус со степе-

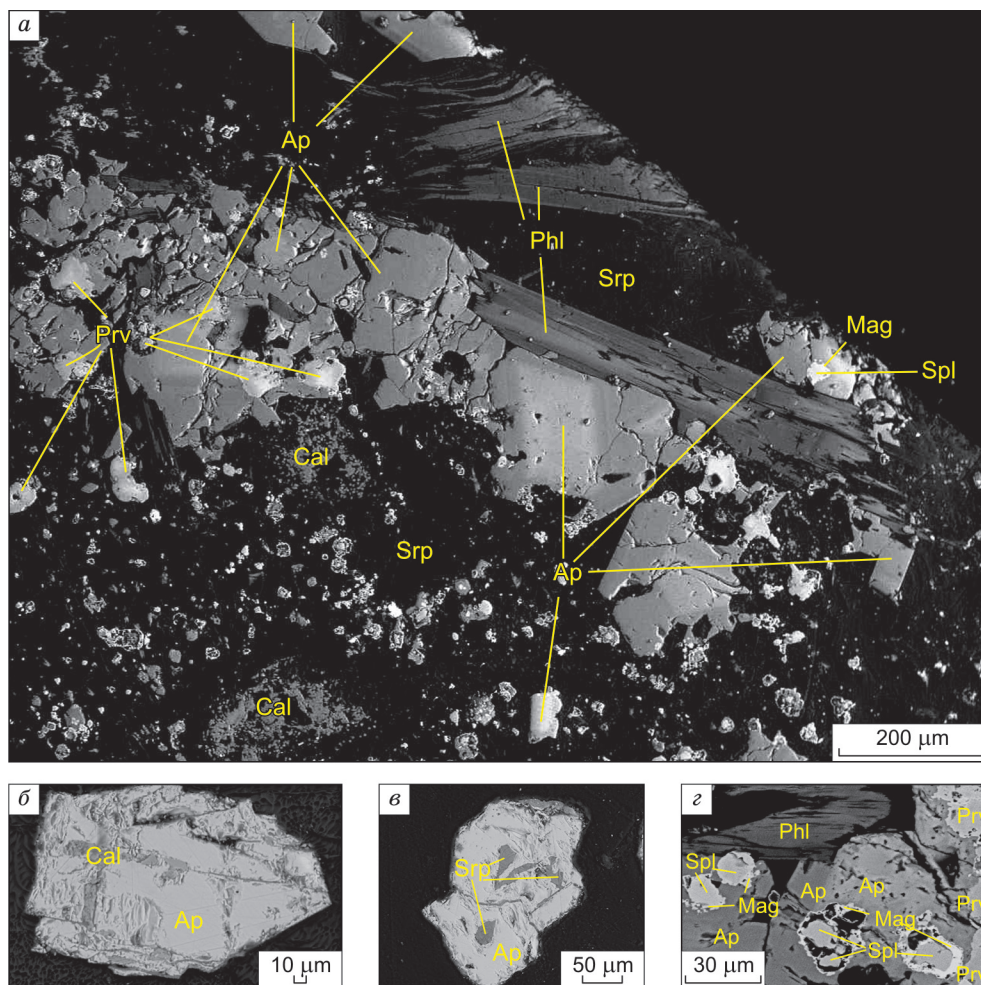


Рис. 3. Апатит из кимберлитовых пород трубки Манчары:

a – зерна апатита в кимберлите трубки Манчары; *б* – зерно апатита с выделениями кальцита; *в* – ксеноморфное зерно апатита с выделениями серпентина; *г* – край зонального зерна апатита со сростками перовскита и с питтингами, заполненными атоллоидными агрегатами феррошпинели и магнетита; Ap – апатит, Spl – феррошпинель, Mag – магнетит, Prv – перовскит, Cal – кальцит, Srp – серпентин, Phl – флогопит. BSE.

Fig. 3. Apatite from kimberlite rocks of the Manchary pipe:

a – apatite grains in kimberlite of the Manchary pipe; *б* – apatite grain with calcite; *в* – anhedral apatite grain with serpentinite; *г* – rim of zoned apatite grain with perovskite splices and pittings filled with atoll aggregates of ferrospinel and magnetite; Ap – apatite, Spl – ferrospinel, Mag – magnetite, Prv – perovskite, Cal – calcite, Srp – serpentinite, Phl – phlogopite. BSE.

ную удлинения от 1:3 до 1:5, размером от 20 до 500 мкм и иногда образующих скопления в породе (рис. 3, *a*). Изредка встречаются резорбированные ксеноморфные зерна апатита размером от 50 до 100 мкм с питтингами (кавернами) (рис. 3, *б*, *в*). Каверны выполнены выделениями кальцита (см. рис. 3, *б*) и серпентина (см. рис. 3, *в*) и перовскита (рис. 2, *г*). Питтинги также бывают заполнены атоллоидными агрегатами, кайма которых сформирована губчатыми образованиями или пластинчатыми скелетными кристаллами магнетита. Ядра атоллоидных агрегатов (до 25 мкм) представлены феррошпинелью (рис. 3, *г*).

Минералы мезостазиса, выполняющие питтинги, образовались после растворения апатита.

Довольно часто встречаются кристаллы апатита, демонстрирующие химическую зональность (рис. 4), которая обусловлена наличием зон с различным содержанием SrO (табл. 1). Такая зональность апатита устанавливается на сканирующем электронном микроскопе в обратнорассеянных электронах (BSE) (рис. 4). Участки более яркого оттенка отличаются повышенными содержаниями SrO и пониженного CaO, более темного – наоборот (табл. 1). Сканирование по линии, секущей такие зоны, фиксирует различные со-

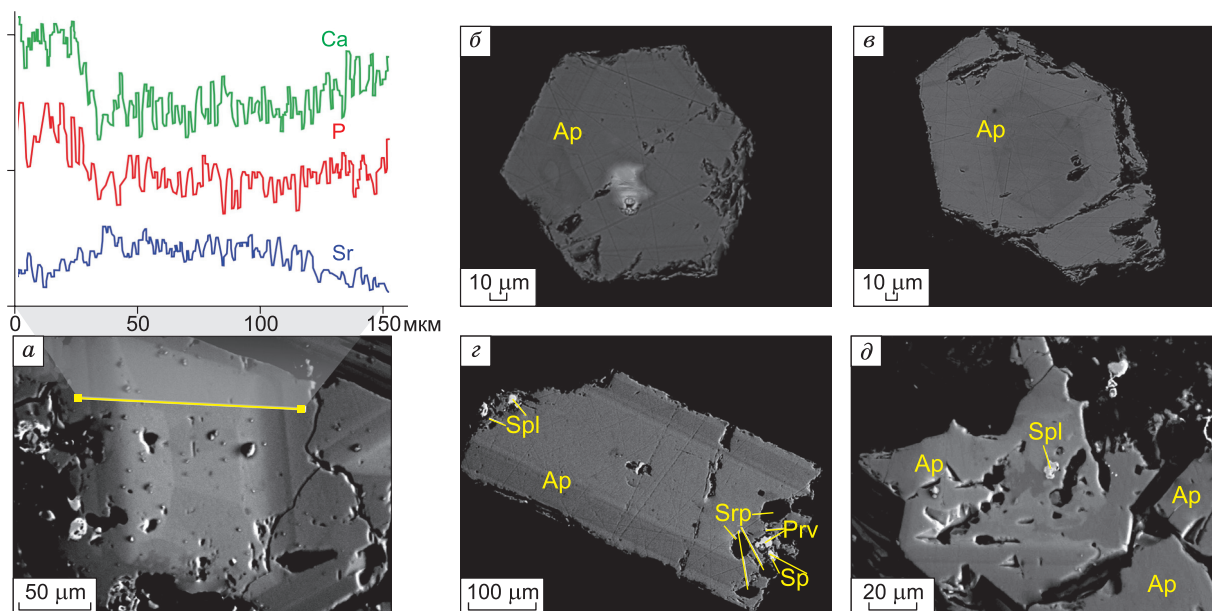


Рис. 4. Зональные кристаллы апатита из трубки Манчары:

а – визуализация сканирования по линии зонального кристалла апатита; *б* – кристалл апатита с обратной зональностью; *в* – кристалл апатита с прямой зональностью; *г* – кристалл апатита с «полоскообразным узором» зональности; *д* – ксеноморфное зерно апатита с диффузной зональностью; Ap – апатит, Spl – феррошпинель, Prv – перовскит, Srp – серпентин. BSE.

Fig. 4. Zoned apatite crystals from the Manchary pipe:

a – visualization of linear scanning of a zoned apatite crystal; *б* – apatite crystal with reverse zoning; *в* – apatite crystal with direct zoning; *г* – apatite crystal with a «stripe pattern» of zoning; *д* – anhedronal apatite grain with diffuse zoning; Ap – apatite, Spl – ferrospinel, Prv – perovskite, Srp – serpentine. BSE.

Таблица 1

Представительные анализы зональных зерен апатита из трубки Манчары, %

Table 1

Representative analyses of zonal apatite grains from the Manchary pipe, wt. %

Компонент	№ 1		№ 2	
	Светлая зона	Темная зона	Светлая зона	Темная зона
	Центр	Край	Центр	Край
F	2,85	3,12	3,18	3,21
CaO	47,46	50,22	49,47	51,17
P ₂ O ₅	39,44	40,59	39,63	39,46
SiO ₂	0,10	0,00	0,01	0,33
BaO	0,53	0,03	0,08	0,02
Cl	0,09	0,03	0,05	0,09
Ce ₂ O ₃	0,06	0,00	0,03	0,00
La ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,06
SrO	7,54	4,66	5,78	3,53
Nd ₂ O ₃	0,07	0,00	0,00	0,00
Nb ₂ O ₅	0,38	0,34	0,28	0,20
Gd ₂ O ₃	0,00	0,28	0,00	0,20
Total	99,25	98,52	98,51	98,32

Таблица 2

Представительные анализы апатита из трубки Манчары, %

Table 2

Representative analyses of apatite from the Manchary pipe, wt. %

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
F	2,92	3,42	3,08	3,14	3,36	3,05	3,53	2,85	3,36	3,12	2,85	3,11	3,14	3,21	3,53	3,12	3,13	3,46	3,17	3,12	3,21
CaO	45,37	52,52	42,23	48,80	41,53	49,60	52,91	47,46	41,53	48,81	47,46	49,12	48,80	49,10	52,91	48,47	48,55	51,07	48,71	48,60	48,85
P ₂ O ₅	38,55	41,96	37,10	39,18	35,93	40,41	42,12	39,44	35,93	40,67	39,44	40,05	39,18	39,72	42,12	39,64	39,50	41,63	39,97	39,60	39,85
SiO ₂	0,00	0,00	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00
BaO	0,44	0,02	0,10	0,03	0,09	0,10	0,00	0,53	0,09	0,10	0,53	0,02	0,03	0,06	0,00	0,00	0,18	0,00	0,10	0,08	0,17
Cl	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,00	0,14	0,09	0,03	0,01	0,09	0,00	0,03	0,00	0,14	0,00	0,03	0,02	0,11	0,04	0,00
Ce ₂ O ₃	0,02	0,36	2,56	0,01	0,00	0,04	0,19	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00	0,01	0,00	0,19	0,00	0,01	0,16	0,01	0,01	0,03
La ₂ O ₃	0,05	0,12	2,28	0,03	3,03	0,01	0,16	0,00	3,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,16	0,00	0,04	0,09	0,01	0,03	0,00
SrO	9,64	0,07	3,71	6,13	5,04	5,77	0,16	7,54	5,04	5,72	7,54	5,97	6,13	4,86	0,16	6,10	5,96	0,14	5,99	5,43	4,92
Nd ₂ O ₃	0,00	0,28	3,53	0,00	5,49	0,00	0,10	0,07	5,49	0,01	0,07	0,07	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,03
MnO	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00
Nb ₂ O ₅	0,04	0,17	0,30	0,28	0,25	0,18	0,01	0,38	0,25	0,12	0,38	0,23	0,28	0,61	0,01	0,25	0,37	0,10	0,28	0,31	0,05
Yb ₂ O ₃	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
Sm ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,45	0,00	0,12	0,04
Dy ₂ O ₃	0,00	0,51	0,00	0,65	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,22	0,03	0,04	0,00	1,67	0,01	0,00	0,00
Gd ₂ O ₃	0,00	0,96	0,43	0,82	0,35	0,59	0,00	0,00	0,35	0,56	0,00	0,60	0,82	0,00	0,00	0,48	0,64	0,92	0,00	1,28	0,05
Total	97,07	100,47	95,44	99,18	95,10	99,87	99,35	98,52	95,10	99,12	98,52	99,35	99,18	97,78	99,35	98,13	98,57	100,44	98,36	98,64	97,19
X(Fap)	0,82	0,96	0,87	0,88	0,94	0,86	0,99	0,80	0,94	0,88	0,80	0,87	0,88	0,90	0,99	0,88	0,88	0,97	0,89	0,88	0,90
X(Cap)	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00
X(Oap)	0,17	0,03	0,13	0,11	0,05	0,14	0,00	0,19	0,05	0,12	0,19	0,13	0,11	0,10	0,00	0,12	0,12	0,02	0,09	0,12	0,10

держания SrO и CaO в зонах и свидетельствует о выдержанности концентраций этих окислов в пределах каждой отдельной зоны (см. рис. 4, а). По типу узора зональные кристаллы являются концентрическими [1]. В поперечном сечении каждая из зон представлена в виде фигуры, повторяющей контуры внешних границ кристалла – шестиугольники (см. рис. 4, б, в). Зерна, разрезанные при полировке параллельно длинной оси кристалла, в силу отсутствия пирамидальных вершин демонстрируют «полоскообразный» узор (см. рис. 4, г). В обоих случаях встречаются зерна, демонстрирующие как обратный, так и прямой типы зональности. Обратная зональность обусловлена снижением концентраций стронция от центра к краю (см. рис. 4, б), а прямая – увеличением этого компонента в том же направлении (см. рис. 4, в). Наличие этих двух типов зональности говорит о том, что начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило не одномоментно, а как при высокой концентрации стронция в остаточном расплаве, так и при более низких его содержаниях.

Увеличение содержания SrO в апатите приводит к снижению количества CaO (табл. 1). Такие взаимоотношения компонентов были изучены в работе [12] и связаны с изоморфным замещением этих элементов [20] по схеме $\text{Sr}^{2+} \rightarrow \text{Ca}^{2+}$. Разница в содержании стронция между зонами составляет от 2,25 до 4,7 %. Единичные зерна апатита демонстрируют сложную диффузную зональность с наличием ксеноморфных зон (рис. 4, д). Центральная часть такого зерна представляет собой скелетный кристалл, сформировавшийся при пересыщении [21] элементов под влиянием диффузии в присутствии флюидов на позднемагматической стадии. В центре отмечаются зоны как с пониженным (до 4,46 %), так и с повышенным содержанием SrO (до 9,15 %). Краевая часть имеет плоскогранные формы, образование которых связано с падением пересыщения [21] и пониженными концентрациями SrO. В кимберлитовых породах трубки Манчары присутствующий в мезостазисе апатит имеет позднемагматическое происхождение, на что указывает его гексагонально-призматический габитус, предполагающий кристаллизацию из расплава в присутствии флюида [22]. Исследуемый минерал в основной массе кимберлитов трубки Манчары находится в ассоциации с флогопитом, который также зонален по содержанию бария [17]. При этом включения апатита в лейстах флогопита

и включения флогопита в кристаллах апатита обнаружены не были. Таким образом, можно предположить, что образование этих двух минералов проходило одновременно на позднемагматическом этапе в остаточном расплаве под влиянием флюидов, обогащенных барием и стронцием.

Апатит из кимберлитовой трубки Манчары характеризуется повышенными содержаниями SrO (до 9,64 %) (табл. 2), по сравнению с минералами из кимберлитовых трубок Бенфонтейн (ЮАР) [14], Кимберли (ЮАР) [14], Де Бирс (ЮАР) [14], Вэссэлтон (ЮАР) [14], кимберлитовой дайки Снэп Лэйк (Канада) [1], карбонатитов Палаборы (ЮАР) [2], ксенолитов перидотитов из базальтов Яньюань (Китай) [6] и ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8], где содержания этого оксида не превышают 4 % (рис. 5, б). В единичных случаях в кимберлите из трубки Манчары отмечаются зерна с низким содержанием оксида стронция – от 0,07 до 0,16 % (см. табл. 2).

На диаграмме $\text{SrO}-\text{SiO}_2$ (см. рис. 5, б) апатиты трубки Манчары образуют отдельное поле составов, отличаясь от минерала из вышеперечисленных пород за счет высокого содержания стронция. Механизм образования высокостронциевого апатита [23–25] в базальтоидах связан с влиянием отделившихся на позднемагматическом этапе флюидов, богатых Sr [26, 27]. Находки высокостронциевого апатита в кимберлитах могут свидетельствовать о сходных механизмах накопления Sr.

Одна из основных типоморфных особенностей апатита – соотношение в нем F и Cl [4], поскольку концентрации этих элементов выявляют существенные различия в составе апатита из различных кимберлитовых трубок [1]. Количество F в изученных зернах составляет от 2,85 до 3,53 %, Cl – от 0,01 до 0,27 % (см. табл. 2). Большинство исследуемых зерен соответствует фтор-apatиту, что выражается в преобладании фтор-apatитового минала (от 0,82 до 0,99 ф.е.) над хлорапатитовым (от 0,01 до 0,04 ф.е.) и гидроксил-apatитовым (от 0,02 до 0,19 ф.е.). Содержание F в изученных зернах превышает концентрацию фтора в апатите алмазоносной дайки Снэп Лэйк (Канада), где содержание этого элемента составляет от 1,67 до 2,75 % [1]. На диаграмме F–Cl (см. рис. 5, а) фигуративные точки состава апатита из трубки Манчары образуют обособленное поле, не пересекаясь с апатитами из Снэп Лэйк [1], карбонатитов Палаборы (ЮАР) [2],

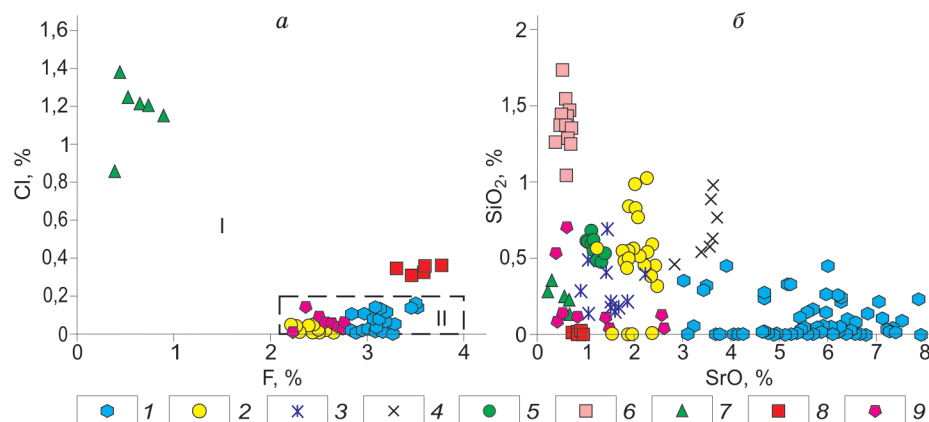


Рис. 5. Особенности состава апатита в координатах F–Cl (а) и SrO–SiO₂ (б):

1 – кимберлитовая трубка Манчары; 2 – кимберлитовая дайка Снэп Лэйк (Канада) [1]; 3 – кимберлиты рудника Де Бирс (ЮАР) [14]; 4 – кимберлиты рудника Кимберли (ЮАР) [14]; 5 – кимберлитовые силлы Весселтон (ЮАР) [14]; 6 – кимберлитовые силлы Бенфонтейн (ЮАР) [14]; 7 – ксенолиты перидотитов Яньюань (Китай) [6]; 8 – ксенолиты эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8], 9 – карбонатиты из карбонатитового комплекса Палабора (ЮАР) [2]. I – апатиты высокотемпературных сухих магм [4], II – апатиты низкотемпературных водных магм [4].

Fig. 5. Features of apatite composition in coordinates F–Cl (a) and SrO–SiO₂ (b):

1 – the Manchary kimberlite pipe; 2 – the Snap Lake kimberlite dike (Canada) [1], 3 – the De Beers mine kimberlites (South Africa) [14]; 4 – kimberlites of the Kimberly mine (South Africa) [14]; 5 – the Wesselton kimberlite sills (South Africa) [14]; 6 – the Benfontein kimberlite sills (South Africa) [14]; 7 – xenoliths of the Yangyuan peridotites (China) [6]; 8 – xenoliths of eclogites from the Jericho Kimberlite pipe (Canada) [8]; 9 – carbonatites from the Palabora carbonatite complex (South Africa) [2]. I – apatites of high-temperature dry magmas [4], II – apatites of low-temperature water magmas [4].

ксенолитов перидотитов из базальтов Яньюань (Китай) [6] и ксенолитов эклогитов из кимберлитовой трубки Иерихон (Канада) [8] (см. рис. 5). Таким образом, необычно высокое содержание фтора при низком хлоре является типоморфным признаком апатита из Хомпу-Майского поля.

Содержания фтора в апатите выдержаны и не зависят от концентрации SrO. В бариевом флогопите [17], находящемся в ассоциации с исследуемым апатитом, содержания фтора установлены не были, что также косвенно свидетельствует об одновременной кристаллизации флогопита и апатита, забравшего весь фтор из остаточного расплава.

Содержание хлора в апатите из трубки Манчары, как и из дайки Снэп Лэйк [1], не превышает 0,27 % (см. табл. 2). Наиболее высокие содержания хлора (см. рис. 5, а) отмечаются в ксенолитах перидотитов [6] и эклогитов [8].

По соотношению галогенов апатит из кимберлитов трубки Манчары, как и из кимберлитовой дайки Снэп Лэйк [1], и карбонатитов [2] на диаграмме F–Cl попадает в область фосфатов низкотемпературных водных магм [4] (см. рис. 5), что согласуется с позднемагматическим происхождением исследуемого минерала.

Изучение химического состава апатита из кимберлитовой трубки Манчары показало, что кро-

ме основных компонентов присутствуют примеси Ce₂O₃ (от 0,01 до 2,56 %) и Nb₂O₅ (от 0,01 до 0,61 %) (см. табл. 2). Другие примеси: SiO₂, BaO, MnO, La₂O₃, Nd₂O₃, Yb₂O₃, Sm₂O₃, Dy₂O₃, Gd₂O₃, в пределах чувствительности метода зафиксированы только в отдельных зернах (см. табл. 2). Таким образом, состав апатита показывает, что флюид, участвующий в кристаллизации пород, обогащен прежде всего стронцием и фтором.

Заключение

Проведенные исследования показали, что апатит из кимберлитовой трубки Манчары является стронциевым фторапатитом. Это выражается в преобладании фторапатитового минала (см. табл. 1) и высоком содержании стронция (до 9,64 %). В результате изучения зонального стронциевого фторапатита установлено изменение поведения SrO на позднемагматической стадии формирования кимберлитовой трубки Манчары. Начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило не одномоментно – как при высокой концентрации стронция в остаточном расплаве, так и при низких его содержаниях, что в ряде случаев проявляется в виде обратного и прямого типов зональности. Высокие содержания стронция, совместная кристал-

лизация с бариевым флогопитом, а также морфологические особенности зерен апатита из трубки Манчары указывают на его кристаллизацию на позднемагматическом этапе из остаточного расплава при участии флюида. Присутствие минералов мезостазиса, заполняющих питтинги в зернах апатита, – кальцита, серпентина и атоллоидных агрегатов феррошпинели и магнетита – свидетельствует об их кристаллизации после апатита. Различия в составах апатита из трубки Манчары и из алмазоносных кимберлитовых тел [1, 14], карбонатитов [2], ксенолитов перидотитов [6] и эклогитов [8] ЮАР, Канады и Китая указывают на наличие типоморфных особенностей минерала для каждого объекта, что позволяет использовать примесный состав апатита в сравнительном изучении кимберлитовых и других пород.

Литература

1. Milligan R.S. Features of apatite in kimberlite from Ekati Diamond Mine and Snap Lake: modelling kimberlite composition // Thesis for the degree of Master of Science. Dalhousie University. 2017. 97 p. <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/73521>
2. Giebel R.J., Marks M.A.W., Gauert C.D.K., Markl G. A model for the formation of carbonatite-phoscorite assemblages based on the compositional variations of mica and apatite from the Palabora Carbonatite Complex, South Africa // *Lithos*. 2019. Vol. 324–325. P. 89–104.
3. Anzolin H. de M., Dani N., Remus M.V.D., Ribeiro R. da R., Nunes A.R., Ruppel K.M.V. Apatite multi-generations in the Três Estradas Carbonatite, Southern Brazil: physical and chemistry meaning and implications to phosphate ore quality // *Brazilian Journal of Geology*. 2019. Vol. 49(2). P. 1–17.
4. Бушляков И.Н., Холоднов В.В. Галогены в петрогенезисе гранитоидов. М.: Недра, 1986. 192 с.
5. Macdonald R., Baginski B., Dzierzanowski P., Jokubauskas P. Apatite-supergrain minerals in UK Palaeogene granites: Composition and relationship to host-rock composition // *European Journal of Mineralogy*. 2013. Vol. 25 (3). P. 461–471.
6. Zhao X.-M., Zhang H.-F., Zhu X.-K., Zhu B., Cao H. Effects of melt percolation on iron isotopic variation in peridotites from Yangyuan, North China Craton // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 401. P. 96–110.
7. Morishita T., Hattori K.H., Terada K., Matsumoto T., Yamamoto K., Takebe M., Arai S. Geochemistry of apatite-rich layers in the Finero phlogopite-peridotite massif (Italian Western Alps) and ion microprobe dating of apatite // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 251(1–4). P. 99–111.
8. Heaman L.M., Creaser R.A., Cookenboo H.O., Chacko T. Multi-stage modification of the Northern Slave mantle lithosphere: Evidence from zircon- and diamond-bearing eclogite xenoliths entrained in Jericho kimberlite, Canada // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47(4). P. 821–858.
9. Рахимов И.Р., Холоднов В.В., Салихов Д.Н. Акцессорные апатиты из габброидов позднего девона-раннего карбона Западно-Магнитогорской зоны: особенности морфологии и химического состава, индикаторная металлогеническая роль // *Геологический вестник*. 2018. № 3. С. 109–123.
10. Zhang C., Koepeke J., Albrecht M., Horn I., Holtz F. Apatite in the dike-gabbro transition zone of mid-ocean ridge: Evidence for brine assimilation by axial melt lens // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102 (3). P. 558–570.
11. Vasyukova E. Trace elements of apatite from alkaline lamprophyres from the rocks SE Altay-NE Mongolia // *Geophysical Research Abstracts*. 2019. Vol. 21. EGU2019-19184.
12. Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40 (1). P. 121–136.
13. Scott B.H. Kimberlite and Lamproite Dykes from Holsteinsborg, West Greenland // *Meddelelser om Grønland. Geoscience*. 1981. Vol. 4. 24 p.
14. Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite from the Kimberley kimberlites (South Africa): petrography and mineral chemistry // *International Kimberlite Conference, Gaborone 2017*. Vol. 11.
15. Смеров А.П., Андреев А.П., Алтухова З.А. и др. Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. № 1. С. 153–159.
16. Зайцев А.И., Смеров А.П., Алтухова З.А. Первые данные по изотопному составу стронция и возрасту кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2010. № 5. С. 51–59.
17. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2017. № 5. С. 37–44.
18. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. № 5. С. 35–41.
19. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2019. № 6. С. 43–49.
20. Пушарковский Д.Ю., Надежина Т.Н., Хомяков А.П. Кристаллическая структура стронций-apatита из Хибин // *Кристаллография*. 1987. Т. 32, № 4. С. 891–895.
21. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995. 228 с.
22. Wyllie P.J., Cox K.G., Biggar G.M. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks // *Journal of Petrology*. 1962. Vol. 3. P. 238–243.

23. Watson E.B., Green T. H. Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 56. P. 405–421.

24. Prowatke S., Klemme S. Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 4513–4527.

25. Ayers J.C., Watson E.B. Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000° C and application to models of fluid-rock interaction // *Chemical Geology*. 1993. Vol. 110. P. 299–314.

26. Соловова И.П., Гирнис А. В., Рябчиков И.Д., Конюкова Н.Н. Механизмы образования высокобариевого флогопита и высокостронциевого апита на заключительных стадиях эволюции щелочных магм // *Геохимия*. 2009. № 6. С. 613–627.

27. Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Симакин С.Г. Высокотемпературный карбонатитовый расплав и его взаимоотношения с щелочными магмами Дункельдыкского комплекса, юго-восточный Памир // *Докл. РАН*. 2006. Т. 409. С. 1–4.

Поступила в редакцию 18.06.2020

Принята к публикации 11.08.2020

Об авторах

ОПАРИН Николай Александрович, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, nik3256-1989@yandex.ru;

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, olei-oleg@yandex.ru;

БАРАНОВ Леонид Николаевич, младший научный сотрудник, инженер-исследователь, Научно-исследовательское геологическое предприятие, Акционерная компания «АЛРОСА» (публичное акционерное общество), 678170, Мирный, Чернышевское шоссе, 16, Россия; Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/1, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln95@gmail.com.

Информация для цитирования

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020, Т. 25, № 3. С. 15–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-2>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-2

Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia)

N.A.Oparin^{1,*}, O.B.Oleinikov^{1,**}, L.N. Baranov³

¹*Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*PJSC «ALROSA», Mirny, Russia*

³*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

**nik3256-1989@yandex.ru, ** olei-oleg@yandex.ru*

Abstract. Apatite is a common magmatic mineral. This calcium phosphate acts as a mineral concentrating halogens and strontium, which suggests that it is an indicator of late-stage melt evolution. Kimberlites represent few rocks where apatite has been studied in a limited number of reservoirs. The present paper discusses the results of the analysis of kimberlite apatite grains from the middle Paleozoic kimberlite pipe Manchary (Khompuy-May field, Central Yakutia). The paper reports chemical composition and zone distri-

bution of apatite from kimberlites of the Manchary pipe. We also provide comparative analysis with kimberlite apatites (Canada, RSA), carbonatites (RSA), peridotite xenoliths in basalt (China), and eclogite xenoliths in kimberlite (Canada). It was found that the mineral in the Manchary kimberlite pipe is a strontium fluorapatite. Analysis of zoning in crystals allowed us to show the behavior of SrO in the formation of kimberlites of the Manchary pipe. Apatite under study was found to be late-stage magmatic, with its composition being affected by F- and Sr-rich fluids. Differences of apatite from the Manchary pipe and diamond-bearing kimberlite bodies, carbonatites, peridotite xenoliths, and eclogites in RSA, Canada and China indicate typomorphic characteristics of the mineral for particular magmatic systems with strontium- and volatile-rich fluids which allows one to use doped apatite for comparative studies of kimberlites and other rocks.

Key words: apatite, strontium, kimberlite pipe, Khompu-May field, Central Yakutia.

Acknowledgements. The work was carried out as part of the scientific research of the Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No. 0381-2019-0003).

References

1. Milligan R.S. Features of apatite in kimberlite from Ekati Diamond Mine and Snap Lake: modelling kimberlite composition // Thesis for the degree of Master of Science. Dalhousie University. 2017. 97 p. <https://dalspace.library.dal.ca/handle/10222/73521>
2. Giebel R.J., Marks M.A.W., Gauert C.D.K., Markl G. A model for the formation of carbonatite-phoscorite assemblages based on the compositional variations of mica and apatite from the Palabora Carbonatite Complex, South Africa // *Lithos*. 2019. Vol. 324–325. P. 89–104.
3. Anzolin H. de M., Dani N., Remus M.V.D., Ribeiro R. da R., Nunes A.R., Ruppel K.M.V. Apatite multi-generations in the Três Estradas Carbonatite, Southern Brazil: physical and chemistry meaning and implications to phosphate ore quality // *Brazilian Journal of Geology*. 2019. Vol. 49(2). P. 1–17.
4. Bushlyakov I.N., Holodnov V.V. Galogeny v petrogenезе гранитоидов. Moskva: Nedra, 1986. 192 p.
5. Macdonald R., Baginski B., Dzierzanowski P., Jókubauskas P. Apatite-supergroup minerals in UK Palaeogene granites: Composition and relationship to host-rock composition // *European Journal of Mineralogy*. 2013. Vol. 25 (3). P. 461–471.
6. Zhao X.-M., Zhang H.-F., Zhu X.-K., Zhu B., Cao H. Effects of melt percolation on iron isotopic variation in peridotites from Yangyuan, North China Craton // *Chemical Geology*. 2015. Vol. 401. P. 96–110.
7. Morishita T., Hattori K.H., Terada K., Matsumoto T., Yamamoto K., Takebe M., Arai S. Geochemistry of apatite-rich layers in the Finero phlogopite–peridotite massif (Italian Western Alps) and ion microprobe dating of apatite // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 251(1–4). P. 99–111.
8. Heaman L.M., Creaser R.A., Cookenboo H.O., Chacko T. Multi-stage modification of the Northern Slave mantle lithosphere: Evidence from zircon- and diamond-bearing eclogite xenoliths entrained in Jericho kimberlite, Canada // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47(4). P. 821–858.
9. Rahimov I.R., Holodnov V.V., Salihov D.N. Акцессорные апатиты из габброидов позднего девона – раннего карбона Заpadно-Magnitогорской зоны: особенности морфологии и химического состава, индикаторная металлогеническая роль // *Геологический вестник*. 2018. No. 3. P. 109–123.
10. Zhang C., Koepke J., Albrecht M., Horn I., Holtz F. Apatite in the dike-gabbro transition zone of mid-ocean ridge: Evidence for brine assimilation by axial melt lens // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102 (3). P. 558–570.
11. Vasyukova E. Trace elements of apatite from alkaline lamprophyres from the rocks SE Altay-NE Mongolia // *Geophysical Research Abstracts*. 2019. Vol. 21. EGU2019-19184.
12. Chakhmouradian A.R., Reguir E.P., Mitchell R.H. Strontium-apatite: new occurrences, and the extent of Sr-for-Ca substitution in apatite-group minerals // *The Canadian Mineralogist*. 2002. Vol. 40 (1). P. 121–136.
13. Scott B.H. Kimberlite and Lamproite Dykes from Holsteinsborg, West Greenland // *Meddelelser om Grønland. Geoscience*. 1981. Vol. 4. 24 p.
14. Soltys A., Giuliani A., Phillips D. Apatite from the Kimberley kimberlites (South Africa): petrography and mineral chemistry // *International Kimberlite Conference, Gaborone* 2017. Vol. 11.
15. Smelov A.P., Andreev A.P., Altuhova Z.A. et al. Kimberлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. No. 1. P. 153–159.
16. Zajcev A.I., Smelov A.P., Altuhova Z.A. Первые данные по изотопному составу стронция и возрасту кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2010. No. 5. P. 51–59.
17. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Babushkina S.A. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Маяжское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2017. No. 5. P. 37–44.
18. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Маяжского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. No. 5. P. 35–41.
19. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Макрокристаллы пикроилменита кимберлитовых трубок Хомпу-Маяжского

kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // *Otechestvennaya geologiya*. 2019. No. 6. P. 43–49.

20. *Pushcharkovskij D.Yu., Nadezhina T.N., Homyakov A.P.* Kristallicheskaya struktura stroncij-apatita iz Hibin // *Kristallografiya*. 1987. Vol. 32, No. 4. P. 891–895.

21. *Krasnova N.I., Petrov T.G.* Genezis mineral'nyh individov i agregatov. SPb.: Nevskij kur'er, 1995. 228 p.

22. *Wyllie P.J., Cox K.G., Biggar G.M.* The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks // *Journal of Petrology*. 1962. Vol. 3. P. 238–243.

23. *Watson E.B., Green T. H.* Apatite/liuid partition coefficients for the rare earth elements and strontium // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 56. P. 405–421.

24. *Prowatke S., Klemme S.* Trace element partitioning between apatite and silicate melts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 4513–4527.

25. *Ayers J.C., Watson E.B.* Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000° C and application to models of fluid-rock interaction // *Chemical Geology*. 1993. Vol. 110. P. 299–314.

26. *Solovova I.P., Girnis A. V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N.* Mekhanizmy obrazovaniya vysokobarievogo flogopita i vysokostroncievogo apita na zaklyuchitel'nyh stadiyah evolyucii shchelochnyh magm // *Geohimiya*. 2009. No. 6. P. 613–627.

27. *Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Simakin S.G.* Vysokotemperaturnyj karbonatitovyj rasplav i ego vzaimootnosheniya s shchelochnymi magmami Dunkel'dybskogo kompleksa, yugo-vostochnyj Pamir // *Doklady RAN*. 2006. Vol. 409. P. 1–4.

About the authors

OPARIN Nikolay Alexandrovich, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, nik3256-1989@yandex.ru;

OLEYNIKOV Oleg Borisovich, candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, olei-oleg@yandex.ru;

BARANOV Leonid Nickolaevich, junior researcher, research engineer, Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «Alrosa», 16 Chernyshevskoe rd., 678170 Mirny, Russia; V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3/1 Acad. Koptug pr., Novosibirsk 630090, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6526-3635>, baranovln95@gmail.com.

Citation

Oparin N.A., Oleinikov O.B., Baranov L.N. Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia) // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 15–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-2>

Позднемеловой Право-Кыринский массив щелочно-полевошпатовых гранитов (Верхояно-Колымская орогенная область)

В.А. Трунилина

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
trunilina40@mail.ru

Аннотация. Рассматривается специфика составов позднемеловых гранитов Право-Кыринского массива щелочно-полевошпатовых гранитов, локализованного на границе Селенняхского синклинория и Тас-Хаяхтахского антиклинория Верхояно-Колымской орогенной области и сопровождающегося редкоземельной минерализацией. Изотопный возраст гранитов 85–94 млн лет. Показано, что граниты принадлежат к А-типу посторогенной геодинамической обстановки. Материнский расплав генерировался в глубоко метаморфизованных субстратах нижней коры под воздействием тепла и флюидов, продуцируемых глубинными мантийными магмами. Граниты характеризуются высокой степенью дифференциации, повышенной щелочностью, сочетанием в составе высокотемпературных, характерных для основных пород, и низкотемпературных, «гранитных», породообразующих и акцессорных минералов; высокой ролью хлора при кристаллизации. По этим признакам и присутствию даек трахидолеритов в контуре массива и его экзоконтактов предполагается наличие в пределах территории погребенного очага основных расплавов, активизация которых в позднем мелу обусловила повторное плавление коровых субстратов.

Ключевые слова: граниты, геодинамическая обстановка, субстраты магмогенерации, типоморфизм минералов, мантийно-коровое взаимодействие.

Благодарности. Работа выполнена по государственному заданию Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Автор выражает благодарность всем сотрудникам, проводившим аналитические исследования. Особенно признателен автор С.П. Роеву за помощь в подготовке картографических материалов.

Введение

Граниты А-типа привлекают внимание исследователей как возможные источники редкометалльного и редкоземельного оруденения. Петро- и геохимические особенности этих пород широко варьируют, как и ассоциирующее с ними оруденение. Также разнообразны и дискуссионны представления об их генезисе: синтексис мантийных и коровых расплавов [1, 2], предельная фракционная дифференциация гранитоидных очагов [3], дифференциация мантийных магм [4]. Авторами на северо-востоке Верхояно-Колымской орогенной области установлено широкое распространение гранитов А-типа и выделено несколько их разновидностей со Sn–W-, Ta–Nb-, Li-, Au–U-, REE-оруденением и с возрастом от неопротерозоя до позднего мела [5]. В статье приведены результаты изучения гранитов поздне-мелового массива, локализованного на границе

Селенняхского синклинория и Тас-Хаяхтахского антиклинория, с ассоциированной редкоземельной минерализацией. Целью исследований являлось установление типоморфных и генетических особенностей и геохимической специализации гранитов. Актуальность исследований определяется необходимостью определения генезиса и типоморфных особенностей позднемеловых гранитов – возможных источников редкоземельной минерализации, что может способствовать поискам подобных образований на территории Верхояно-Колымской орогенной области.

Методика исследований

Методика работ включала: изучение строения массива в полевых условиях, опробование входящих в его состав пород, изучение их петрографического состава, полный силикатный анализ (аналитики Д.А. Кулагина, Г.Н. Охлопкова,

С.Е. Дьяконова), количественный спектральный и атомно-абсорбционный анализы (Н.Н. Олейникова, Н.М. Таюрская, А.С. Васильева, О.Д. Замийская, З.В. Хохрякова); определение составов породообразующих и акцессорных минералов на микроанализаторе Camebax-micro (С.П. Роев, Л.А. Павлова). Изотопный возраст гранитов определен А.И. Зайцевым по валовым пробам Rb–Sr методом по образцам автора. Все эти анализы выполнены в лаборатории физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН. Кроме того, в спектральной лаборатории Института геохимии СО РАН под руководством О.В. Зарубиной проведено определение содержаний элементов-примесей (в том числе редкоземельных элементов) методом ИСП-МС. Расчеты P – T -условий магмогенерации и кристаллизации выполнены в основном по программе GCDkit, программы расчетов составов и параметров кристаллизации темноцветных минералов указаны в примечаниях к таблицам.

Геологическое строение территории

Рассматриваемая территория локализована на границе Селенняхского синклинория и Тас-Хаяхского антиклинория Верхояно-Колымской орогенной области. В ее геологическом строении принимают участие мощные толщи осадочных и метаморфизованных пород нижнего палеозоя – раннего мела. Широко развиты позднеюрские вулканогенные образования Уяндино-Ясачненской энсиалической палеоостровной дуги [6]. Осадочные толщи прорваны многочисленными интрузиями с возрастом от верхнего ордовика до позднего мела (ордовикские метаморфизованные базиты и ультрабазиты, силурийские и раннедевонские силлы и дайки основного состава, позднеюрские массивы и дайки диорит-гранитного состава, массивы ранне- и позднемеловых гранитоидов, позднемеловые дайки трахидолеритов) (рис. 1). Наиболее интенсивным был меловой магматизм, сопровождавшийся многочисленными проявлениями разнообразных полезных ископаемых, основными из которых являются золото, серебро и олово. В пределах и в ореолах Право-Кыринского массива при геолого-поисковых работах установлена редкоземельная минерализация (La, Ce, Yb).

Геологическое строение и состав массива

Право-Кыринский массив интрузирует полого-моноклинально залегающие вулканогенные толщи догдинской свиты поздней юры и перекрывается ими. Эродированные участки наблюдаются

только вдоль тальвега правого притока р. Кыра, прорезающего массив в северо-западном направлении и заложенного вдоль зоны разлома. Массив имеет форму крутопадающего трещинного тела, приуроченного к зоне пересечения этого разлома и разлома северо-восточного простирания, по которому заложена долина р. Кыра.

Массив сложен мелко- и среднезернистыми порфировидными лейкогранитами, с отклонениями к граносиенитам и кварцевым сиенитам в эндоконтактах. В гранитах наблюдаются многочисленные пегматоидные обособления. Нередки миаролы, заполненные крупнокристаллическим кальцитом с вкрапленностью редкоземельных минералов. Вмещающие вулканогенно-терригенные породы пронизаны мелкими апофизами гранит- и граносиенит-порфиров. Жильная фация представлена мелко-среднезернистыми аляскитами и аплитовидными гранитами, приуроченными к системе субширотных и северо-восточных тектонических нарушений, повторные подвижки по которым сопровождаются интенсивной биотитизацией, турмалинизацией и сульфидизацией пород. К северо-восточной системе нарушений приурочены единичные дайки трахидолеритов. Изотопный возраст гранитов 85–94 млн лет.

Петрография и минералогия гранитов

Граниты лейкократовые, с суммой темноцветов не более 5 %, незначительно возрастающей у контактов. Структура их весьма своеобразна. Здесь короткопризматические зерна магнезиоавгита и таблички многозонального андезин-лабрадора с ядрами битовнита или анортита (до 95 % an) образуют обособленные блоки, погруженные в мелкозернистый пегматоидный лейкогранитный или аляскитовый матрикс, что прямо свидетельствует о кристаллизации при смешении магм разного состава. По соотношениям железистости и содержаний TiO_2 и стабильно повышенным содержаниям Cr_2O_3 (табл. 1) магнезиоавгит сопоставим с клинопироксенами пикрит-базальтовых ассоциаций континентов [14].

В окружающем гранитном матриксе первым кристаллизовались санидин или анортитоклаз и находящийся в виде идиоморфных включений в них геденбергит или ферроавгит ($f = 83–86\%$) со стабильным присутствием эгириновой молекулы ($0,7–2,7\%$). Спорадически в санидине отмечаются также округлой формы включения фаялита ($f = 80–90\%$). Во второй этап образовался мезопертитовый кали-натровый полевой шпат с близкими соотношениями пертитов альбита и

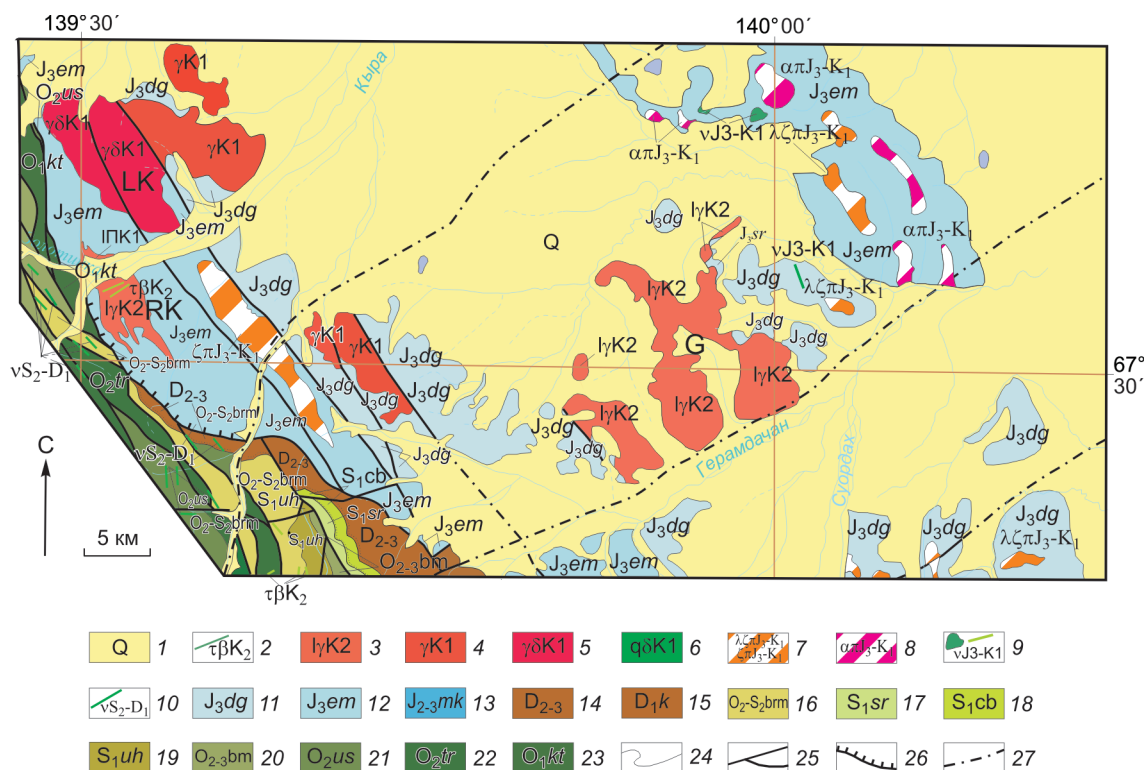


Рис. 1. Геологическая карта зоны сочленения Селеняхского синклиория и Тас-Хаяхтахского антиклинория (Федянин А.Н. и др., 2008 г., с уточнениями авторов).

1 – четвертичные отложения. Интрузивные и субвулканические образования: 2 – трахибазальты и трахидолериты K_2 -Pg, 3 – лейкограниты K_2 , 4 – граниты K_1 , 5 – гранодиориты и кварцевые диориты K_1 , 6 – диориты и кварцевые диориты K_1 , 7 – субвулканические дацитовые и риодацитовые порфиры K_1 , 8 – субвулканические андезит-порфиры J_3 - K_1 , 9 – дайки и малые тела габбро-диоритов и диабазов J_3 - K_1 , 10 – дайки микрогаббро S_2 - D_1 . Стратифицированные образования: 11 – догдинская свита (риолиты, дациты, их туфы, туффиты, алевролиты, углистые аргиллиты), 12 – эмтанжинская свита: андезиты, андезидациты, их туфы, туффиты, редкие пласты андезибазальтов, алевролитов и углистые аргиллиты; 13 – мукдуканская свита (базальты, андезиты), 14 – известняки и мраморы D_1 , 15 – кеберининская толща D_{2-3} : конглобрекции, конгломераты, гравелиты, доломиты, мергели; 16 – O_2 - S_2brm : нерасчлененные биогенно-рифидные массивы, калькарудиты, мергели и карбонатно-глинистые сланцы; 17 – сюрюктяхская свита S_1sr : доломиты, известняки, мергели; 18 – чибагалахская свита S_1cb : коралловые известняки, известковистые алевролиты, рифогенные конглобрекции; 19 – ухватахская свита S_1uh : известняки биоморфные и биокластитовые; глинистые и известково-глинистые сланцы с граптолитами; калькарудиты; 20 – биомикститовая толща O_{2-3bm} : биомикситы алевритодоломитовые и алевритомергелистые, известняки биомикритовые, оолитовые известняки; 21 – усунская свита O_{2us} : известняки, мергели, туффиты, туфоалевролиты; 22 – тарынг-юряхская свита O_{2tr} : биомикситы, известняки биомикриты, оолитовые и пеллоидно-онколитовые известняки, известковистые алевролиты; 23 – кутуканская толща O_{1kt} : калькарудиты, кварц-доломитовые алевролиты, биогенные известняки. 24 – геологические границы; 25 – разломы; 26 – надвиги; 27 – разломы, предполагаемые под покровом рыхлых отложений. Массивы: Герамдачанский (G), Право-Кыринский (R-K), Лео-Кыринский (L-K).

Fig. 1. Geological map of the zone of junction of the Sellenyakh synclinorium and the Tas-Khayakhtakh anticlinorium (Fedyanin et al., 2008, with clarifications by the authors).

1 – Quaternary deposits. Intrusive and subvolcanic formations: 2 – trachybasalts and trachydolerites K_2 -Pg, 3 – leucogranites K_2 , 4 – granites K_1 , 5 – granodiorites and quartz diorites K_1 , 6 – diorites and quartz diorites K_1 , 7 – subvolcanic dacite and rhyodacite porphyry K_1 , 8 – subvolcanic andesite-porphyrity J_3 - K_1 , 9 – small bodies and dikes of gabbro-diorites and diabases J_3 - K_1 ; 10 – dikes of microgabbro S_2 - D_1 . Stratified formations: 11 – Dogdinskaya formation (rhyolites, dacites, their tufts, tuffites, siltstones, carbonaceous claystones); 12 – Emtandzinskaya formation: andesites, andesidacites, their tufts, tuffites, siltstones, carbonaceous claystones; 13 – Mukdukanskaya formation: basaltes, andesites, 14 – marlstones and marbles D_1 ; 15 – Keberininskaya strata D_{2-3} : breccias-conglomerates, conglomerates, gritstones, dolomites, marlstones; 16 – O_2 - S_2brm : undissected biogenic-reefoid massifs, calcarudites, marlstones and carbonate-clay shales; 17 – Syuryuktyakhskaya formation S_1sr : dolomites, limestones, marlstones; 18 – Chibagalkhskaya formation S_1cb : coral limestones, calcareous siltstones, reef breccia-conglomerates; 19 – Ukhvatskaya formation S_1uh : biomorphic and bioclastic limestones; clay and calcaceous-clay shales with graptolites; calcarudites; 20 – biomixtite strata O_{2-3bm} : biomixyites and silty-dolomite and silty-marl, biomicrite limestones; oolitic limestones; 21 – Usunskaya formation O_{2us} : limestones, marlstones, tuffites, tuff siltstones; 22 – Taryng-Yuryakhskaya formation O_{2tr} : biomixtites, limestones biomicrites, oolitic and peloid-oncolite limestones, calcareous siltstones; 23 – Kutukanskaya strata O_{1kt} : calcarudites, quartz-dolomite siltstones, biogenic limestones, 24 – geological boundaries; 25 – faults; 26 – thrusts; 27 – supposed faults. RK – Right-Kyrinsky massif, LK – left Kyrinsky massif, G – Geramdachansky massif.

Таблица 1

Составы темноцветных минералов гранитов Право-Кыринского массива, мас. %

Table 1

Compositions of dark-colored minerals of granites of the Pravo-Kyrinsky massif, wt. %

Номер образца	Номер анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	F	H ₂ O	Сумма	f, %	al, %	T, °C	-Log fO ₂	P, ГПа	H ₂ O % in melt
4107/9	1	52,74	0,41	1,81	0,67	1,42	4,61	0,16	17,52	19,68	0,39	0.				99,41	15,8		1199		1,2	
	2	53,34	0,37	2,93	0,76	0,64	6,05	0.	16,48	18,77	0,92	0				100,26	18,4				1,0	
	3	54,07	0,37	2,71	0,80	0	5,42	0	17,59	19,29	0,43	0				100,68	14,7		1287		0,9	
	4	37,19	0,34	8,91	0,02	7,53	24,66	0,19	2,91	10,86	1,62	2,67	3,21	0,06	0,88	100,95	85,7		787		0,5	
	5	38,07	0,33	10,88	0,22	7,59	22,87	0,21	2,98	10,75	1,51	2,32	2,41	0,04	1,13	101,30	84,9		761		0,78	
	6	44,61	0,57	23,80	0	0	17,54	1,70	0,48	0,01	0,04	9,95	0,04	1,20	1,36	101,29	97,3					
	7	35,00	0,31	12,17	0	6,83	28,11	0,09	3,75	0.	0,06	7,90	3,92	0,11	2,56	100,81	83,7	17,2	568	18	0,1	12
	8	37,25	1,35	10,97	0	5,31	22,31	0,09	8,10	0,01	0,03	8,68	1,91	0,64	3,92	100,57	65,2	15,2	504	16,1	0,05	
4108/9	9	36,01	0,93	13,04	0	5,17	28,44	0,91	1,71	0.	0.	8,89	1,24	0,58	3,00	99,92	91,6	18,8	594	18,5	0,07	12
	10	35,99	0,74	13,05	0,02	5,27	28,15	0,97	2,01	0	0.	8,80	1,14	0,68	3,00	99,83	90,2	18,8	630	18,3	0,08	12

Примечания. Анализы выполнены Л.Ф. Павловой и С.П. Роевым в ИГАБМ СО РАН на рентгеновском микроанализаторе Camebax-micro. 1, 3 – магнетит; 4, 5 – гастингситы; 6 – феррихедрит; 7–10 – лепидомеланы. Расчеты: T, °C, – температура и P – давление при кристаллизации минерала. Расчеты пироксенов – [7]. T, P амфиболов [8, 9]; биотитов: H₂O % in melt – содержание воды в расплаве [10]. Определение температур: T, °C [11]; давления P – [12]; log f O₂ – [13]. Незаполненные клетки – элемент не определялся.

Notes. The analyses were performed by L.F. Pavlova and S.P. Roev at IGABM SB RAS using the Camebax-micro x-ray microanalyzer. 1, 3 – magnetite; 4, 5 – hastingsites; 6 – ferrizhedrite; 7–10 – lepidomelans. Calculations: T°C – temperature and P – pressure during crystallization of the mineral. Calculations of pyroxenes – [7]. T, P amphiboles [8, 9]; biotites: H₂O % in melt –water content in the melt [10]. Determination of temperatures: T°C [11]; pressure P – [12]; log f O₂ – [13]. Empty cells – the element was not defined.

высокого или промежуточного ортоклаза и в резко подчиненном количестве – таблички олигоклаз-альбита и изометричные и неправильной формы зерна кварца. Расчеты [15] определяют температуру расплава на этом этапе в 850–856 °С. В третий этап кристаллизовались ксеноморфные зерна кварца либо мелкозернистый пегматит. Амфибол и биотит поздние и постмагматические. Они выполняют интерстиции между зернами силикатных минералов или тонкие прожилковые обособления и несут многочисленные включения рудных минералов, монацита, ортита, ксенотима и недиагностируемые мелкие включения радиоактивных минералов, фиксируемые по плеохроичным дворикам вокруг них. В порфировых породах эндоконтакта первыми кристаллизуются субидиоморфные зерна кварца в срастании и с включениями одноосного санидина. Они образуют относительно крупными зернами высоко ортоклаза с включениями биотита в нем, и уже эти скопления погружены в микропегматитовый или в микрогранитный агрегат.

Амфибол имеет состав железистого гастингсита и характеризуется высоким содержанием щелочей и хлора (см. табл. 1). В протоочках гранитов обнаружены также корродированные зерна

феррижедрита – характерного минерала высоких ступеней метаморфизма. Биотит начинает кристаллизоваться несколько позже амфибола, замещающая его по периферии зерен. В большинстве случаев определяется как лепидомелан. Как и амфибол, обладает аномально высокими содержаниями хлора и кристаллизуется из водонасыщенного расплава при низком потенциале кислорода и высокой активности воды и галогенов (особенно – хлора): $\log f \text{ H}_2\text{O} = 3,0\text{--}3,6$; $\log f \text{ HCl} = 2,9\text{--}3,7$; $\log f \text{ HF} = 1,1$ (расчет по [16]). По соотношениям железистости и содержаний фтора биотит гранитов сопоставим с биотитами поздних дифференциатов габбро-гранитных ассоциаций, а по низким значениям OH/F и высокой железистости – с биотитами шошонитовых гранитов или гранитов А-типа (рис. 2). В зонах дробления гранитов развита более поздняя тонкочешуйчатая генерация биотита – менее железистого ($f = 55\text{--}67\%$), но также интенсивно обогащенного хлором и соответствующего по параметрам состава биотитам производных габбро-гранитных серий.

Характерные акцессорные минералы: ортит, монацит (5–7 % ThO_2), ксенотим, сфен, титаномagnetит (до 14,8 % TiO_2), марганцовистый ильменит (до 7 % MnO), флюорит, зональный цир-

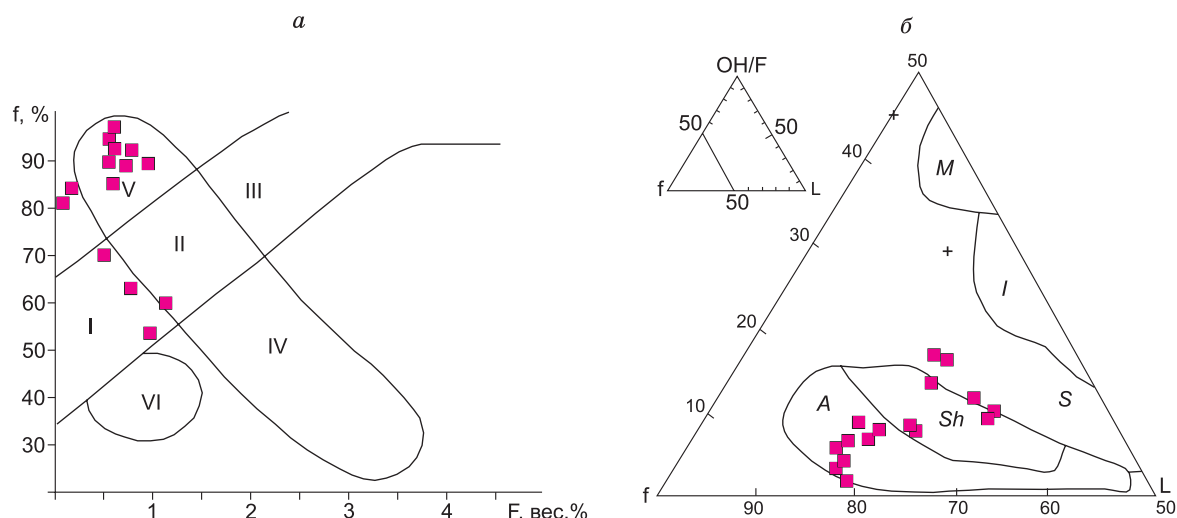


Рис. 2. Параметры составов биотитов гранитов

a – соотношение фтористости и железистости биотитов. Поля диаграммы [17]: I, II, III – производные диорит-гранитных серий; IV, V – производные габбро-гранитных серий; VI – производные мантийных магм. *б* – соотношения фтористости (OH/F), глиноземистости (L) и железистости (f) биотитов. Поля диаграммы – биотиты стандартных типов гранитоидов [18]: I – мантийно-коровые островных дуг, M – мантийные, S – коровые и мантийно-коровые коллизионных обстановок, Sh – постколлизийные шошонитовые, A – анорогенных обстановок.

Fig. 2. Parameters of biotite granites compositions

a – Ratio of fluoricity and ferruginosity of biotites. Diagram fields [17]: I, II, III – derivatives of diorite-granite series; IV, V – derivatives of gabbro-granite series; VI – derivatives of mantle magmas. *б* – Ratio of fluoricity (OH/F), aluminiferousness (L) and ferruginosity (f) of biotites. Diagram fields – biotites of standard types of granitoids [18]: I – mantle-crust island arcs, M – mantle, S – crust and mantle-crust collision conditions, Sh – post-collision shoshonite, A – anorogenic conditions.

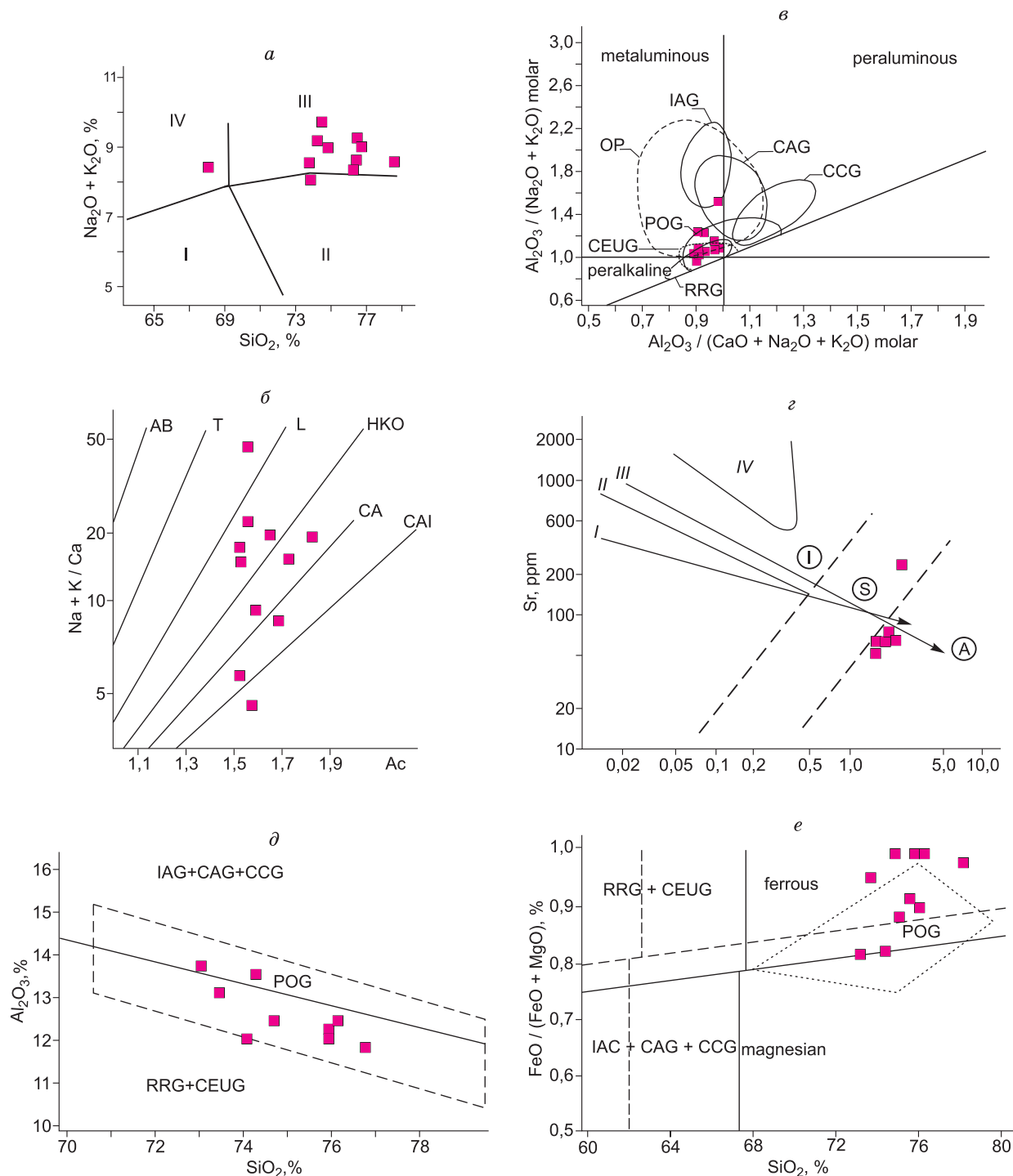


Рис. 3. Параметры химического состава гранитов

a – соотношение $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ в гранитах. Поля диаграммы [20]: I – гранодиориты, II – граниты; III – щелочные граниты, IV – граносиениты и кварцевые сиениты. *б* – магматические серии гранитов: Ac – активность катионов; тренды эволюции: CAI – известковый низкощелочной (островодужный), CA – известково-щелочной (коровый), HKO – высококалийный (орогенный), L – латитовый, T – трахитовый. *в* – глиноземистость гранитоидов. Поля диаграммы, гранитоиды [22]: IAG – островодужные, CAG – континентальных дуг, CCG – континентальные коллизионные, POG – посторогенные, CEUG – континентального эпйрогенического воздымания, RRG – рифтогенные. *з* – Соотношения $\text{Sr} - \text{Rb/Sr}$ в гранитах. Тренды дифференциации типовых серий [23]: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная островных дуг, III –

ПОЗДНЕМЕЛОВОЙ ПРАВО-КЫРИНСКИЙ МАССИВ ЩЕЛОЧНО-ПОЛЕВОШПАТОВЫХ ГРАНИТОВ

известково-щелочная активны окраин, IV – рифтовых зон континентов; I, S, A – петротипы гранитоидов. δ – соотношения $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ в гранитах. Поля диаграммы, гранитоиды [22]: IAG – островных дуг, CAG – континентальных дуг, CCG – континентальной коллизии, POG – посторогенные, RRG – рифтогенные, CEUG – континентальных эпигорогенных поднятий. e – соотношение железистости и SiO_2 в гранитах. Поля диаграммы [22].

Fig. 3. Parameters of the chemical composition of granites

a – SiO_2 – ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) ratio in granites. Diagram fields [20]: I – granites; II – alkaline granites, III – granosyenites and quartz syenites. δ – Magmatic series of granites. Symbols [21]: As – cation activity; trends of evolution: CAI – calcareous low-alkaline (island-arc), CA – calcareous-alkaline (crustal), HKO – high-potassium (orogenic), L – latite, T – trachite. σ – alumina content of granitoids. Diagram fields, granitoids [22]: IAG – island-arc, CAG – continental arcs, CCG – continental collision, POG – postorogenic, CEUG – continental epirogenic uplift, RRG – riftogenic. z – The ratio of Sr – Rb/Sr in granites. Trends of differentiation of typical series [23]: I – tholeiitic series of island arcs, II – calcareous-alkaline series of island arcs, III – calcareous-alkaline series of active margins, IV – series of rift zones of continents; I, S, A – petrotypes of granitoids. e – $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ ratios in granites. Diagram fields, granitoids [22]: IAG – island arcs, CAG – continental arcs, CCG – continental collision, POG – postorogenic, RRG – riftogenic, CEUG – continental epirogenic uplifts.

Таблица 2

Химический состав гранитов Право-Кыринского массива, %

Table 2

Chemical composition of granites of the Pravo-Kyrin massif, %

Компонент	Граниты							Аплиты, аляскиты			
	4117/4	4117/11	3066/2	3066/5	3066/6	3068/2	4118/10	4107/5	4108/9	3066/3	4108/4
SiO_2	67,20	73,20	74,06	74,12	74,60	73,02	72,84	76,00	75,72	76,80	75,99
TiO_2	0,53	0,32	0,18	0,37	0,24	0,28	0,35	0,12	0,09	0,12	0,02
Al_2O_3	15,16	13,17	12,09	13,70	12,47	13,63	14,20	12,67	12,28	11,95	12,14
Fe_2O_3	0,97	1,18	0,54	0,62	0,61	0,18	0,57	0	0,49	0,11	0
FeO	3,33	1,53	1,41	1,07	1,54	1,42	1,68	0,99	0,71	0,71	1,27
MnO	0,02	0,06	0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,02
MgO	0,90	0,12	0,50	0	0,33	0,42	0,90	0,12	0	0,02	0
CaO	2,85	1,20	0,57	0,84	0,87	2,25	2,91	0,69	0,72	0,67	1,28
Na_2O	4,94	4,14	3,28	4,38	3,55	3,84	5,08	4,79	4,19	3,90	3,70
K_2O	3,37	4,20	6,35	4,61	5,78	4,08	0,73	4,32	4,45	4,40	4,58
H_2O^-	Не опр.	0,01	Не опр.	0,10	Не опр.	Не опр.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10
H_2O^+	Не опр.	0,28	Не опр.	0,44	Не опр.	Не опр.	0,58	0,20	0,60	0,53	0,53
P_2O_5	0,08	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	0,06	0,01	0,01	0,01	0
CO_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,27	0,41
F	0,25	0,06	0,02	0,06	0,05	0,02	0,07	0,21	0,18	0,03	0,17
Cl	0,11	0,03	Не обн.	0,06	0,02	0,01	0,03	Не опр.	0,08	0,01	0,07
Li_2O	0,0107	Не опр.	0,0107	0,004	0,008	Не опр.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Rb_2O	0,0109	Не опр.	0,0132	0,0154	0,0154	Не опр.	0,0066	0,008	0,0076	0,007	0,008
S	0	0	0,01	0,03	0,03	0,03	0	0	0,04	0	0,03
Total	99,73	99,54	99,07	100,50	100,17	99,24	100,05	100,17	99,62	99,59	100,33
Fe/Fe+Mg	82,7	95,8	79,6	100	86,7	79,2	71,4	89,2	100	97,6	100
T , °C	1036	1021	990	1026	1008	1012	1021	949	918	955	813
P , ГПа	0,93	0,49	0,40	0,53	0,40	0,42	0,50	0,34	0,30	0,21	0,27

Примечание: Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН. Определение температур – [24]; давления – [25].

Notes. The analyses were performed in IGABM SB RAS. Temperature determination – [24]; pressure – [25].

кон (ZrO_2/HfO_2 от 120 до 5). Среди кристаллов последнего преобладают морфотипы D и J, при-
 сущие производным высокотемпературных, пре-
 имущественно основных расплавов [19]. Они ин-
 тенсивно обогащены оксидами U (до 12,2 %),
 менее – Th (до 1,1 %), Yb (до 1,8 %) и Y (до 2,6 %).
 Распределение примесей крайне неравномер-
 ное, т. е. высокие их содержания обусловлены
 микровключениями соответствующих мине-
 ралов, что подтверждается и наличием зерен
 собственно торианита ($UO_2 = 65,2$ %, $ThO_2 =$
 $34,7$ %). Апатит и гранат мало распростра-
 нены. Первый представлен почти исключитель-
 но низкотемпературным F- и F–ОН-апатитом.
 Редкие зерна акцессорного граната имеют со-
 став пироп-альмандина с аномально высо-
 ким для гранитоидов содержанием пиропово-
 го минала (до 41,6 %). Наряду с ним иногда
 встречается ксеногенный альмандин-гроссуляр

(28–36 % alm, 54–65 % gross), типичный для
 реститов эклогитов.

Породы жильной фации массивные, мелко-
 (аплиты) или мелко- и среднезернистые (лейкогра-
 ниты и аляскиты). Структура их аллотриоморфно-
 зернистая и микропегматитовая. Характер мине-
 ралов идентичен таковому для гранитов массива,
 лишь более интенсивно проявлены альбитиза-
 ция и грейзенизация, вплоть до преобразования
 в альбит-мусковит-кварцевые грейзены.

Петро- и геохимические особенности гранитов

Граниты Право-Кыринского массива харак-
 теризуются высококалевой щелочностью, вы-
 сокой железистостью, умеренной глиноземисто-
 стью (рис. 3, а–в, табл. 2). На дискриминационных
 диаграммах точки их составов намечают тренды,
 секущие по отношению к трендам нормальной

Таблица 3

Средние составы гранитов Право-Кыринского массива

Table 3

Average compositions of granites of the Pravo-Kyrin massif

Компонент	Граниты $n = 7$	Аплиты, аляскиты 4	Граниты А-типа [27]	Элементы (г/т, Au – мг/т)	Граниты $n = 4$	Аплиты, аляскиты $n = 2$	Кларк для гранитов [33]
SiO ₂	72,72	76,12	73,80	B	22	17	12,5
TiO ₂	0,32	0,09	0,26	Li	49	49	37,0
Al ₂ O ₃	13,49	12,26	12,40	Be	1,97	2,27	3,9
Fe ₂ O ₃	0,67	0,15	1,24	Cu	5,8	8,3	10
FeO	1,71	0,92	1,58	Zn	58	35	39
MnO	0,02	0,03		As	3,36	8,3	1,6
MgO	0,45	0,04	0,20	Rb	99	59	180
CaO	1,64	0,84	0,75	Sr	220	225	150
Na ₂ O	4,17	4,14	4,07	Y	29	28	50
K ₂ O	4,16	4,44	4,65	Zr	460	306	180
H ₂ O ⁻	0,1	0,03		Nb	17	12,4	21
H ₂ O ⁺	0,43	0,47		Mo	0,86	0,85	1,5
P ₂ O ₅	0,05	0,01		Sn	0,5	1,52	3
CO ₂	0	0,17		Sb	0,38	0,46	0,2
F	0,07	0,15		Ag	0,2	0,2	0,038
Cl	0,04	0,05		Au	12	7,5	2,7
K/Na+K	0,38	0,41	0,43	Bi	0,4	0,4	0,01
Ca/Na+K	0,14	0,06	0,12	Ba	1066	220	750
Na+K/Al	0,81	0,94	0,95	Hf	10,8	9,05	3,9
Al/2Ca+Na+K	0,94	0,92	0,95	Dy	9,96	9,64	5,0
Fe/Fe+Mg	0,76	0,93	0,88	Er	7,68	6,4	3,1

эволюции гранитоидных расплавов (рис. 3, а, б). По всем параметрам состава они определяются как посторогенные или рифтогенные граниты А-типа (рис. 3, с–е). Граниты высоко дифференцированные ($DI = 89–84\%$), диопсид-гиперстен-нормативные, с преобладанием нормативного альбита над ортоклазом (в среднем 35 и 27 %) при отсутствии нормативного корунда и величине цветного индекса 1,2–5,5 % (лишь в граносиенитах эндоконта он возрастает до 11 %). Состав нормативного плагиоклаза 2–12 % ап. Температура исходного расплава определена в 920–1030 °C [24] при давлении 0,6–0,9 ГПа [25]. Определенные по программе GCDkit [26] для серии образцов гранитов температуры Zr-, апатит- и REE-насыщения составляли 854–698 °C.

Граниты геохимически специализированы на As, Bi, Sb, Ag, Au (табл. 3). В них также повышены содержания Zr, Hf, Dy и Er. Редкоземельная минерализация (малакон, монацит, ториацит) приурочена в основном к миаролам, выполненным кальцитом. В целом геохимические особенности гранитов отвечают таковым гранитов щелочного ряда и редкометалльных гранитов щелочного ряда (рис. 4), генерация материнских расплавов для которых предполагается в низах коры в областях глубокого метаморфизма из реститовых субстратов под влиянием мощного флюидопотока из поднимающихся диапиров щелочно-базальтоидных магм [30], что согласуется также с представлениями J. Whalen и G.N. Eby о генезисе гранитов А-типа [31, 32].

Обсуждение результатов и выводы

Право-Кыринский массив сформирован в начале позднемеловой эпохи и сложен щелочно-полевошпатовыми лейкогранитами с отклонениями к граносиенитам и кварцевым сиенитам. Типоморфные особенности гранитов: высокая степень дифференцированности, низкие концентрации фосфора, высокие содержания хлора в амфиболах и биотитах, сочетание высокотемпературных, характерных для основных пород, и низкотемпературных, типично гранитных, акцессорных минералов. По всем петро- и геохимическим параметрам породы определяются как посторогенные или рифтогенные граниты А-типа. Расчетные давления при магмогенерации, низкие значения Nb (18–25 %) в отношениях Y–Nb–Ce [32] указывают на коровую природу протолита. В то же время в их составе сочетаются минералы типично сиалических и типично ос-

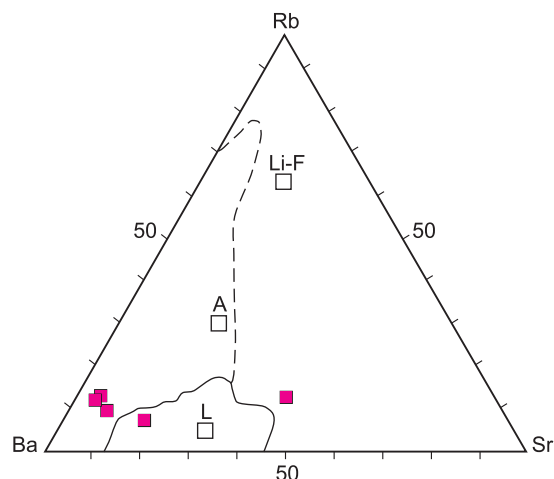


Рис. 4. Типы редкометалльных гранитов
Поля диаграммы [29]: А – редкометалльные щелочные граниты, L – латитовые граниты, Li-F – плюмазитовые литий-фтористые граниты.

Fig. 4. Types of granites.
Diagram fields [29]: A – rare-metal alkaline granites, L – latite granites, Li-F – plumasite lithium-fluoride granites.

новных производных, а по геохимическим параметрам они близки гранитам щелочного ряда и редкометалльных гранитов щелочного ряда корово-мантийного происхождения. Высокие температуры расплавов (920–1030 °C) при относительно небольших давлениях (0,6–0,9 ГПа) могли быть достигнуты только при поступлении на уровни магмогенерации дополнительного тепла из внешнего источника. Присутствие в гранитах клинопироксенов с параметрами клинопироксенов базит-гипербазитовых и пикрит-базальтовых ассоциаций наряду с феррижедритами предполагает присутствие основных и/или ультраосновных пород в высоко метаморфизованных магмоформирующих коровых субстратах или внедрение в эти субстраты производных основных и/или ультраосновных расплавов. На синтексис основного и гранитного расплавов при магмогенерации указывают и неравновесные структуры право-кыринских гранитов. Следствием этого, по-видимому, является и типоморфизм минералов гранитов: соответствие составов биотитов таковому биотитов производных габбро-гранитных серий, преобладание цирконов морфотипов D и J с характерными для основных пород значениями ZrO_2/HfO_2 , стабильное присутствие титаномагнетита. Все это позволяет предполагать наличие в пределах рассматриваемой территории погребенного очага основного расплава, активи-

зация которого в начале позднего мела и обусловила повторное плавление коровых субстратов, что подтверждается наличием даек трахидолеритов в контуре массива и его экзоконтактах.

Заключение

Изученный гранитный массив принадлежит к А-типу гранитов посторогенной или рифтогенной геодинамической обстановки. Материнский расплав генерировался в глубоко метаморфизованных коровых субстратах под воздействием тепла и флюидов, продуцируемых глубинными мантийными магмами. Основными типоморфными особенностями гранитов являются: повышенная щелочность; высокая степень дифференцированности; нестандартный ход эволюции расплава, сочетание высокотемпературных, характерных для основных пород, и низкотемпературных, «гранитных», породообразующих и акцессорных минералов; высокая роль хлора. Редкоземельная минерализация тяготеет к поздне- и постмагматическому этапам становления массива, проходящим при высокой активности воды и галогенов (преимущественно – хлора).

Литература

1. Коваленко В.И., Ярмолюк В.К., Владыкин Н.В. и др. Источники редкометалльных магм Центральной Азии и проблемы плюмов // Глубинный магматизм, магматические источники и проблемы плюмов. Труды 2-го международного семинара. Владивосток, 2002. С. 25–42.
2. Xu X., Zhou X., Wang D. Interaction crust – mantle and genesis of granites on the matter of coastal part of the south-eastern part of China // Geol. I. China Univ. 1999. Vol. 5, No. 3. P. 241–250.
3. Владимиров А.Г., Выставной С.А., Титов А.В., Рудиев С.Н., Дергачев В.Б., Анникова И.Ю., Тукунов Ю.В. Петрология раннемезозойских редкометалльных гранитов юга Горного Алтая // Геология и геофизика. 1998. № 7. С. 901–916.
4. Bonin B. A-type granite ring complexes: Mantle origin through crustal filters and the anortosite-rapakivi magmatism connection // Petrol. and Geochem. Magm. Suites Rocks Contin. and Ocean. Grusts. Bruxelles, 1996. P. 201–217.
5. Трунилина В.А., Орлов Ю.С., Роев С.П., Зайцев А.И. Состав и генетические аспекты формирования гранитов А-типа Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 99–109.
6. Трунилина В.А., Роев С.П., Орлов Ю.С. Вулкано-плутонические пояса северо-востока Якутии. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2007. 152 с.
7. Yavuz F. Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // American Mineral. 2013. Vol. 98. P. 1338–1359.
8. Rudilfi R., Renzulli A. Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2,2 Gpa. // Contrib. Miner. Petrol. 2012, Vol. 163. P. 877–895.
9. Yavuz F. A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules // Computeres Geosciences. 1999. Vol. 25, No. 8. P. 909–927.
10. Brown G.G. A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 1970, Vol. 9. P. 13–22.
11. Uchida E., Endo S., Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // Resource Geology, 2007. Vol. 57, No. 1. P. 47–56.
12. Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanismus // Amer. Miner. 2005. Vol. 90. P. 316–328.
13. Трошин Ю.П., Гребенищикова В.И., Антонов А.Ю. Летучие компоненты в биотитах и металлогеническая специализация интрузий // Минералогические критерии оценки рудоносности. Л.: Наука, 1981. С. 73–83.
14. Рябов В.В., Золотухин В.В. Минералы дифференцированных траппов: монография. Новосибирск: Наука, 1977. 387 с.
15. Putirka K.D. Igneous thermometers and barometers based on plagioclase + liquid equilibria: Tesis of some existing models and new calibrations // Amer. Mineral. 2005. Vol. 90. P. 336–346.
16. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory and application // Amer. Mineral. 1985. No. 9. P. 1228–1272.
17. Бушляков И.Н., Холоднов В.В. Галогены в петрогенезисе гранитоидов. М.: Недра, 1986. 192 с.
18. Гусев А.И. Типизация гранитоидов на основе составов биотитов // Успехи современного естествознания. 2009. № 4. С. 54–57.
19. Pupin J.P. Zircon and Granite Petrology // Contrib. to Miner. and Petrol. 1980. Vol. 73. P. 207–220.
20. Wilson M. Igneous petrogenesis. London: Unwin Hayman, 1989.
21. Бородин Л.С. Петрохимия магматических серий. М.: Наука, 1987. 241 с.
22. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. Vol. 101. P. 635–643.
23. Даценко В.М. Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы // Материалы Второго Всеросс. петрограф. совещ. Т. 2. Сыктывкар, 2000. С. 270–274.

24. Jung S., Pfander J.A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry // *European Journal of Mineralogy*. 2007. No. 1. P. 5–40.
25. Беляев Г.М., Рудник В.А. Формационно-генетические типы гранитоидов. Л.: Недра, 1978. 168 с.
26. Janoušek V., Farrow C. M., Erban V. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCD-kit) // *Journal of Petrology*. 2006. Vol. 47. P. 1255–1259.
27. Ненахов В.М., Иванников В.В., Кузнецов Л.В., Стрик Ю.Н. Особенности изучения и геологического картирования коллизионных гранитоидов. М.: Роскомнедра, 1992. 101 с.
28. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра. 1990. 248 с.
29. Сазонова Л.В., Носова А.А., Докучаев А.Я., Гурбанов А.Г. Латитовый тип позднеколлизийных гранитоидов (Северный Кавказ): геохимические и минералогические особенности // *Докл. РАН*. 2003. Т. 393, № 2. С. 2–5.
30. Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 279 с.
31. Whalen J. A-type granites in New Brunswick // *Geol. Surv. Can. Pap.* 1986. No. 1a. P. 297–300.
32. Eby G.N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // *Geology*, 1992. No. 20. P. 641–654.

Поступила в редакцию 19.05.2020

Принята к публикации 08.07.2020

Об авторе

ТРУНИЛИНА Вера Аркадьевна, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, trunilina40@mail.ru.

Информация для цитирования

Трунилина В.А. Позднемеловой Право-Кыринский массив щелочно-полевошпатовых гранитов (Верхояно-Колымская орогенная область) брахиоподам // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020, Т. 25, № 3. С. 27–39. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-3>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-3

Late Cretaceous Right-Kyrin massif of alkali-feldspar granites (Verkhoyano-Kolyma orogeny region)

V.A. Trunilina

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia
trunilina40@mail.ru

Abstract. The article deals with the specific composition of late Cretaceous granites of the Right-Kyrin massif of alkali-feldspar granites localized on the border of the Selennyakh synclinorium and the Tas-Khayakhtakh anticlinorium of the Verkhoyano-Kolyma orogenic region and accompanied by rare-earth mineralization. The isotopic age of granites is 85–94 million years. It is shown that the granites belong to the A-type of post-threshold geodynamic environment. The parent melt was generated in deeply metamorphosed lower crust substrates under the influence of heat and fluids produced by deep mantle magmas. Granites are characterized by a high degree of differentiation, increased alkalinity, a combination of high-temperature, characteristic of the main rocks, and low-temperature, «granite», rock-forming and accessory minerals; and a substantial role of chlorine in crystallization. Based on these features and the presence of trachydolerite dikes in the contour of the massif and its exocontacts, it is assumed that there are main melts within the territory of the buried hearth, the activation of which in the late Cretaceous caused repeated melting of crustal substrates.

Key words: granites, geodynamic environment, magma generation substrates, typomorphism of minerals, mantle-crustal interaction.

Acknowledgements. The author expresses gratitude to all employees who performed analytical research. Special thanks to S.P. Roev for his help in preparing the graphic material for this article.

References

1. Kovalenko V.I., Yarmoluk V.K., Vladyskin N.V. et al. Istotchniki redkometallnykh magm Zentralnoi Asii i problemy plumov // Glubinnui magmatism, magmaticheskie istotchniki i problemy plumov. Trudy 2-go mezdunarodnogo seminara. Vladivostok, 2002. P. 25–42.
2. Xu X., Zhou X., Wang D. Interaction crust – mantle and genesis of granites on the matter of coastal part of the south-eastern part of China // Geol. I. China Univ. 1999. Vol. 5, No. 3. P. 241–250.
3. Vladimirov A.G., Vystavnoi S.A., Titov A.V., Rudnev S.N., Dergatchov V.B., Annikova I.Yu., Tikunov Yu.V. Petrologiya rannemezozoiskikh redkometallnykh granitov yuga Gornogo Altaya // Geologiya i geofizika. 1998. No. 7. P. 901–916. (in Russian)
4. Bonin B. A-type granite ring complexes: Mante origin through crustal filters and the anortosite-rapakivi magmatism connection // Petrol. and Geochem. Magm. Suites Rocks Contin. and Ocean. Grusts. Bruxelles, 1996. P. 201–217.
5. Trunilina V.A., Orlov Yu.S., Roev S.P., Zaitsev A.I. Sostav i geneticheskie aspekty formirovaniia granitov A-tipa Verkhoyano-Kolymskoi skladchatoi oblasti // Otechestvennaya Geologiya. 2008. No. 5. P. 99–109.
6. Trunilina V.A., Roev S.P., Orlov Yu.S. Vulkano-plutonitsheskie pojasa severo-vostoka Yakutii. Yakutsk: Sakhapoligrafizdat, 2007. 152 p.
7. Yavuz F. Win Pyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry // American Mineral. 2013. Vol. 98. P. 1338–1359.
8. Rudilfi R., Renzulli A. Calcik ampiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130 °C and 2,2 Gpa. // Contrib. Miner. Petrol. 2012. Vol. 163. P. 877–895.
9. Yavuz F. A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules // Computeres Geosciences. 1999. Vol. 25, No. 8. P. 909–927.
10. Brown G.G. A comment on the role of water in the partial fusion of crystal rocks // Earth and Planet. Sci. Lett. 1970. Vol. 9. P. 13–22.
11. Uchida E., Endo S., Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits // Resource Geology. 2007. Vol. 57, No. 1. P. 47–56.
12. Henry D.A., Guidotti Ch.V., Thompson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: implication for geothermometry and Ti-substitution mechanism // Amer. Miner. 2005. Vol. 90. P. 316–328.
13. Troshin Yu.P., Grebenshikova V.I., Antonov A.Yu. Letutchie komponenty v biotitakh i metallogenitsheskaia speczializaciia intruzii // Mineralogitsheskie kriterii ocenki rudonosnosti. L.: Nauka, 1981. P. 73–83.
14. Ryabov V.V., Zolotukhin V.V. Mineraly differentsirovannykh trappov: monografiia. Novosibirsk: Nauka, 1977. 387 p.
15. Putirka K.D. Igneous thermometers and barometers based on plagioclase + liquid equilibria: Tesis of some existing models and new calibrations // Amer. Mineral. 2005. Vol. 90. P. 336–346.
16. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory and application // Amer. Mineral. 1985. No. 9. P. 1228–1272.
17. Bushlyakov I.N., Kholodnov V.V. Galogeny v petrogenese granitoidov. M.: Nedra. 1986. 192 p.
18. Gusev A.I. Tipizaciia granitoidov na osnove sostavov biotitov // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia. 2009. No. 4. P. 54–57.
19. Pupin J.P. Zircon and Granite Petrology // Contrib. to Miner. and Petrol. 1980. Vol. 73. P. 207–220.
20. Wilson M. Igneous petrogenesis. London: Unwin Hayman, 1989.
21. Borodin L.S. Petrokhimiia magmaticheskikh seriy. M.: Nauka, 1987. 241 p.
22. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. Vol. 101. P. 635–643.
23. Daczenko V.M. Petrogeokhimitsheskaia tipizaciia granitoidov yugo-zapadnogo obramleniia Sibirskoi platformy // Materialy Vtorogo Vseross. Petrograf. Sovesh. Vol. 2.: Syktyvkar, 2000. P. 270–274.
24. Jung S., Pfander J.A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids – constrains from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry // European Journal of Mineralogy. 2007. No. 1. P. 5–40.
25. Belyaev G.M., Rudnik V.A. Formazionno-geneticheskie typy granitoidov. L.: Nedra, 1978. 168 p.
26. Janoušek V., Farrow C. M., Erban, V. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit) // Journal of Petrology. 2006. Vol. 47. P. 1255–1259.
27. Nenakhov V.M., Ivannikov V.B., Kuznezov L.V., Strikh Yu.N. Osobennosti isuzeniya I geologitsheskogo kartirovaniya kollisionnykh graitoidov. M.: Roskomnedra, 1992. 101 p.
28. Ovtchinnikov L.N. Prikladnaia geokhimiia. M.: Nedra, 1990. 248 p.
29. Sasonova L.V., Nosova A.A., Dokuzaev A.Ya., Gubanov A.G. Latitovy typ posdnekollisionnykh granitoidov.

toidov (Severnyi Kavkaz): geokhimitscheskie i mineralogitscheskie osobennosti // Dokl. RAN. 2003. Vol. 393, No. 2. P. 2–5.

30. *Tauson L.V.* Geokhimitscheskie tipy I potencialnaya rudonosnost granitoidov: M.: Nauka, 1977. 279 p.

31. *Whalen J.* A-type granites in New Brunswick // Geol. Surv. Can. Pap. 1986. No. 1a. P. 297 – 300.

32. *Eby G.N.* Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geology, 1992. No. 20. P. 641–654.

About the author

TRUNILINA Vera Arkadievna, doctor of geological and mineralogical sciences, chief researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0910-2386>, trunilina40@mail.ru.

Citation

Trunilina V.A. Late Cretaceous Right-Kyrin massif of alkali-feldspar granites (Verkhoyano-Kolyma orogeny region) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 27–39. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-3>

Новые данные о границах ареала шерстистого носорога (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) в позднем плейстоцене

В.В. Плотников^{1*}, Е.Н. Машенко^{1,2}

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия

²Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва, Россия

*mammuthus@mail.ru

Аннотация. Описан череп шерстистого носорога (*C. antiquitatis*) найденный в 2018 г. на берегу р. Кожевена, на севере о. Котельный (архипелаг Новосибирские острова) во время экспедиции Отдела изучения мамонтовой фауны Академии наук Республики Саха (Якутия) и Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН (Москва). Проведен сравнительный анализ краниологических признаков черепа в сравнении с тремя черепами *C. antiquitatis* из континентальной части Якутии (Мегино-Кангаласский, Нижнеколымский и Абыйский районы). Шерстистый носорог отличается от других современных и вымерших видов носорогов полностью окостеневающей носовой перегородкой. Окостенение этой перегородки у данного вида происходит по мере взросления и, кроме того, определяется интенсивностью использования рогов при добыче подножного корма. Носовая перегородка исследуемого образца окостенела не полностью (около 80 %). Видимо, данная особь, будучи половозрелой, не была старой. Развитие экзостозов показывает, что это молодой самец. На настоящий момент это самая северная находка останков данного вида. В конце верхнего плейстоцена острова Новосибирского архипелага являлись частью материка. По-видимому, распространение *C. antiquitatis* достигало северных границ Берингийской суши.

Ключевые слова: Верхний плейстоцен, Якутия, шерстистый носорог, распространение млекопитающих мамонтовой фауны, Новосибирский архипелаг, остров Котельный.

Благодарности. Авторы признательны руководителю Отдела изучения мамонтовой фауны Академии наук РС(Я), д.б.н. А.В. Протопопову и инженеру-исследователю И.С. Павлову за организацию экспедиции на о. Котельный.

Введение

Актуальность. Скелетные остатки шерстистого носорога (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) относительно обычны в местонахождениях мамонтовой фауны арктической зоны северо-востока России. В некоторых местонахождениях верхнего плейстоцена кости шерстистого носорога количественно не уступают остаткам первобытного бизона, плейстоценовой лошади и северного оленя. В большинстве других местонахождений кости этого вида млекопитающих относительно редки. Еще более редкими являются находки мерзлых мумий этого вида млекопитающих [1, 2]. Подобная тафономическая избирательность в захоронении остатков шерстистого носорога, видимо, объясняется, с одной стороны, иной экологией этого вида, не образующего больших стад и не имеющего сезонных миграций [3], а с другой стороны, вероятным обитанием этого вида в иных экологических стациях,

что отличает этот вид от других крупных млекопитающих плейстоцена [4].

Динамика численности и распространения этого вида остается предметом изучения до настоящего времени и не может трактоваться однозначно, как и влияние антропогенного фактора и на этот вид, и на других млекопитающих мамонтовой фауны верхнего плейстоцена [5]. Обобщенные данные по находкам этого вида в Евразии показывают, что шерстистый носорог в конце позднего плейстоцена населял почти всю территорию Евразии (60–70° с.ш.) [3, 5]. На территории Якутии местонахождения мамонтовой фауны, откуда известны остатки шерстистого носорога, сконцентрированы преимущественно в долинах рек Лена, Яна, Индигирка, Колыма и на низких водоразделах. В отдельных районах Чукотки, преимущественно вдоль границы с Якутией также обычны находки этого вида [6]. В большинстве восточных районов Чукотки этот



Рис. 1. Карта местонахождения черепа шерстистого носорога на о. Котельный. Красной точкой обозначено местонахождение [20].

Fig. 1. The map of the location of the woolly rhinoceros skull on the Kotelny island. The red point indicates the location [20].

вид млекопитающих не известен. Интересной биогеографической особенностью *C. antiquitatis* является его отсутствие в Северной Америке, хотя другие виды мамонтовой фауны, например шерстистый мамонт (*Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799)), распространились из Евразии в Северную Америку до севера США [7–9].

Научное исследование шерстистого носорога начинается во второй половине XVIII в. с экспедиций российских академиков И. Гмелина и П. Палласа [10–17]. На сегодня изучено как достаточно много скелетных находок, так и несколько мерзлых мумий носорогов из Якутии, мумифицированные в битуме трупы носорогов в Польше (местонахождение Старунь) [1, 8, 18]. При этом находки целых скелетов крайне редки, и в настоящее время наиболее полным и единственным в России является скелет самки Чурапчинского носорога (ИГАБМ № 2114) [8].

В данной статье приведены новые данные о северной границе распространения шерстистого носорога в Евразии, основанные на находке черепа шерстистого носорога в нижнем течении р. Кожевена (о. Котельный) в ходе экспедиционных работ Отдела изучения мамонтовой фауны Академии наук Республики Саха (Якутия) и Палеонтологического института им. А.А. Борисяка

РАН (Москва) в августе 2018 г. (рис. 1). Данная находка является самой северной точкой обнаружения останков этого вида. До обнаружения черепа шерстистого носорога на о. Котельный распространение этого вида на Новосибирских островах не было документально подтверждено [19, 20]. Географические координаты местонахождения: 75,772239 с.ш., 140,120297 в.д. В районе местонахождения осадочные породы представляют собой не расчлененные отложения различного генезиса: озерно-болотные, аллювиальные и аллювиально-морские [22]. Наиболее распространенные типы осадочных пород здесь – пески, алевролиты, глины, илы, галечники, гравийники, щебень, торф, ископаемый лед (см. рис. 1).

Материал и методы исследования

В статье использованы опубликованные данные по черепам шерстистых носорогов из местонахождений в Чурапчинском и Нижнеколымском районах Якутии [1, 8].

Обозначения верхних зубов: P2 – первый предкоренной зуб; P4 – третий предкоренной зуб; M2 – второй коренной зуб; M3 – третий коренной зуб.

Принятые сокращения: ВСЕГЕИ – Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. В.И. Вернадского.

ский институт им. А.П. Карпинского; АН – Академия наук Республики Саха (Якутия), ПИН – Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН; ИГАБМ – Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН; EL-1 – одна находка в пос. Елечей (Мегино-Кангаласский район, Якутия); 2018-Kot-Rn1–Kot–Rn – первая находка *Rhinoceros* на о. Котельный.

Краниологические измерения проводились штангенциркулем с точностью до 0,01 мм и мерной металлической лентой (3 м). Промеры делались по методике, разработанной Н.В. Гарутт с дополнениями из методик измерения черепа К. Герена и И.А. Вислобоковой [3].

Использовалась методика определения систематической принадлежности шерстистого носорога и носорога Мерка (*Rhinoceros Mercki* Jaeger, 1839) [23, 24]. Используемые промеры: 1 – основная длина черепа – от наиболее выступающей точки затылочного гребня – *crista occipitalis* до конца носовых костей – *ossanasale*, что соответствует краниометрической точке *rhinion* – *rh*; 2 – длина лицевого отдела черепа – от точки *interorbitale* (*io*) до точки *rhinion* (*rh*) на конце носовых костей; 3 – длина костного носового входа – от края носочелюстной вырезки *incisura nasomaxillaris* до конца носовых костей, в точке *rhinion* (*rh*); 4 – ширина черепа в точках наибольшего выступания скуловых дуг *arcus zygomaticus*; 5 – ширина черепа в области глазниц – *ocili* – расстояние между точками *inter* и *orbitale* (*io*); 6 – ширина черепа в области основания сосцевидных отростков *processus mastoideum*, между точками *porion* (*po*); 7 – наименьшая ширина теменных костей – *ossa parietale*; 8 – ширина затылка в области затылочного гребня *crista occipitalis*; 9 – наименьшая ширина лицевого черепа в области сужения носовых костей *ossa nasalia*; 10 – высота затылка, от точки *basion* до наиболее выступающей точки *crista occipitalis*; 11 – длина теменной области черепа, от затылочного гребня *crista occipitalis*, до точки *supraorbitale* (*so*); 12 – высота черепа между точкой наибольшего выступания лобных костей и альвеолярного края верхней челюсти (в области M2); 13 – высота черепа в межротовой области, от точки *nasion* (*n*), до альвеолярного края верхней челюсти (в областях P4); 14 – высота черепа, от области наибольшего выступания площадок носовых костей, до края небного отростка *processus palatinus* верхнечелюстной кости; 15 – длина зубного ряда, от края зубной лунки P2 до края зубной лунки M3;

16 – длина диастемы (*margo interalveolaris*); 17 – длина хоаны, от каудального края небной кости *os palatinum*, до точки *sphenobasion* (*sph*); 18 – ширина хоаны, от медиальных поверхностей вертикальных пластин небной кости, в самом широком месте; 19 – расстояние между затылочными мыщелками *condyli occipitales*; 20 – наибольшая высота затылочного мыщелка *condylus occipitalis*; 21 – наибольшая ширина затылочного мыщелка *condylus occipitalis*; 22 – ширина большого затылочного отверстия *foramen occipitale magnum*; 23 – высота затылочного отверстия; 24 – наибольшая высота скуловой кости *os zygomaticum*; 25 – наклон поверхности теменной кости к плоскости, образованной лобными костями (рис. 2).

Как сравнительный материал использованы черепа двух шерстистых носорогов с Абыйского и с Мегино-Кангаласского районов (№ 4 АН, EL-1, АН РС(Я)). Эти черепа по размеру и развитию экзостозов отнесены к самцам. Два других черепа относятся к половозрелым самкам (пол определен по тазовым костям), это скелет Чурапчинского и мерзлая мумия Колымского шерстистых носорогов [1, 2, 8].

Численные значения выбранных авторами промеров черепа в сравнении с аналогичными данными для других шерстистых носорогов приведены в таблице.

В работе использованы общая стратиграфическая шкала, утвержденная Межведомственным стратиграфическим комитетом России на 2019 г. (<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-08.jpg>), и Международная хроностратиграфическая шкала, утвержденная Международной комиссией по стратиграфии на 2020 г. (<http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.PDF>) [25, 26].

Описание. Череп шерстистого носорога № 2018-Kot-Rn1 светло-коричневого, палевого цвета. Имеются повреждения в области боковых или мыщелковых частей (*parses laterales*), сошник выпал (*vomer*), не сохранились все верхнечелюстные коренные и предкоренные зубы, края альвеол зубов также повреждены (рис. 3). Экзостозы основания носового рога имеют более рыхлую структуру, чем на участке основания лобного рога. Носовая перегородка окостенела приблизительно на 80 %, т. е. на ее задней части есть сквозная открытая область. У детенышей инфантной и ювенильной стадии онтогенеза (от рождения до 5 лет) данная перегородка

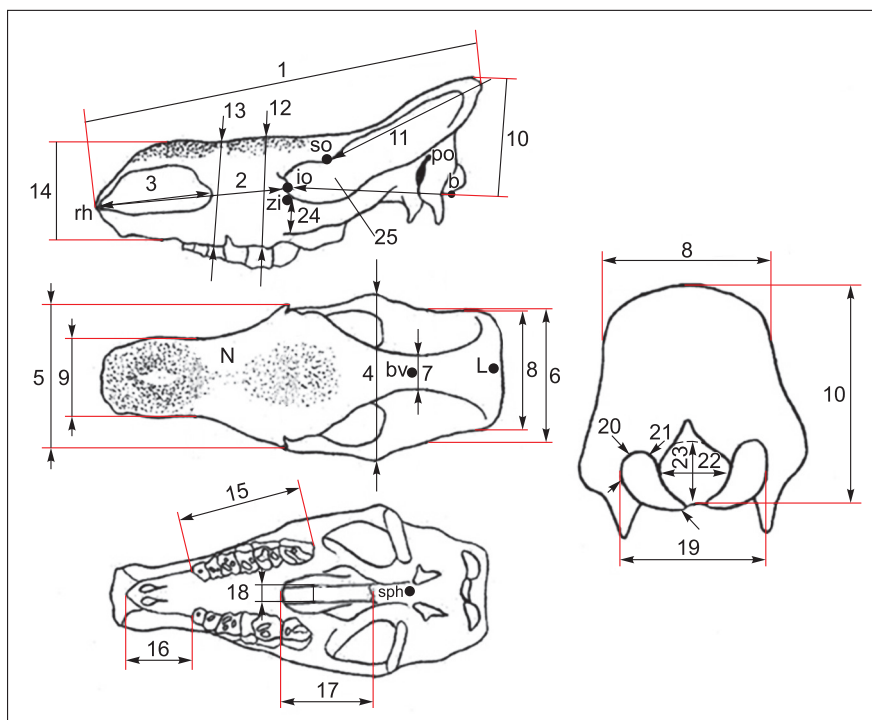


Рис. 2. Схема промеров черепа шерстистого носорога (*C. antiquitatis*) по Н.В. Гарутт (1998).

Fig. 2. Scheme of measurements of the skull of a woolly rhinoceros (*C. antiquitatis*) by N. V. Garutt (1998).



Рис. 3. Череп шерстистого носорога № 2018-Kot-Rn1, найденный на о. Котельный:
а – вид сбоку; б – вид сверху; в – вид снизу; г – вид сзади.

Fig. 3. The skull of a woolly rhinoceros No. 2018-Kot-Rn1, found on the Kotelnii island:
а – side view; б – top view; в – bottom view; г – rear view.

остается еще хрящевой и в ископаемом состоянии не сохраняется. Надо полагать, что только на возрастной стадии развития (от 6 лет) обра-

зуются первые центры окостенения в передней (внешней) ее части, на конце носовых костей. На взрослой стадии онтогенетического разви-

Промеры черепа шерстистого носорога (*C. antiquitatis*) с территории Якутии (мм)Measurements of the skull of a woolly rhinoceros (*C. antiquitatis*) from the territory of Yakutia (mm)

Промеры	№ 2018-Kot-Rn1, о. Котельный, р. Кожевена ♂	№ 4 АН, р. Тирехтах, Абыйский район ♂	EL-1, окр. пос. Елечей, Мегино-Кангаласский район ♂	ИГАБМ № 2114 п. Чурапча ♀	АН № 7938 Нижнеколымский район, р. Малая Филиппова ♀
1	799	780	790	—	770
2	411	385	410	—	385
3	255	238	240	—	240
4	328	348	360	344	340
5	274	297	330	236	270
6	264	252	—	252	229
7	82	79	86,6	68	67,8
8	173	201	222	—	194
9	137	147	153,3	—	128
10	233	245	242	241	227
11	360	368	364	—	350
12	207	229	226	—	200
13	202	238	210	—	185
14	190	215	193	—	185
15	—	211	200	201	216
16	121	102	130	—	128
17	122	203	160	—	178
18	74	76	75	64	67
19	146	147	157	158	161
20	73	77	82	—	82
21	41	45	53	—	52
22	66	56	62	—	56
23	64	66	64	—	55
24	51	83	73	—	58
25	150°	145°	155°	—	150°

тия, соответствующей времени стирания примерно наполовину, носовая перегородка полностью окостеневаает и срастается с другими костями лицевой части черепа [3].

Костные швы на небной кости не полностью облитерированы, это указывает на то, что, возможно, данная особь достигла стадии полового созревания [3]. Экзостозы слезной кости (*os lacrimale*), также не сильно выражены.

Результаты и обсуждение

Результаты сравнения исследуемого образца с черепами других *C. antiquitatis*, показали идентичность анатомических параметров (см. таблицу). Половой диморфизм у шерстистого носорога, по Н.В. Гарутт (1998) [3], проявляется в

массивности черепов, а также в выраженности экзостозов на основаниях рогов и слезных костей у самцов. Анатомические параметры исследуемого черепа № 2018-Kot-Rn1 (1 – основная длина черепа; 2 – длина лицевого отдела черепа; 3 – длина костного носового входа; 7 – наименьшая ширина теменных костей; 10 – высота затылка, 11 – длина теменной области черепа; 16 – длина диастемы; 19 – расстояние между затылочными мышцами; 22 – ширина большого затылочного отверстия; 23 – высота затылочного отверстия) коррелируют больше с самцами (№ 4 АН, EL-1), чем с самками (ИГАБМ № 2114, АН № 7938). Невыраженность экзостозов и немассивность черепа можно объяснить юным возрастом исследуемого образца (см. таблицу, рис. 4).

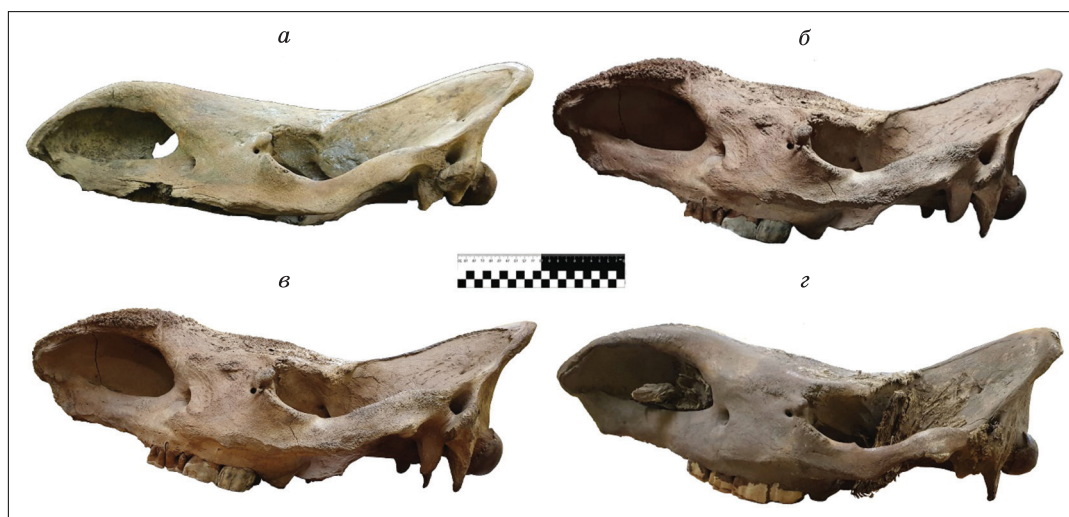


Рис. 4. Сравнение черепов шерстистых носорогов из разных местонахождений:

а – № 2018-Kot-Rn1 ♂; б – № EL-1 ♂; в – 4АН ♂; з – № 7938 ♀.

Fig. 4. Comparison of woolly rhinoceros skulls from different locations:

а – № 2018-Kot-Rn1 ♂; б – № EL-1 ♂; в – 4АН ♂; з – № 7938 ♀.

Выводы

По основным краниологическим признакам череп шерстистого носорога с о. Котельный (№№ 2018-Kot-Rn1) ближе к самцам. Относительную невыраженность экзостозов носового и лобного рогов, а также заглазничных экзостозов у этой особи можно объяснить молодым возрастом, о чем также свидетельствует неполностью окостеневшая носовая перегородка.

На исследуемом черепе носорога не сохранились зубы, что затрудняет определение индивидуального возраста животного. Тем не менее, по степени окостенения носовой перегородки, по Гарутт (1998) [3], носорог еще не достиг той стадии онтогенеза, когда МЗ стерт приблизительно примерно наполовину. К этому возрасту носовая перегородка полностью окостеневает и срастается с костями лицевой части черепа.

Появление эволюционной линии носорогов, к которой принадлежит шерстистый носорог, видимо, хронологически относится к эоплейстоцену. Центром происхождения, скорее всего, является территория современного северного Китая и Внутренней Монголии. Наиболее древние остатки *C. antiquitatis* в Европе известны из среднего плейстоцена. В позднем плейстоцене он проникает в северо-восточную часть Евразии, где на рубеже верхнего плейстоцена и голоцена происходит его основное вымирание [3, 9, 27]. Ареал вымерших млекопитающих мамонтовой фауны верхнего плейстоцена определяется

локализацией местонахождений, устанавливающих крайние границы распространения. Остатки шерстистого носорога найдены практически по всей Северной Евразии, начиная от Британский островов до Чукотки [9, 27].

Экземпляр с о. Котельный обнаружен в местонахождении северной части острова. На настоящий момент это самая северная находка останков данного вида. В конце верхнего плейстоцена острова Новосибирского архипелага являлись частью материка. Скорее всего, популяция шерстистого носорога о. Котельный была частью единой популяции этого вида на северо-востоке Евразии. Наиболее интересным, но пока не исследованным в зоогеографическом отношении вопросом является динамика распространения этого вида так далеко на север в верхнем плейстоцене.

Литература

1. Боескоров Г.Г., Лазарев П.А., Бакулина Н.Т., Щелчкова М.В., Давыдов С.П., Соломонов Н.Г. Предварительные данные о находке мумифицированного трупа ископаемого шерстистого носорога в низовьях реки Колымы // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 4. С. 570–573.
2. Boeskorov G.G., Lazarev P.A., Sher A.V., Davydov S.P., Bakulina N.T., Shchelchkova M.V., Binladen J., Willerslev E., Buigues B., Tikhonov A.N. Woolly rhino discovery in the lower Kolyma River // Quaternary Science reviews, 2011. Vol. 30, No. 17–18. P. 2262–2272.
3. Гарутт Н.В. Шерстистые носороги (Морфология, систематика, геологическое значение): Дисс. канд. геол.-мин. наук, СПб. 1998. 235 с.

4. Жегалло В.И., Каландадзе Н.Н., Шаповалов А.В., Бессуднова З.А., Носкова Н.Г., Тесакова Е.М. Об ископаемых носорогах эласмотериях (с привлечением материалов из коллекций Геологического музея им. В.И. Вернадского РАН) // VM-Novitates. Новости из Геологического музея им. В. И. Вернадского. 2002. № 9. 48 с.
5. Kahlke R.-D. The history of the origin, evolution and dispersal of the Late Pleistocene Mammuthus-Coelodonta faunal complex in Eurasia (large mammals) // Quaternary Science Reviews. 2001. No. 20. P. 1159–1165.
6. Чернова О.Ф., Кириллова И.В. Новые данные о морфологии рога шерстистого носорога (Coelodonta antiquitatis Blumenbach, 1799) // Труды Зоологического института РАН. 2010. Т. 314. № 3. С. 333–342.
7. Шер А.В. Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена крайнего севера-востока СССР и северной Америки. М.: Наука, 1971. 297 с.
8. Лазарев П.А. Новая находка скелета шерстистого носорога в Якутии // Тр. Зоол. ин-та АН СССР. 1977. Т. 63. С. 281–285.
9. Гарутт Н.В., Боесков Г.Г. Шерстистые носороги: к истории рода // Мамонт и его окружение: 200 лет изучения Ред. А.Ю. Розанов. М.: Геос, 2001. С. 157–167.
10. Волосович К.А. Мамонт острова Большого Ляховского (Новосибирские острова): Геологический очерк // Зап. Имп. Минерал. об-ва. Вторая серия. 1915. Ч. 50. С. 305–338.
11. Вангенгейм Э.А. Фауна четвертичных млекопитающих о. Большой Ляховский // Тр. Арктического и Антарктического науч.-исслед. ин-та. 1963. Т. 224. С. 73–88.
12. Лазарев П.А., Томская А.И. Млекопитающие и биостратиграфия позднего кайнозоя Северной Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 169 с.
13. Лазарев П.А., Боесков Г.Г., Томская А.И., Гарутт Н.В., Васильев Е.М., Каспаров А.К., Родионов Г.Н. Млекопитающие антропогена Якутии / ЯНЦ СО РАН, 1998. 158 с.
14. Верещагин Н.К. От ондатры до мамонта. Путь зоолога. СПб.: Астерион, 2002. 336 с.
15. Лазарев П.А. Кадастр местонахождений фауны млекопитающих позднего кайнозоя Якутии. Новосибирск: Наука, 2002. 54 с.
16. Тихонов А.Н. Мамонт. М., СПб: Т-во научных изданий КМК, 2005. 90 с.
17. Лазарев П.А. Крупные млекопитающие антропогена Якутии. Новосибирск: Наука, 2008. 160 с.
18. Боесков Г.Г. Некоторые морфологические и экологические особенности ископаемого шерстистого носорога Coelodonta antiquitatis (Blumenbach, 1799) // Зоологический журнал. 2012. Т. 91, № 2. С. 219–235.
19. Лазарев П.А., Боесков Г.Г., Тихонов А.Н. Новые находки остатков мамонтов с мягкими тканями в Якутии // Мамонт и его окружение: 200 лет изучения. М.: ГЕОС, 2001. С. 139–144.
20. Кузнецова Т.В., Стародубцева И.А. Мамонты и история геологического изучения побережья моря Лаптевых и Новосибирских островов // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 481–500. DOI: 10.31857/S013207690006730-5.
21. Boeskorov G. Woolly rhino (Coelodonta antiquitatis) distribution in Northeast Asia // Deinsea. 2001. No. 8. P. 15–20.
22. Косько М.К., Бондаренко Н.С. Государственная геологическая карта России, утвержденная Научно-редакционным советом Министерства геологии СССР при ВСЕГЕИ 15 октября 1980 г. / Ред. А.А. Кривонос, Н.П. Пежемская / Севморгео. 12 июня 1980 г.
23. Громова В.И. Об остатках носорога Мерка (Rhinoceros mercki Jaeg.) с Нижней Волги // Тр. ПИН АН СССР. 1935. Т. 4. С. 91–136.
24. Шпанский А.В. Новые находки носорога мерка (Stephanorhinus kirchbergensis Jäger 1839) (Rhinocerotidae, Mammalia) в Томском приобье // Геосферные исследования. 2016. № 1. С. 24–39.
25. Общая стратиграфическая шкала, утвержденная Межведомственным стратиграфическим комитетом России на 2019 год. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-08.jpg>.
26. Международная хроностратиграфическая шкала, утвержденная Международной комиссией по стратиграфии на 2020 год URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.PDF>.
27. Kahlke R.-D., Lacombe F. The earliest immigration of woolly rhinoceros (Coelodonta tologojensis, Rhinocerotidae, Mammalia) into Europe and its adaptive evolution in Palaearctic cold stage mammal faunas / Quaternary Science Reviews. 2008. No. 27. P. 1951–1961.

Поступила в редакцию 12.04.2020

Принята к публикации 25.07.2020

Об авторах

ПЛОТНИКОВ Валерий Валерьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Отдел изучения мамонтовой фауны Академии наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, Россия,
SPIN-код: 8781-8443. <https://doi.org/0000-0002-4870-3499>. ScopusID: 55899541200. mammuthus@mail.ru;

МАЩЕНКО Евгений Николаевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Палеонтологический институт им. А.А. Борисьяка РАН, 117647, Москва, ул. Профсоюзная, 123, Россия; Отдел изучения мамонтовой фауны Академии наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, Россия, SPIN-код: 5533-8538, AuthorID: 70148. evmach@mail.ru.

Информация для цитирования

Плотников В.В., Мащенко Е.Н. Новые данные о границах ареала шерстистого носорога (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) в позднем плейстоцене // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 40–48. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-4>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-4

New data on the range boundaries of the woolly rhinoceros (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) in the late Pleistocene

V.V. Plotnikov^{1*}, E.N. Mashchenko^{1,2}

¹The Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

²Borisyak Paleontological Institute RAS, Moscow, Russia

*mammuthus@mail.ru

Abstract. A skull of a woolly rhinoceros (*C. antiquitatis*) is described, which was found in 2018 on the bank of the Kozhevena river in the North of the island of Kotelny (the New Siberian Islands archipelago) during the expedition of the Department of mammoth fauna research of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) and the Borissiak Paleontological Institute (Moscow). A comparative analysis of craniological features of the skull is presented in comparison with three skulls of *C. antiquitatis* from the continental part of Yakutia (Megino-Kangalassky, Nizhnekolymsky and Abysky districts). The woolly rhinoceros differs from other modern and extinct rhinoceros species by having a completely ossified nasal septum. Ossification of this septum in this species proceeds with maturing and, in addition, is determined by the intensity of horns use in the extraction of foot food. The nasal septum of the test sample was not completely ossified (about 80 %). Apparently, this individual was sexually mature but not old. The development of exostoses shows that this was a young male. At the moment, this is the northernmost find of the remains of this species. At the end of the upper Pleistocene, the New Siberian Islands were part of the mainland. The distribution of *C. antiquitatis* seems to have reached the Northern borders of the Beringian landmass.

Key words: The upper Pleistocene, Yakutia, woolly rhinoceros, distribution of mammals of the mammoth fauna, the New Siberian Islands archipelago, the Kotelny island.

Acknowledgements. The authors are grateful to the head of the Department for the study of mammoth fauna of the Academy of Sciences of the RS(ya), doctor of biology A.V. Protopopov and research engineer I. S. Pavlov for organizing an expedition to the island. Boiler.

References

1. Boeskorov G.G., Lazarev P.A., Bakulina N.T., Shchelchkova M.V., Davydov S.P., Solomonov N.G. Predvaritel'nye dannye o nahodke mumificirovannogo trupa iskopaемого шерстистого носорога в низов'ях реки Колымы // Dokl. RAN. 2009. Vol. 424, No. 4. P. 570–573.
2. Boeskorov G.G., Lazarev P.A., Sher A.V., Davydov S.P., Bakulina N.T., Shchelchkova M.V., Binladen J., Willerslev E., Buigues B., Tikhonov A.N. Woolly rhino discovery in the lower Kolyma River // Quaternary Science reviews, 2011. Vol. 30, No. 17-18. P. 2262–2272.
3. Garutt N.V. Sherstistye nosorogi (Morfologiya, sistematika, geologicheskoe znachenie): Diss. kand. geol.-min. nauk. SPb., 1998. 235 p.
4. Zhegallo V.I., Kalandadze N.N., Shapovalov A.V., Bessudnova Z.A., Noskova N.G., Tesakova E.M. Ob iskopaemykh nosorogah jelsmoterijah (s privlecheniem materialov iz kolekcij Geologicheskogo muzeja im. V.I. Vernadskogo RAN) // VM-Novitates. Novosti iz Geologicheskogo muzeja im. V. I. Vernadskogo. 2002. No. 9. 48 p.
5. Kahlke R.-D. The history of the origin, evolution and dispersal of the Late Pleistocene Mammuthus-Coelo-

- donta faunal complex in Eurasia (large mammals) // *Quaternary Science Reviews*. 2001. No. 20. P. 1159–1165.
6. Chernova O.F., Kirillova I.V. Novye dannye o morfologii roga sherstistogo nosoroga (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) // *Trudy Zoologicheskogo instituta RAN*. 2010. Vol. 314. No. 3. P. 333–342.
 7. Sher A.V. Mlekopitajushhie i stratigrafija Plejstocena krajnego severo-vostoka SSSR i severnoj Ameriki. M.: Nauka, 1971. 297 p.
 8. Lazarev P.A. Novaja nahodka skeleta sherstistogo nosoroga v Jakutii // *Tr. Zool. in-ta AN SSSR*. 1977. Vol. 63. P. 281–285.
 9. Garutt N.V., Boeskorov G.G. Sherstistye nosorogi: k istorii roda // *Mamont i ego okruzhenie: 200 let izucheniya* / Red. A.Ju. Rozanov. M.: Geos, 2001. P. 157–167.
 10. Vollosovich K.A. Mamont ostrova Bol'shogo Ljahovskogo (Novosibirskie ostrova): Geologicheskij ocherk // *Zap. Imp. Mineral. ob-va. Vtoraja serija*. 1915. Ch. 50. P. 305–338.
 11. Vangengejm Je.A. Fauna chetvertichnyh mlekopitajushhih o. Bol'shoj Ljahovskij // *Tr. Arkticheskogo i Antarkticheskogo Nauch.-Issled. In-ta*. 1963. Vol. 224. P. 73–88.
 12. Lazarev P.A., Tomskaja A.I. Mlekopitajushhie i biostratigrafija pozdnego kajnozoja Severnoj Yakutii. Yakutsk: JaF SO AN SSSR, 1987. 169 p.
 13. Lazarev P.A., Boeskorov G.G., Tomskaja A.I., Garutt N.V., Vasil'ev E.M., Kasparov A.K., Rodionov G.N. Mlekopitajushhie antropogena Yakutii / YaNTS SO RAN, 1998. 158 p.
 14. Vereshhagin N.K. Ot ondatry do mamonta. Put' zoologa. SPb.: Asterion, 2002. 336 p.
 15. Lazarev P.A. Kadastr mestonahozhdenij fauny mlekopitajushhih pozdnego kajnozoja Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2002. 54 p.
 16. Tihonov A.N. Mamont. M.; SPb: T-vo nauchnyh izdanij KMK, 2005. 90 p.
 17. Lazarev P.A. Krupnye mlekopitajushhie antropogena Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2008. 160 p.
 18. Boeskorov G.G. Nekotorye morfologicheskie i ekologicheskie osobennosti iskopaemogo sherstistogo nosoroga *Coelodonta antiquitatis* (Blumanbach, 1799) // *Zoologicheskij zhurnal*. 2012. Vol. 91, No. 2. P. 219–235.
 19. Lazarev P.A., Boeskorov G.G., Tihonov A.N. Novye nahodki ostatkov mamontov s mjadgimi tkanjami v Jakutii // *Mamont i ego okruzhenie: 200 let izucheniya*. M.: GEOS, 2001. P. 139–144.
 20. Kuznecova T.V., Starodubceva I.A. Mamonty i istorija geologicheskogo izucheniya poberezh'ja morja Laptevych i Novosibirskih ostrovov // *Sistema morja Laptevych i prilegajushhih morej Arktiki: sovremennoe sostojanie i istorija razvitiya*. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2009. P. 481–500. DOI: 10.31857/S013207690006730-5.
 21. Boeskorov G. Woolly rhino (*Coelodonta antiquitatis*) distribution in Northeast Asia // *Deinsea*. 2001. No. 8. P. 15–20.
 22. Kos'ko M.K., Bondarenko N.S. Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossii, utverzhennaja Nauchno-redakcionnym sovetom Ministerstva geologii SSSR pri VSEGEI 15 oktjabrja 1980 g. Red. A.A. Krivonos, N.P. Pezhemskaja / *Sevmorgeo* 12 ijunja 1980 g.
 23. Gromova V.I. Ob ostatkah nosoroga Merka (*Rhinoceros mercki* Jaeg.) s Nizhnej Volgi // *Tr. PIN AN SSSR*. 1935. Vol. 4. P. 91–136.
 24. Shpanskij A.V. Novye nahodki nosoroga merka (*Stephanorhinus kirchbergensis* Jäger 1839) (*Rhinocerotidae*, *Mammalia*) v Tomskom priob'e // *Geosfernye issledovaniya*. 2016. No. 1. P. 24–39.
 25. *Obshhaja stratigraficheskaja shkala, utverzhennaja Mezhdomestvennym stratigraficheskim komitetom Rossii na 2019 god*. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2018-08.jpg>.
 26. *Mezhdunarodnaja hronostratigraficheskaja shkala, utverzhennaja Mezhdunarodnoj komissiej po stratigrafii na 2020 god*. URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.PDF>.
 27. Kahlke R.-D., Lacombe F. The earliest immigration of woolly rhinoceros (*Coelodonta tologiensis*, *Rhinocerotidae*, *Mammalia*) into Europe and its adaptive evolution in Palaearctic cold stage mammal faunas / *Quaternary Science Reviews*. 2008. No. 27. P. 1951–1961.

About the authors

PLOTNIKOV Valery Valerevich, candidate of biological sciences, senior researcher, Department of mammoth fauna studies, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenina pr., Yakutsk 677007, Russia, SPIN-code: 8781-8443. <https://doi.org/0000-0002-4870-3499>. ScopusID: 55899541200. mammuthus@mail.ru;
 MASCHENKO Yevgeny Nikolaevich, candidate of biological sciences, senior research fellow, A.A. Borisyak Paleontological Institute RAS, 123 Profsouznaya street, Moscow 117647, Russia; Department of mammoth fauna research of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenina pr., Yakutsk 677007, Russia, SPIN-code: 5533-8538, AuthorID: 70148, evmach@mail.ru.

Citation

Plotnikov V.V., Mashchenko E.N. New data on the range boundaries of the woolly rhinoceros (*Coelodonta antiquitatis* Blumenbach, 1799) in the late Pleistocene // *Arctic and Subarctic Natural Resources*, Vol. 25, No. 3, P. 40–48. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-4>

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345.2 (551.89)

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-5

Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия)

В.В. Спектор¹, Huijun Jin², Н.В. Торговкин¹, Г.Т. Максимов¹,
В.Б. Спектор¹, И.И. Сыромятников¹

¹Институт мерзлотоведения им. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE),

Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS)

vvspector@mpi.ysn.ru

Аннотация. Толща дисперсных многолетнемерзлых четвертичных отложений мощностью около 100 м вскрыта скважиной в центральной части Лено-Амгинской равнины. По литогенетическим и криолитологическим особенностям в разрезе выделены шесть пачек: I – сезонного промерзания-протаивания (инт. 0–1,1 м); II – покровных суглинков (1,1–2,65 м); III – ледового комплекса (2,65–26,15 м); IV – озерных (26,15–63,45 м); V – озерно-аллювиальных (63,45–78,9 м); VI – аллювиальных (78,9–94,5 м) отложений. Две верхние пачки (I и II) относятся к криогенному элювию. Пачка III характеризуется низкой плотностью, высокими показателями весовой влажности, содержания органического вещества и минерализации, наличием повторно-жильных льдов и разнообразием криотекстур. Эти особенности отложений указывают на отсутствие диагенетических преобразований осадков. Состав стабильных изотопов повторно-жильных льдов свидетельствует об их происхождении, в основном, за счет снеговой влаги. Пачки IV–VI характеризуются ненарушенной слоистостью, отсутствием ледяных шлиров, повсеместным присутствием массивной криогенной текстуры, более высокой плотностью, низкими показателями минерализации и содержания органического вещества. Перечисленные особенности пачек IV–VI свидетельствуют о более глубоких преобразованиях осадков, соответствующих окончанию начальной стадии диагенеза. По степени диагенетических преобразований осадков, предшествующих промерзанию, пачка III отнесена к синкриогенным, а пачки IV–VI – к эпикриогенным отложениям. Изменения режима накопления и промерзания осадков на Лено-Амгинской равнине связаны с климатическими колебаниями и оледенениями. Промерзание основного объема эпикриогенной толщи происходило в каргинско-сартанское время позднего неоплейстоцена.

Ключевые слова: криолитозона, синкриогенные и эпикриогенные отложения, Центральная Якутия, повторно-жильные льды, криотекстуры, стабильные изотопы кислорода и водорода.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-55-53054 и ГФЕН Китая № 41811530093. Коллектив благодарит д-ра Х. Майера за оказание методической помощи при выполнении анализа стабильных изотопов.

Введение

Лено-Амгинская равнина [1] является одним из крупнейших регионов перигляциальной области Средней Сибири. Перигляциальные образования плейстоцена этого региона представляют собой специфические типы осадков и формы рельефа, развитые в областях, сопредельных с ледниковыми [2–5]. В 2018 г. представительный разрез четвертичных отложений был вскрыт 100-метровой скважиной в 10 км к востоку от

аласа Мюрю (62,659659° с.ш., 131,386478° в.д.; абс. отм. устья 215 м н.у.м.) (рис. 1).

Представленный разрез сложен дисперсными четвертичными многолетнемерзлыми отложениями, в котором выделены синкриогенный и эпикриогенный типы.

Результаты исследования

Криолитологическая характеристика. На основании криолитологической характеристики,

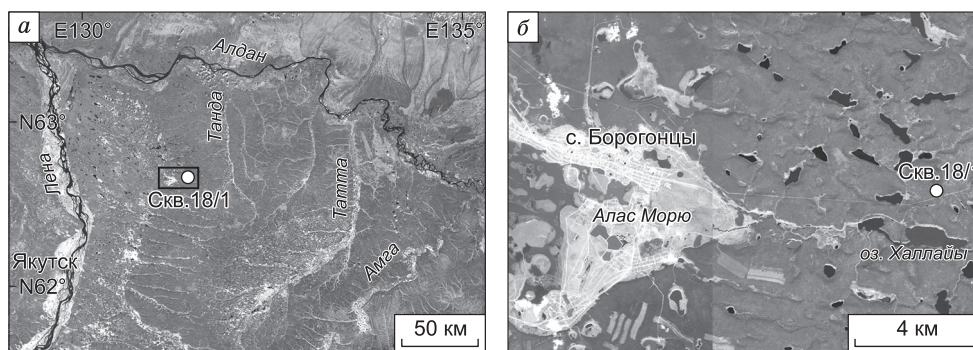


Рис. 1. Местоположение скв. 18/1:

а – на высокой Лено-Амгинской равнине; *б* – относительно аласа Мюрю.

Fig. 1. Location of the Borehole 18/1:

a – on the high Lena and Amga Rivers plain; *b* – in relation to the alas Myuryu.

криогенных особенностей и генезиса осадков вскрытый до глубины 94,5 м разрез четвертичных отложений был разделен на несколько пачек, последовательно сменяющих друг друга (рис. 2). Возраст отложений [6] был предварительно определен на основании палинологического анализа, который в данной работе не приводится. Сверху вниз выделяются: I. Пачка сезонного промерзания – протаивания (инт. 0–1,1 м), голоцен; II. Пачка покровных суглинков (1,1–2,65 м), верхняя часть сартанского горизонта; III. Пачка ледового комплекса (2,65–26,15 м), сартанский–каргинский горизонты. IV. Пачка озерных отложений (26,15–63,45 м), нижняя часть каргинского горизонта–зырянский, тазовский, ширтинский и верхняя часть самаровского горизонта. V. Пачка озерно-аллювиальных отложений (63,45–78,9 м), самаровский горизонт, верхняя часть тобольского горизонта. VI. Пачка аллювиальных отложений (инт. 78,9–94,5 м), тобольский горизонт–ранний неоплейстоцен.

Первая пачка сезонного промерзания-протаивания (инт. 0–1,1 м) представлена двумя слоями: в верхней части (до 10 см) – прерывистым почвенно-растительным слоем, в нижней – светло-коричневой супесью с тонкой сланцеватой текстурой. Весь слой пронизан корешками современных растений. Криотекстура слоя массивная.

Вторая пачка покровных суглинков (инт. 1,1–2,65 м) сложена светло-коричневыми и коричневыми массивными суглинками, с несогласием залегающими на подстилающих отложениях. В верхней части отмечаются линзовидные включения темно-коричневой криотурбированной почвы. Криотекстура тонко- и микрошлировая горизонтально-слоистая; на глубине 2 м переходит в

тонкошлировую, а затем в массивную; у подошвы слоя – в линзовидную наклонную.

Третья пачка ледового комплекса (инт. 2,65–26,15 м) характеризуется высоким содержанием ледового компонента, разнообразием и насыщенностью криогенных текстур. Минеральная часть отложений однообразна и представлена суглинком светло-коричневым массивным неясно-горизонтально- и наклоннослоистым. В отдельных интервалах разреза отмечается ожелезнение, нередко встречается растительный детрит. По особенностям строения пачку можно разделить на верхнюю и нижнюю части.

Верхняя часть пачки (2,65–17,63 м), соответствующая сартанскому горизонту, включает три горизонта повторно-жильных льдов: ПЖЛ 1 (инт. 2,65–4,6 м), ПЖЛ 2 (5,85–6,72 м) и ПЖЛ 3 (11,88–13,95 м). Отдельные фрагменты ПЖЛ встречены на глубинах: 10,77, 15,5 и 17,55 м.

Повторно-жильный лед в большей части прозрачный, вертикально-полосчатый. Полосчатость подчеркнута чередованием более темных полос минерального вещества во льду. Пузырьки газовых включений имеют округлую форму, диаметр 1–2 мм, ориентированы в вертикальные цепочки.

Контактная зона ПЖЛ и вмещающих суглинков характеризуется высокой льдонасыщенностью, разнообразием и распространением сложных слоистых криотекстур. Наряду с микро- и тонкими шлирами льда отмечаются косые шлиры толщиной до 4 мм. Вмещающие породы имеют преимущественно тонкослоистую или массивную криотекстуру. Реже наблюдается порфировидная, микрошлировая, горизонтальная и вертикальная, хаотичная, слоисто-сетчатая с гнездовидными включениями и поясковая. Отмечаются суб-

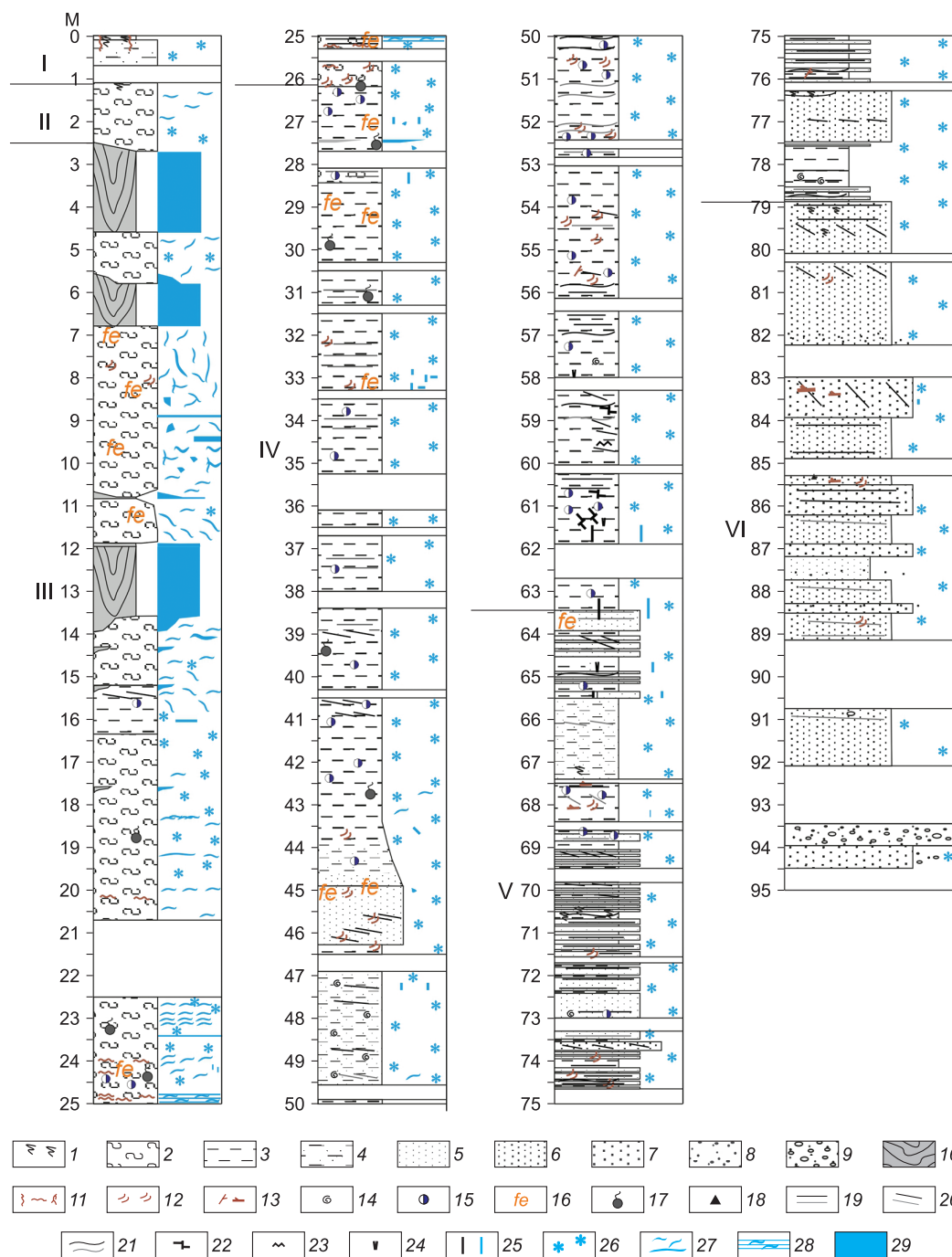


Рис. 2. Схема разреза скважины 18/1.

1 – почва; 2 – суглинок; 3 – алеврит; 4 – супесь; 5 – песок мелкозернистый; 6 – песок среднезернистый; 7 – песок крупнозернистый; 8 – гравий; 9 – галечник; 10 – повторно-жильные льды; 11 – корешки; 12 – растительный детрит; 13 – ветки и обломки древесины; 14 – раковины; 15 – включения вивианита; 16 – ожелезнение; 17 – резкий запах; 18 – угольная крошка; 19–21 – слоистость: соответственно горизонтальная, косая, волнистая, серыми линиями отмечена неясная слоистость; 22 – микросбросы; 23 – турбация; 24 – клиновидное включение; 25 – узкие трещины, заполненные льдом; 26 – массивная криотекстура; 27 – тонко- и толстошпировая криотекстура; 28 – сложнопоясковая криотекстура; 29 – лед.

Fig. 2. Schematic view of the Borehole 18/1 section.

1 – soil; 2 – loam; 3 – silt; 4 – sandy loam; 5 – fine sand; 6 – middle sand; 7 – coarse sand; 8 – gravel; 9 – pebbles; 10 – wedge ice; 11 – small roots; 12 – plant detritus; 13 – branches and wood fragments; 14 – shells; 15 – vivianite inclusions; 16 – ferrugination; 17 – strong smell; 18 – charcoal small chips; 19–21 – bedding: horizontal, oblique, wavy, grey lines depict unclear layering; 22 – micro-faults; 23 – turbation; 24 – wedge-like inclusions; 25 – narrow cracks filled with ice; 26 – ice-cement; 27 – thin- and thick layered cryostructure; 28 – complex belt-like cryostructure; 29 – ice.

горизонтальные прослои льда толщиной 2–3 см, одиночные ломаные и ветвящиеся вертикальные прожилки льда толщиной до первых сантиметров. Нередки смещения жил по горизонтальным плоскостям.

Нижняя часть пачки (17,63–26,15 м) не содержит ПЖЛ. Минеральная составляющая представлена светло-серыми и светло-коричневыми суглинками массивными и неясно-горизонтально-слоистыми с включением растительных остатков и пятнами вивианита. Текстурирующие льды формируют тонко-, микрослоистые и поясковые текстуры. Отмечаются ветвящиеся вертикальные прожилки льда. К нижней части разреза льдонасыщенность заметно уменьшается.

Четвертая пачка озерных отложений (инт. 26,15–63,45 м) представлена алевроитом с включениями корешков и мелких растительных остатков, пятнами оглеения, пятнами и полосами ожелезнения вдоль наклонных трещин. Весьма редко встречаются примеси песка. Отмечаются включения мелких (около 1 мм) белых раковин моллюсков (инт. 46,25–46,5 м).

Слоистость в верхней части пачки до глубины 40 м обусловлена чередованием через 1–4 см более темных, обогащенных органикой, и более светлых пылеватых осадков. Глубже 40,5 м, наряду с неясной горизонтальной слоистостью, отмечается косая и волнистая слоистость, реже массивное сложение. Слоистость обусловлена чередованием коричневых и серых прослоев толщиной 1–5 мм. Отмечаются многочисленные пятна оглеения диаметром 2–5 мм, подчиненные слоистости.

Криотекстура пачки массивная. Только на глубине 42,65–43,18 м наблюдаются тонкие (1 мм) субгоризонтальные и наклонные линзочки льда на фоне массивной криотекстуры. Нередко наблюдаются смещения первичного залегания слоев.

Пятая пачка озерно-аллювиальных отложений (инт. 63,45–78,9 м) сложена мелкозернистыми и среднезернистыми песками, переслаиваемыми с алевроитами. Среди осадков пачки заметную роль играет органогенный материал (растительные остатки, редкие мелкие раковины моллюсков). Пески и алевроиты образуют частое переслаивание и, реже, слои с однородной литологией. В пачке наблюдаются различные виды слоистости: неясно пологонаклонная, горизонтальная, волнистая линзовидная. В инт. 73,91–73,96 м наблюдаются косые слои песка. Нижняя

граница с подстилающим слоем резкая, наклонная (около 10°). Криотекстура массивная (ледцемент); отмечается выполнение льдом редких и узких субвертикальных трещин. Деформации слоев редки и отмечены только в верхней части пачки.

Шестая пачка аллювиальных отложений (инт. 78,9–94,5 м) сложена песками, преимущественно среднезернистыми и крупнозернистыми, гравийниками и галечными конгломератами. Слоистость отложений субгоризонтальная и косая, обусловленная чередованием прослоев песка светло-серого толщиной 1–2 см и темно-серого толщиной 2–3 мм. Отмечаются включения растительного детрита и редко крошек каменного угля. В инт. 83,24–83,3 м включение древесного ствола размером 8×5 см. С глубины 89,15 м до забоя скважины вскрывается галечник, представленный среднеокатанной галькой (кварца, кварцита, кремня, эффузивов и др.) размером 2–3 см. Заполнитель – песок крупнозернистый, грубозернистый, с гравийными зернами. В пачке наблюдалась исключительно массивная криотекстура. Крайне редко заполненные льдом узкие трещины.

Весовая влажность, объемный вес, содержание органики. Определения весовой влажности были выполнены для 67 образцов пород путем высушивания образцов массой около 100 г в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы [7]. В тех же образцах была определена плотность мерзлого грунта методом обратного взвешивания в нейтральной жидкости и содержание органического вещества методом потери массы после прокалывания при температуре 450 °С в течение 4 ч. Результаты представлены на рис. 3.

Для пачки I характерны относительно низкие значения весовой влажности в верхней части разреза (13,5 %), связанные с миграцией влаги и иссушением осадков верхнего слоя. Ближе к подошве СТС весовая влажность увеличивается.

Отложения пачки II характеризуются увеличением содержания влаги (32,5–42 %) сверху вниз по разрезу.

В породах пачки III значения влажности существенно увеличиваются, составляя в среднем 58,7 %. Максимальное значение (111,1 %) наблюдается в интервале 9,15–9,19 м вблизи краевой части ледяной жилы. Минимальное значение (36,2 %) принадлежит инт. 23,05–23,11 м, где вскрываются суглинки с массивной криотекстурой.

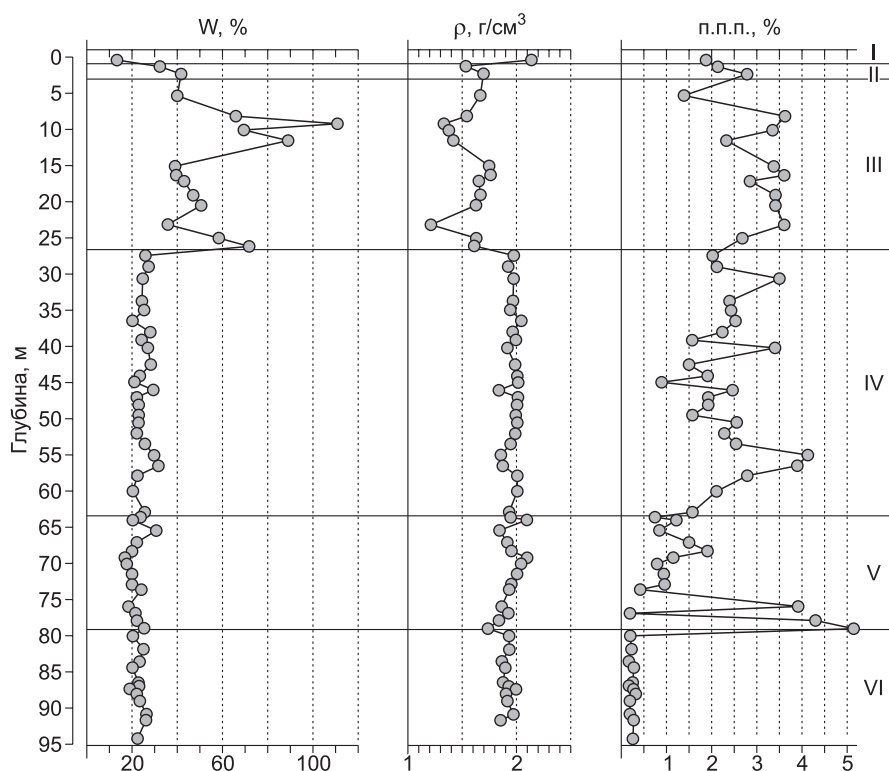


Рис. 3. Показатели весовой влажности (W), объемного веса (ρ) и потери органического вещества при прокаливании (п.п.п.) в мерзлых отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 3. Values of the weight water content (W), bulk volume (ρ), and lost of organic matter on ignition (LOI) in the frozen sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

В пачке IV с массивной криотекстурой среднее значение влажности снижается до 25,1 %. Максимум (31,7 %) наблюдается в инт. 56,5–65,54 м, а минимум (20,5 %) – в инт. 36,39–36,5 м.

Для пачки V характерна массивная криотекстура. Значения весовой влажности здесь еще больше снижаются: среднее (23,1 %), максимум (30,8 %) в интервале 65,42–65,48 м, минимум (17,1 %) в интервале 69,23–69,31 м.

Для песков пачки VI с массивной криогенной текстурой характерны следующие значения весовой влажности: среднее (23,2 %), максимум (26,5 %), минимум (19,2 %).

Имеет место высокая отрицательная корреляция ($-0,81$), при которой увеличение весовой влажности связано с уменьшением объемного веса. Так, средние значения объемного веса составляют 2,27 г/см³ (пачка I), 1,62 (пачка II), 1,56 г/см³ (пачка III), 1,97 г/см³ (пачка IV), 1,96 г/см³ (пачка V) и 1,91 г/см³ (пачка VI). Наименьшие значения объемного веса характерны для пород ледового комплекса, указывая на самую высокую степень льдонасыщения.

Содержание органического вещества имеет слабую отрицательную корреляцию ($-0,42$) с объемным весом. Это указывает, с одной стороны, на то что при росте показателя плотности количество органического вещества снижается, а с другой, на то что количество последнего в породе в целом незначительно. Так, средние значения органики в породе составляют 2,27 % (пачка I), 3,05 (пачка III), 2,34 (пачка IV), 1,45 % (пачка V) и 0,61 % (пачка VI). Максимальный показатель (5,14 %) приходится на интервал 79,04–79,11 м, что объясняется частичным опробованием линзы аллохтонного растительного детрита в песках.

Гранулометрический состав. Гранулометрический и микроагрегатный состав грунтов был определен для 67 образцов с помощью ситового метода без промывки водой для фракций более 0,1 мм и ареометрического метода для фракций менее 0,1 мм [8]. Полученные результаты были подвергнуты статистической обработке в программе GRADISTAT [9] на основании логарифмического метода, с помощью которой были по-

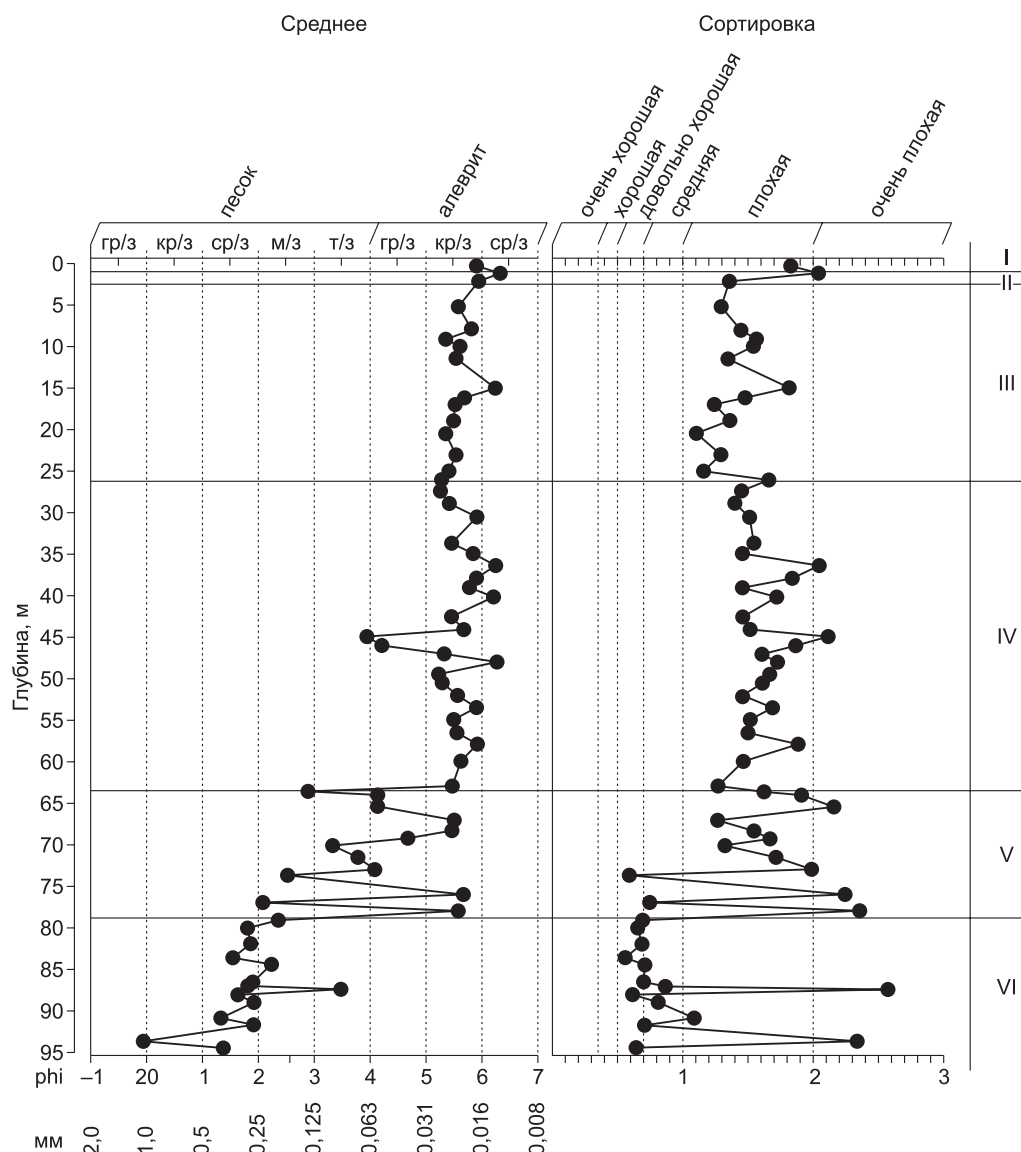


Рис. 4. Средний размер зерен и коэффициент сортировки в отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 4. Average grain size and coefficient of sorting in the sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

лучены значения среднего размера зерен в единицах ϕ и рассеивания (сортировки) (рис. 4). Для всей выборки характерно унимодальное распределение, за исключением образцов из инт. 64,0–64,11 м и 93,45–93,35 м, где наблюдается бимодальное распределение.

Пачка I представлена крупно- и среднезернистым алевритом (среднее 5,92 ϕ), имеющим плохую сортировку (1,83).

Пачка II характеризуется чуть более тонким составом (6,35–5,97 ϕ) и небольшим ухудше-

нием сортировки (2–1,3), что, вероятно, связано с процессом криогенного выветривания.

Пачка III сложена крупнозернистым алевритом, нередко с примесью тонкозернистого песка (среднее 5,67 ϕ), имеющим плохую и, редко, очень плохую сортировку (1,45). Показатель сортировки, по сравнению с пачками I и II, немного выше.

Пачка IV представлена крупнозернистым алевритом, часто с примесью тонкозернистого песка (среднее 5,56 ϕ), с плохой и в двух случаях с

очень плохой сортировкой (1,62). В среднем степень сортировки материала немного хуже, чем в вышележащих отложениях.

Пачка V представляет собой переслаивание мелкозернистого песка и крупнозернистого алеврита. В нижней части пачки появляются прослойки среднезернистого песка. Для всей пачки среднее значение составляет 4,16 ϕ , а коэффициент сортировки 1,63. Эти показатели не рассматриваются нами как репрезентативные из-за разнородности материала, но в целом можно отметить укрупнение размерности.

Пачка VI представлена переслаиванием песка средне- и мелкозернистого, в нижней части с примесью гравийных зерен (среднее 1,81 ϕ). В интервале 93,45–93,95 м отмечается галечник, состоящий из галек мелкого и среднего размера с гравием в песчаном заполнителе. Последний интервал, до глубины 94,5 м на забое скважины, представлен среднезернистым песком. Сортировка материала средняя и довольно хорошая (0,98), в двух случаях плохая и очень плохая. В целом отмечается укрупнение состава и улучшение сортировки по сравнению с вышележащими слоями.

Химический состав водных вытяжек. Анализ производился из водных вытяжек 35 образцов осадков [10], включая определения содержания катионов и анионов, pH и общей минерализации (рис. 5) и 3 образцов ПЖЛ. Относительное содержание ионов, выраженное в мг-эквивалентах от общей суммы ионов, вычислено согласно формуле О.А. Алекина; классификация выполнена по преобладающим ионам.

Пачка I представлена образцом, отобранным с подошвы почвенного горизонта. Он обладает низкой минерализацией (66,6 мг/л) с гидрокарбонатным магниевый-кальциевым составом со слабощелочным pH (7,33).

Пачка II. Образец, отобранный на границе слоя сезонного протаивания (2,2 м), обладает сульфатным кальций-магниевым составом с высокой минерализацией (430,3 мг/л), слабощелочным pH (7,35). Здесь многолетнемерзлые породы выступают в роли геохимического барьера, выраженным пиком минерализации.

Пачка III характеризуется гидрокарбонатным составом, смешанным по катионам, постепенно повышается влияние хлоридов; средняя минерализация составляет 128 мг/л, среда слабощелочная (среднее pH 7,3). На глубине 15 м, которая,

согласно температурным измерениям в скважине, соответствует подошве слоя нулевых годовых колебаний, состав солей меняется и становится сульфатным кальций-магниевым, а минерализация достигает пикового значения (329 мг/л).

Показатели общей минерализации (мг/л) и pH в горизонтах ПЖЛ составили соответственно: 51, 7,21 (ПЖЛ 1, инт. 3,3–3,6 м), 127, 7,56 (ПЖЛ 2, инт. 6,25–6,36 м) и 49,3, 7,34 (ПЖЛ 3, инт. 12,87–12,95 м). Отмечаются снижение степени минерализации льда по сравнению с водными вытяжками вмещающих отложений и сохранение окислительно-восстановительного потенциала на том же уровне.

Пачка IV характеризуется гидрокарбонатным составом, смешанным по катионам, среди которых, относительно других комплексов, высоко содержание иона аммония (до 21 %). Аммоний образуется за счет распада азотсодержащих органических соединений и характерен для отложений озер [11]. Отмечается снижение уровня минерализации, среднее значение которой составляет 95 мг/л, среда слабощелочная (среднее pH 7,4)

Пачка V имеет хлоридно-гидрокарбонатный состав, смешанный по катионам. Средняя минерализация составляет 82 мг/л. Среди катионов доминирующую роль приобретает натрий. Кроме того, в нижней части пачки происходит изменение pH со слабощелочного к слабокислому (среднее pH 7,1).

Пачка VI. В верхней части пачки состав – хлоридно-гидрокарбонатный, смешанный по катионам, в нижней части – среди катионов отчетливо доминирует натрий. Степень минерализации падает до, в среднем, 36 мг/л. Среда слабокислая (среднее pH 6,5).

Температуры многолетнемерзлых пород. Согласно полученным данным температурных измерений в скважине, выполненных логгером НОВО U12-008-04, за годовой период с 31.03.2018 по 02.09.2019 г. средняя температура на глубине 14,5 м, принятая за температуру на подошве слоя годовых теплооборотов, составила –3,25 °C, с амплитудой 0,38°. Результаты единичных замеров, выполненных термокосой ИМЗ СО РАН в выстоявшейся скважине, показали, что ниже подошвы слоя годовых теплооборотов наблюдается безградиентная зона, в которой температура колеблется в диапазоне от –3,03 до –3,3 °C. Температура пород вблизи забоя скважины, на глубине 81,5 м, составляет –3,25 °C.

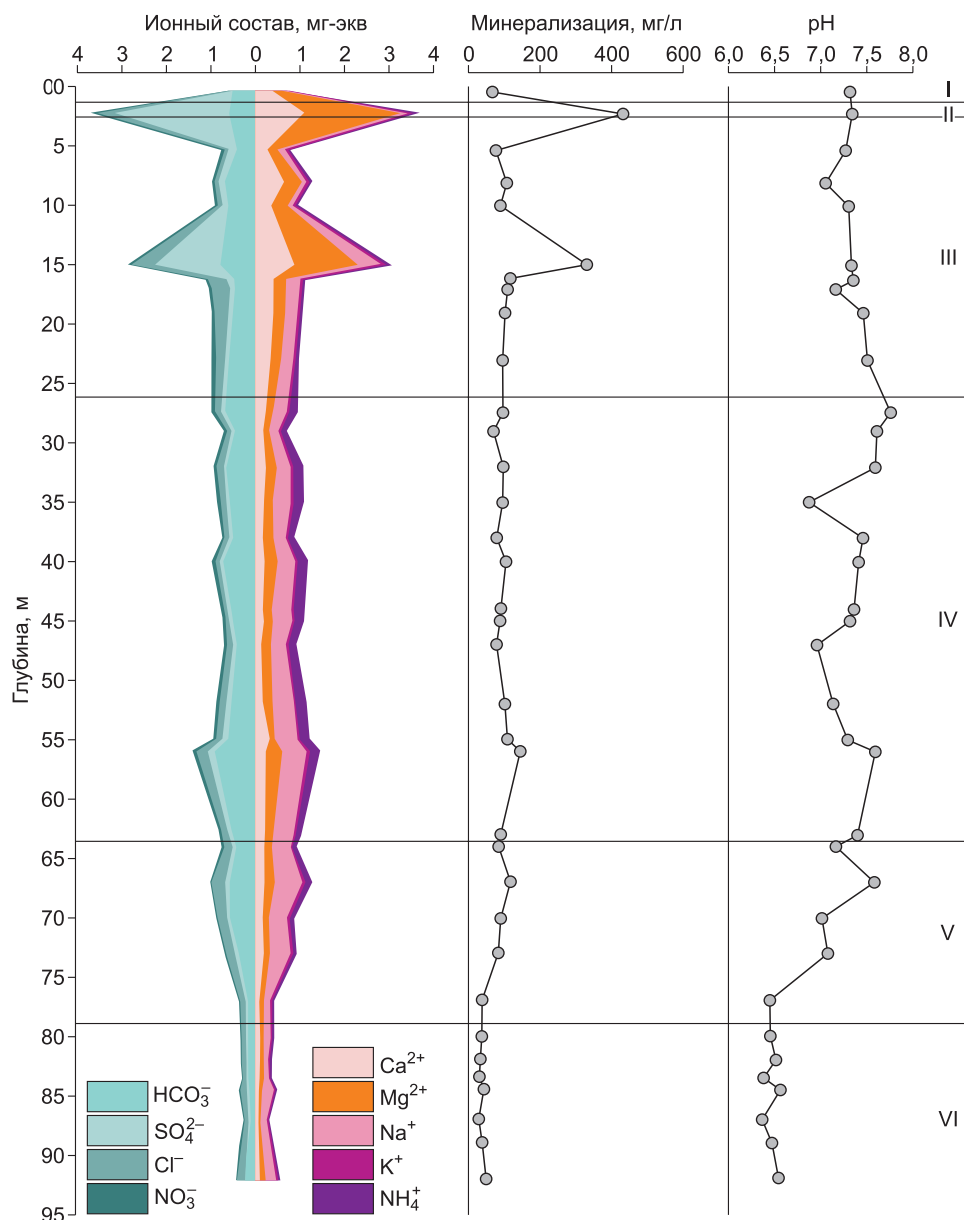


Рис. 5. Содержание растворимых компонентов в водных вытяжках, минерализация и водородный показатель в отложениях скв. 18/1. Римские цифры – нумерация пачек.

Fig. 5. Content of chemical components in water extracts, mineralization, and pH in sediments of the Borehole 18/1. Roman numerals depict numeration of sedimentary units.

Содержание стабильных изотопов кислорода и водорода. Анализ стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода (δD) и определение дейтериевого эксцесса (d_{ex}) были выполнены по 16 образцам, представленным повторно-жильным льдом из сплошного ледяного керна, льдом приконтактной зоны и текстуробразующим льдом (см. таблицу, рис. 6). Анализы выполнены

на масс-спектрометре Finnigan Mat Delta S в лаборатории стабильных изотопов Института морских и полярных исследований им. А. Вегенера, Германия.

Для всех опробованных подземных льдов уравнение регрессии $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ выражено зависимостью $\delta\text{D} = 9,2\delta^{18}\text{O} + 42,6$, при коэффициенте корреляции $R^2 = 0,94$.

**Содержание изотопов $\delta^{18}\text{O}$, δD и d_{ex} в подземных льдах скв. 18/1.
Расчетные январские, среднезимние и годовые температуры воздуха**

**Isotopic content of the $\delta^{18}\text{O}$, δD and d_{ex} in the ground ice of the Borehole 18/1.
Calculated January, mean winter and annual air temperatures**

Горизонт	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d_{ex}	$t_{\text{я}}$, °C	$t_{\text{сз}}$, °C	$t_{\text{г}}$, °C
ПЖЛ 1	2,85	–28,49	–220,6	7,2	–42,7	–28,5	–21,5
	3,11	–28,49	–219,9	8,1	–42,7	–28,5	–21,4
	3,45	–28,35	–218,1	8,8	–42,5	–28,4	–21,1
	3,91	–28,54	–218,9	9,3	–42,8	–28,5	–21,2
	4,58	–28,24	–217,5	8,4	–42,4	–28,2	–21,0
ПЖЛ 2	5,84*	–24,87	–187,9	11	–37,3	–24,9	–15,7
	6,36	–25,06	–188	12,5	–37,6	–25,1	–15,7
	6,56	–24,93	–186,2	13,2	–37,4	–24,9	–15,4
ТЛ	10,77	–25,6	–196,8	8	–38,4	–25,6	–17,3
ПЖЛ 3	11,97	–29,5	–233,6	2,4	–44,3	–29,5	–23,9
	12,62	–29,85	–236,7	2	–44,8	–29,9	–24,4
	12,97	–30,77	–243,2	3	–46,2	–30,8	–25,6
	13,62	–26,65	–199,4	13,8	–40,0	–26,7	–17,8
ПЖЛ-К	14,33	–25,86	–189,3	17,6	–38,8	–25,9	–15,9
ПЖЛ-К	15,23	–26,64	–196,2	16,9	–40,0	–26,6	–17,2
ПЖЛ-К	17,6	–30,47	–224,1	19,6	–45,7	–30,5	–22,2

Примечание. ПЖЛ – повторно-жильные льды, опробованные из сплошного ледяного керна; ПЖЛ-К, * – повторно-жильные льды, опробованные на контакте со вмещающей породой; ТЛ – текстурообразующие льды во вмещающей породе.

Note. ПЖЛ – wedge ice collected from massive ice core; ПЖЛ-К, * – wedge ice collected in the contact with enclosing ground; ТЛ – cryostructure ice in the enclosing ground.

Для ПЖЛ скв. 18/1 отмечается различное распределение изотопного состава по каждому из трех горизонтов (ПЖЛ 1, 2, 3, см. таблицу, рис. 6).

Верхний горизонт (ПЖЛ 1) характеризуется слабо дифференцированным изотопным составом с относительно низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$ (–28,54 ÷ –28,24 ‰) и δD (–217,5 ÷ –220,6 ‰). Выявленные особенности изотопной характеристики горизонта указывают на происхождение льдов за счет снеговой влаги [12].

Средний горизонт (ПЖЛ 2) отличается более высоким содержанием и дифференцированным распределением значений: $\delta^{18}\text{O}$ –24,87 ÷ –25,06 ‰ и δD –188 ÷ –186,2 ‰. Вероятно, что ПЖЛ этого горизонта формировались в условиях более теплого климата и при участии дождевой влаги [12].

Нижний горизонт (ПЖЛ 3) характеризуется наиболее легким и дифференцированным по разрезу составом: $\delta^{18}\text{O}$ –29,5 ÷ –30,77 и δD –243,2 ÷ –199,4 ‰. Льды этого горизонта формировались в условиях резко-континентально-

го климата, преимущественно за счет снеговой влаги и, вероятно, при некоторой доле дождевых вод.

Льды приконтактной зоны ПЖЛ (см. рис. 6) отличаются от льдов срединных частей более высоким и дифференцированным содержанием: $\delta^{18}\text{O}$ –30,47 ÷ –24,87 и δD –224,1 ÷ –187,9 ‰. Это явление может быть связано с фракционированием поровой влаги пород, примыкающих к жиле, в ходе ее миграции к фронту промерзания бокового контакта ледяной жилы.

Для срединных частей ПЖЛ водородный эксцесс, характеризующий отклонения изотопного состава от стандарта SMOW, имеет величины d_{ex} = 5–10 ‰, что близко к составу метеорных вод. Для контактных зон характерно увеличение d_{ex} = 10–20 ‰.

Данные изотопного состава позволяют оценить средние январские ($t_{\text{я}}$), среднезимние ($t_{\text{сз}}$) и среднегодовые ($t_{\text{г}}$) температуры воздуха во время формирования ПЖЛ (см. таблицу). Темпера-

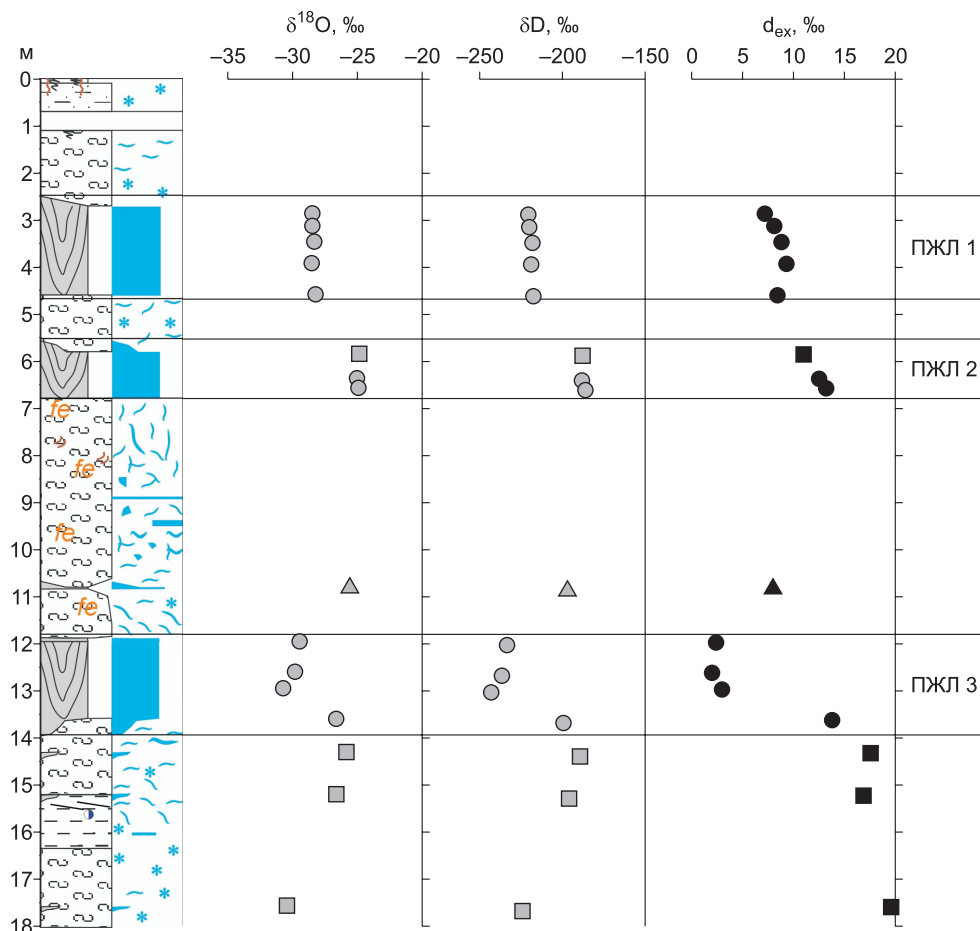


Рис. 6. Распределение $\delta^{18}\text{O}$ – δD , d_{ex} в повторно-жильных льдах скв. 18/1.

Кружки – ПЖЛ, опробованные из сплошного ледяного керна; квадраты – ПЖЛ, опробованные на контакте со вмещающей породой; треугольник – текстуровещающие льды во вмещающей породе.

Fig. 6. Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ – δD , d_{ex} in the wedge ice of the Borehole 18/1.

circles – wedge ice collected from massive ice core; squares – wedge ice collected in the contact with enclosing ground; triangle – cryostructure ice in the enclosing ground.

тура воздуха определялась по формуле для январских и среднезимних температур [13]

$$t_{\text{я}} = 1,5\delta^{18}\text{O} (\pm 3), \quad t_{\text{сз}} = \delta^{18}\text{O} (\pm 2,0).$$

Среднегодовые температуры воздуха определялись по формуле В. Дансгора [13]

$$t_{\text{сг}} = (\delta^2\text{H} + 100)/5,6.$$

Все полученные величины значительно (на 8–15 °C) ниже современных значений для Центральной Якутии. Исходя из сравнения полученных данных со среднежанварской (–37,2 °C) и среднегодовой (–7,8 °C) температурами воздуха за период с 2000 по 2019 г. по данным метеостанции г. Якутск [14], можно высказать предположение, что низкие среднегодовые значения температур в сартанское время были обеспече-

ны за счет более низких значений летних температур – в 2–3 раза ниже современных.

Обсуждение результатов

В изученном разрезе выделяются две существенно различные части: верхняя, представленная отложениями пачек I–III, и нижняя, сложенная пачками IV–VI. Эти две части разреза различаются по своему криогенному строению, литологии, химическому составу водных вытяжек, характеризующих как фациальные условия осадконакопления, так и условия промерзания. Верхняя часть разреза по своим геокриологическим особенностям может быть охарактеризована как *синкриогенная*, а нижняя часть – как *эпикриогенная*. По Н.Н. Романовскому, «синкриогенные отложе-

ния образуются в процессе одновременного накопления осадков и перехода в многолетнемерзлое состояние. Эпикриогенными называются породы, промерзающие после их накопления» [15, с. 140].

Две верхние пачки (I и II) относятся к криогенному элювию. В случае возобновления осадконакопления они могут перейти в многолетнемерзлое состояние.

К *синкриогенным* породам относится пачка ледового комплекса (III). Гранулометрический состав пачки близок к составу подстилающих озерных отложений, что указывает на его формирование за счет размыва и переотложения последних. Наличие повторно-жильных льдов и разнообразие криогенных текстур свидетельствуют об условиях высокой обводненности во время формирования пачки. Содержание органического вещества в осадках является максимальным (3,05 %) для разреза, что указывает на очень слабую диагенетическую переработку. Об этом же свидетельствует резко дифференцированная минерализация осадков (от 77 до 329 мг/л).

Данные особенности указывают на сингенетичное промерзание осадков в пределах прерывистого, мелководного, перемерзающего бассейна. Разнообразие криогенных текстур, их частая сменяемость указывают на высокую скорость промерзания осадков в условиях крайне сурового климата.

Эпикриогенные породы. Три нижние пачки (IV–VI) рассматриваемого разреза формировались в иных фациальных и геокриологических условиях.

Предполагается, что накопление озерных и озерно-аллювиальных осадков (IV–V) происходило в условиях не промерзающего до дна пресноводного бассейна.

На стадии раннего диагенеза [16] произошли уплотнение осадка и потеря большого объема поровой влаги. Эпигенетический механизм промерзания осадков подтверждается наличием ненарушенной первичной горизонтальной и волнистой слоистости озерных осадков, отсутствием ледяных шпиров и повсеместным присутствием массивной криогенной текстуры в тонкодисперсных отложениях. Этот вывод подтверждается уменьшением влажности (25,1 %), увеличением плотности (1,97 г/см³), снижением количества органического вещества (2,34 %) по сравнению с ледовым комплексом. Увеличивается значение иона аммония (до 21 %) и оглеения осадков, появляется резкий запах, что свидетельствует о зна-

чительной переработке органического вещества в условиях восстановительной среды (pH 7,4). Отмечается снижение уровня минерализации, среднее значение которой составляет 95 мг/л.

Пачка аллювиальных отложений (VI) формировалась в эпоху межледниковья на денудационно-аккумулятивной равнине в условиях динамического гидрологического режима. Средняя влажность отложений сходна с вышележащей пачкой (23,2 %), тогда как значение объемного веса снижается до 1,91 г/см³. Содержание органического вещества падает до минимума (0,61 %). Уменьшается и минерализация осадков (36 мг/л); среда слабокислая (pH 6,5).

Снижение значений pH в пределах пачек V и VI представляет собой нарушение закономерности увеличения щелочности осадков в ходе ранних диагенетических преобразований. По нашему мнению, это может объясняться увеличением содержания угольной кислоты в осадках, связанной с растворением карбонатов, привнесенных из близко расположенных областей сноса.

Заключение

Изучен наиболее полный разрез мощностью около 100 м многолетнемерзлых четвертичных отложений центральной части Лено-Амгинской перигляциальной равнины. Вскрытый разрез по фациальным, физическим и химическим особенностям отложений, криогенным текстурам может быть подразделен на синкриогенные и эпикриогенные толщи дисперсных отложений. Эпикриогенные дисперсные отложения в данном районе выделены впервые.

По нашему мнению, изменения режима накопления и промерзания осадков на Лено-Амгинской равнине связаны с климатическими колебаниями и оледенениями. Промерзание основного объема эпикриогенной толщи происходило в каргинско-сартанское время позднего неоплейстоцена.

Литература

1. Спектор В.Б., Спектор В.В. О происхождении высокой Лено-Амгинской перигляциальной равнины // Криосфера Земли. 2002. Т. VI, № 4. С. 3–12.
2. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья / Соловьев П.А. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 144 с.
3. Катасонов Е.М. Мерзлотно-фациальный анализ плейстоценовых отложений и палеогеография Центральной Якутии // Палеогеография и перигляциальные явления плейстоцена. М.: Наука, 1975. С. 16–22.

4. *Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины* / Иванов М.С. Новосибирск: Наука, 1984. 126 с.
5. Спектор В.В., Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Парфенов М.И. Роль ледников в преобразовании рельефа Лено-Амгинской равнины в плейстоцене и голоцене // Наука и образование. 2015. № 1(77). С. 42–49.
6. Спектор В.В. Происхождение криолитогенных комплексов высокой равнины Лено-Амгинского междуречья: Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Якутск, 2003. 23 с.
7. Межгосударственный стандарт. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2005. 19 с.
8. Межгосударственный стандарт ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2008. 18 с.
9. Blott S.J., Pye K. Gradstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. P. 1237–1248. Doi:10.1002/esp.261.
10. Методы химического анализа природных вод: методические указания / Г.П. Левченко, В.Н. Макаров. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2003. 86 с.
11. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2014. 189 с.
12. Деревягин А.Ю., Чижов, А.Б., Майер Х., Опель Т. Сравнительный анализ изотопного состава повторно-жильных и текстурных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 2. С. 15–24.
13. Основы изотопной геоэкологии и гляциологии: Учебник / Ю.К. Васильчук, В.М. Котляков. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
14. Справочно-информационный портал «Погода и климат». <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm>
15. Основы криогенеза литосферы / Н.Н. Романовский. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
16. Основы теории литогенеза. Том II. Закономерности состава и размещения гумидных отложений / Н.М. Страхов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. Изд. 2. 574 с.

Поступила в редакцию 26.05.2020

Принята к публикации 27.07.2020

Об авторах

СПЕКТОР Валентин Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7791-0972>, vvspector@mpi.ysn.ru;

JIN Huijun, PhD, research professor, State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE), Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS), 730000, 320 Donggang West Road, Lanzhou, Gansu, China, hjjin@lzb.ac.cn;

ТОРГОВКИН Николай Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2799-1468>, nick1805torg@gmail.com;

МАКСИМОВ Георгий Тимофеевич, младший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, mgt.qwerty@gmail.com;

СПЕКТОР Владимир Борисович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-4734-2396>, vspektor@mail.ru;

СЫРОМЯТНИКОВ Игорь Иннокентьевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4953-9704>, igor@mpi.ysn.ru.

Информация для цитирования

Спектор В.В., Jin Huijun, Торговкин Н.В., Максимов Г.Т., Спектор В.Б., Сыромятников И.И. Строение плейстоценовых криогенных отложений Лено-Амгинской равнины (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 49–62. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-5>

Structural features of Pleistocene cryogenic deposits in the Lena and Amga Rivers Plain (Central Yakutia)

V.V. Spektor¹, Huijun Jin², N.V. Torgovkin¹, G.T. Maksimov¹,
V.B. Spektor¹, I.I. Syromyatnikov¹

¹Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE),

Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS)

vvspektor@mpi.ysn.ru

Abstract. Dispersive perennially frozen Quaternary deposits, ca. 100 m thick, were intersected by a borehole drilled in the central part of the Lena – Amga River plain. By the lithogenetic and cryolithological properties of deposits, the section is divided into 6 units: I – seasonal freeze-thaw (int. 0–1.1 m); II – blanketing loams (int. 1.1–2.65 m); III – ice complex (int. 2.65–26.15 m); IV – lacustrine (int. 26.15–63.45 m); V – lacustrine-alluvial (int. 63.45–78.9 m); VI – alluvial (int. 78.9–94.5 m) deposits. Two upper units (I, II) are at the stage of incorporation into permafrost. Unit III is characterized by a low bulk volume, high levels of moisture, organic matter, and mineralization, the presence of wedge ice and a variety of cryostructures. These features indicate that diagenetic transformations of sediments are absent. Stable isotope content in ice wedges provides evidence that they had formed mostly from snow melt. Units IV–VI are characterized by undisturbed bedding, absence of ice layers, exclusive distribution of massive cryostructure, higher density, low levels of mineralization and organic content. The stated peculiarities of units IV–VI witness deeper transformation of sediments, corresponding to the termination of the initial stage of diagenesis. By a degree of sediment diagenetic transformations prior to freezing, unit III is related to syncryogenic, while units IV–VI refer to epicryogenic deposits. Changes in sedimentation and freezing of sediments on the Lena–Amga River plain are associated with climatic fluctuations and glaciations. Freezing of the major volume of epicryogenic stratum had taken place in the Karga-Sartan time of the Late Pleistocene.

Key words: cryolithozone, syncryogenic and epicryogenic deposits, Central Yakutia, wedge ice, cryostructures, stable isotopes of oxygen and hydrogen.

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR according to the research project №18-55-53054 and NSFC China №41811530093. Authors thank Dr. H. Meyer for methodological support in performing stable isotopes analysis.

References

1. Spektor V.B., Spektor V.V. O proiskhozhdenii vysokoi Leno-Amginskoi periglyatsialnoy ravniny // Kriosfera Zemli. 2002. Vol. VI, No. 4. P. 3–12.
2. Kriolitozona severnoi chasti Leno-Amginskogo mezhdurechya / Solov'ev P.A. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1959. 144 p.
3. Katasonov E.M. Merzlotno-fatsialnyi analiz pleistotsenovykh otlozhenii i paleogeografiya Tsentralnoy Yakutii // Paleogeografiya i periglyatsialnye yavleniya pleistotsena. Moskva: Nauka, 1975. P. 16–22.
4. Kriogennoe stroenie tchetvertichnykh otlozhenii Leno-Aldanskoi vpadiny / Ivanov M.S. Novosibirsk: Nauka, 1984. 126 p.
5. Spektor V.V., Spektor V.B., Bakulina N.T., Parfenov M.I. Rol lednikov v preobrazovanii rel'efa Leno-Amginskoi ravniny v pleistotsene i golotsene // Nauka i Obrazovanie. 2015. №1(77). P. 32–49.
6. Spektor V.V. Proiskhozhdenie kriolitogennykh kompleksov vysokoi ravniny Leno-Amginskogo mezhdurech'ya. Avtoref. dissertatsii na soiskanie uch. step. kandidata geograficheskikh nauk po spets. 25.00.08. Yakutsk: Institut merzlotovedeniya SO RAN, 2003. 23 p.
7. Mezhdgosudarstvennyi standart. GOST 5180-84. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik. Moskva: Standartinform, 2005. 19 p.
8. Mezhdgosudarstvennyi standart. GOST 12536-79. Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava. Moskva: IPK Izdatelstvo Standartov, 2008. 18 p.
9. Blott S.J., Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. P. 1237–1248. Doi:10.1002/esp.261.
10. Metody khimicheskogo analiza prirodnikh vod: metodicheskiye ukazaniya / G.P. Levchenko, V.N. Ma-

karov. Yakutsk: Izdatelstvo Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2003. 86 p.

11. *Gidrogeokhimicheskie* issledovaniya kriolitozony Tsentralnoy Yakutii / N.P. Anisimova, N.A. Pavlova. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatelstvo "GEO", 2014. 189 p.

12. *Dereviagin A. Yu., Chizhov A. B., Meyer H., Opel T.* Sravnitelny analiz izotopnogo sostava povtorno-zhilnykh i tekturnykh ldov poberezh'ya morya Laptevykh // *Kriosfera Zemli*. 2016. Vol. XX, No. 2. P. 15–24.

13. *Osnovy izotopnoi geokriologii i glyatsiologii: Uchebnik* / Yu.K. Vasil'chuk, V.M. Kotlyakov. Moskva: Izdatelstvo MGU, 2000. 616 p.

14. *Spravochno-informatsionny* portal «Pogoda i klimat». <http://www.pogodaiklimat.ru/history/24959.htm>

15. *Osnovy kriogeneza litosfery* / N.N. Romanovskii. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1993. 336 p.

16. *Osnovy teorii litogeneza*. Tom II. Zakonomernosti sostava i razmeshcheniya gumidnykh otlozhenii / N.M. Strakhov. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1962. 2nd ed. 574 p.

About the authors

SPEKTOR Valentin Vladimirovich, candidate of geographical sciences, leading research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7791-0972>, vvspektor@mpi.ysn.ru;

JIN Huijun, PhD, research professor, State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE), Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences (CAS), 730000, 320 Donggang West Road, Lanzhou, Gansu, China, hjjin@lzb.ac.cn;

TORGOVKIN Nikolai Vladimirovich, candidate of geological and mineralogical sciences, research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2799-1468>, nick1805torg@gmail.com;

MAKSIMOV Georgii Timofeevich, junior research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-6747-8621>, mgt.qwerty@gmail.com;

SPEKTOR Vladimir Borisovich, doctor of geological and mineralogical sciences, principal research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4734-2396>, vspektor@mail.ru;

SYROMYATNIKOV Igor Innokentievich, candidate of geological and mineralogical sciences, research scientist, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-4953-9704>, igor@mpi.ysn.ru.

Citation

Spektor V.V., Huijun Jin, Torgovkin N.V., Maksimov G.T., Spektor V.B., Syromyatnikov I.I. Structural features of Pleistocene cryogenic deposits in the Lena and Amga Rivers Plain (Central Yakutia) // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 49–62. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-5>

Обогащение полезных ископаемых

УДК 552.321.(571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6

Разработка конструкции нового измельчителя горных пород комбинированного действия

А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия
vaviro@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов измельчения в новом центробежном вертикальном измельчителе (ЦВИ) конструкции ИГДС СО РАН. Наиболее важными конструктивными факторами для нового типа оборудования, влияющими на эффективность измельчения геоматериалов с учетом их исходной максимальной крупности, являются зазор между рабочими органами и расположение узла разгрузки измельченного геоматериала (относительно центральной оси корпуса измельчителя). Модельными испытаниями на лабораторном образце установлены рациональные рабочие параметры вертикального центробежного измельчителя (угол разгрузки -150° , зазор между рабочими дисками – 3 мм). Изменения параметров данных факторов в заданных пределах позволяют управлять процессом измельчения, в комбинированном режиме многократных динамических и истирающих воздействий. Управление процессом измельчения заключается в возможности ограничения выхода недоизмельченных частиц из рабочей зоны измельчения, а также задавать степень сокращения продуктов дезинтеграции. Разработаны проект и рабочая документация на опытно-промышленный образец центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12 с производительностью до 12 т/ч.

Ключевые слова: центробежные мельницы, конструкция, измельчение, рабочие органы, эффективность измельчения, разгрузочный узел, частицы, измельченный материал, экспериментальные исследования, рабочие параметры.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР ИГДС СО РАН (№ 0297-2020-0043).

Введение

Одной из главных проблем горнодобывающей отрасли, требующей новых решений и подходов, является совершенствование дробильно-измельчительного оборудования для снижения затрат на подготовительные процессы при добыче полезных ископаемых (дробление, измельчение) [1–8].

В настоящее время в России и за рубежом активно ведутся работы по разработке малогабаритных и высокоэффективных измельчительных установок, предназначенных для переработки различных видов минерального сырья, наибольшее распространение среди которых получили центробежные измельчители ударного действия [9–17]. Это связано с тем, что они менее энергозатратны, просты по конструкции и имеют небольшие габаритные размеры при относительно высокой удельной производительности. В мире

разработано и создано множество ударных измельчительных установок, однако большинство существующего парка ударных измельчителей в своих конструктивных решениях не до конца учитывают многообразие физико-механических свойств измельчаемого сырья и в, частности, реализуют ограниченные одноактные механические воздействия, недостаточные для эффективного разрушения геоматериала [18–29]. Повышение эффективности измельчения невозможно без новых конструктивных решений в центробежных измельчителях, направленных на создание рациональных условий ударного разрушения материала в рабочей зоне измельчения аппарата.

В лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН разработан и запатентован ряд новых центробежных мельниц, основанных на принципе интенсивного разрушения ку-

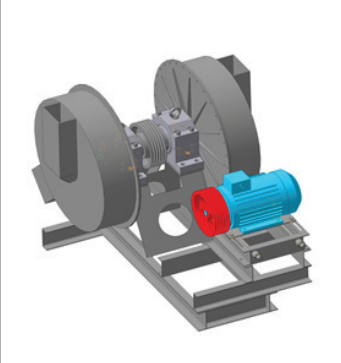
	ПАРАМЕТРЫ	ЕД. ИЗМ.	ПОКАЗАТЕЛИ
	НАИБОЛЬШИЙ РАЗМЕР ИСХ. КУСКА	ММ	5–20
	ДИАМЕТР	ММ	1200
	РАЗМЕРЫ ПРИЕМНОГО ОТВЕРСТИЯ	ММ	280×160
	РАЗМЕРЫ ВЫПУСКНОГО ЛОТКА	ММ	210×220
	ЧИСЛО ОБОРОТОВ ВНУТ. ДИСКА	ОБ/МИН	760
	ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ	кВт	30
	ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ	Т/Ч	до 12
	МАССА	КГ	6662,5
	МАССА БЕЗ ЭЛ. ДВИГАТЕЛЯ	КГ	6512,5

Рис. 1. Общий вид и основные параметры центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12.

Fig. 1. General view and basic parameters of a centrifugal vertical chopper CVI-12.

сковых горных пород многократными динамическими воздействиями с разной конструкцией рабочих органов (активаторов). Конструктивная особенность нового класса центробежных измельчителей заключается в реализации возможности сообщения многократных динамических воздействий по ходу перемещения частиц в рабочей зоне дезинтеграции [30, 31]. При этом сохранение эффекта разрушения геоматериалов по мере последовательного сокращения крупности (потери массы) достигается соответствующим увеличением скорости взаимодействия частиц с поверхностью рабочих органов.

Ранее нами был изготовлен и испытан опытно-промышленный вариант центробежной мельницы ЦМВУ-800, реализующий многократные динамические воздействия [32]. В результате испытаний были зафиксированы высокие значения степени измельчения для разных видов геоматериалов. Вместе с тем были выявлены и недостатки конструктивного характера:

- сложности разгрузочного узла из-за периферийной разгрузки материала, ограничивающий увеличение диаметра рабочих органов;
- напрессование и накопление частиц на вертикальных стенках ступеней рабочих органов, в результате чего снижается эффективность измельчения;
- относительно небольшая производительность мельницы до 6 т/ч.

Для усовершенствования процессов эффективного измельчения геоматериалов и устранения выявленных недостатков был разработан и спроектирован новый тип центробежного вертикального измельчителя условной марки ЦВИ (рис. 1), защищенный патентом РФ [33]. На рис.1 представлены общий вид и техническая характери-

ка спроектированного типоразмера измельчителя ЦВИ-12 с производительностью до 12 т/ч.

В данной работе приведены результаты опытно-конструкторских работ и экспериментальных исследований по разработке нового центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12 комбинированного действия.

Наиболее важными конструктивными факторами для нового типа оборудования, влияющими на эффективность измельчения геоматериалов с учетом их исходной максимальной крупности, являются зазор между рабочими органами и расположение узла разгрузки измельченного материала (относительно центральной оси корпуса измельчителя), что было подтверждено в ходе предварительных модельных испытаний на лабораторном образце, проведенных для определения наиболее рациональных рабочих параметров центробежного вертикального измельчителя.

Материалы и методика экспериментальных исследований

Разработанный двухкамерный измельчитель (рис. 2) содержит цилиндрический корпус с верхним загрузочным и нижним разгрузочным узлом, регулирующим угол разгрузки измельченного продукта, и соосные рабочие органы специальной формы в виде вертикально расположенных дисков с радиальными разгонными и отбойными элементами, обеспечивающие многократные динамические и истирающие воздействия на разрушаемый материал, также имеет две симметрично расположенные рабочие камеры, которые позволяют спроектировать сбалансированную механическую схему привода.

Для проведения экспериментальных исследований по определению рациональных рабо-

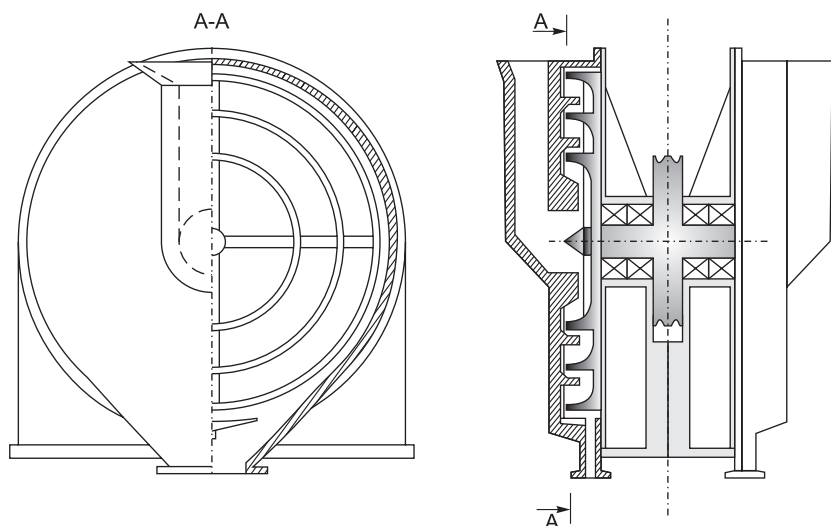


Рис. 2. Конструкция центробежного вертикального измельчителя.

Fig. 2. Design of a centrifugal vertical chopper.



Рис. 3. Рабочие органы и рабочая камера лабораторной модели измельчителя.

Fig. 3. Working bodies and the working chamber of the laboratory model of the grinder.

чих параметров центробежного вертикального измельчителя была разработана и изготовлена лабораторная модель.

Лабораторная модель изготовлена в однокамерном варианте и содержит в себе цилиндрический корпус с верхним загрузочным и нижними разгрузочными отверстиями под разными углами наклона относительно центральной оси корпуса, а также соосные рабочие органы специальной формы в виде вертикально расположенных дисков с радиальными разгонными и отбойными элементами, обеспечивающие многократные динамические и истирающие воздействия на разрушаемый материал. На рис. 3 показана рабочая камера лабораторной модели с подвижным внутренним и неподвижным внешним рабочими органами.

Дезинтеграция происходит следующим образом: разрушаемый материал попадает через загрузочный узел в центр рабочей камеры измельчителя между двумя рабочими дисками специальной формы, ширина камеры (зазор) регулируется от 1 до 20 мм в зависимости от степени крепости исходного материала и заданной крупности продуктов измельчения.

В рабочей камере частицы разрушаемого материала при помощи радиальных разгонных элементов, установленных на поверхности рабочих органов, приобретают первоначальную скорость и под действием центробежной силы и силы тяжести, испытывая многократные ударные и истирающие нагрузки как друг с другом, так и с ударно-отражательными элементами рабочих органов и корпуса, начинают продвигаться к кромке ра-

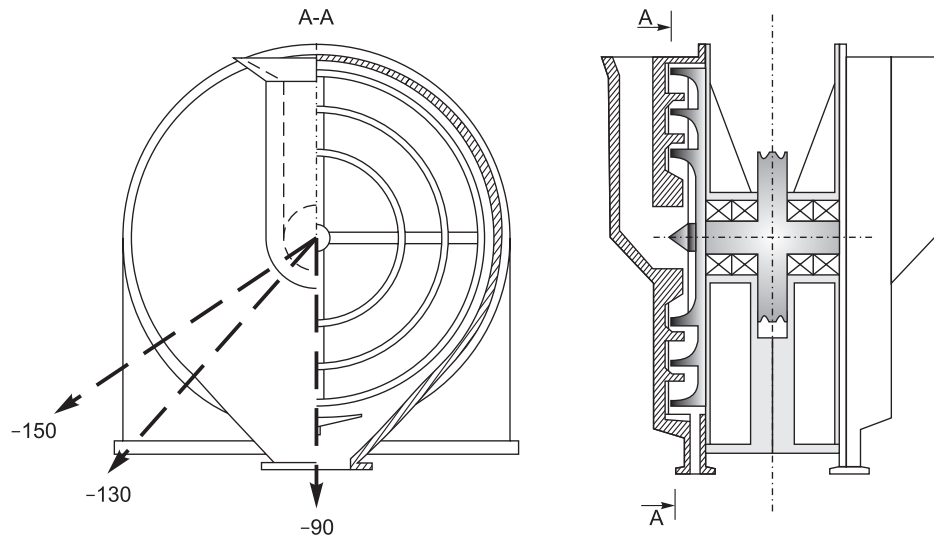


Рис. 4. Конструкция центробежного вертикального измельчителя при разных углах разгрузки.

Fig. 4. Design of a centrifugal vertical chopper at different discharge angles.

бочих дисков. Измельченный материал, потеряв массу и инерцию, своевременно выводится из рабочего пространства через разгрузочный узел.

С точки зрения эффективности измельчения наиболее важными рабочими параметрами для центробежного вертикального измельчителя является зазор между поверхностями рабочих органов (сочетание динамических и истирающих воздействий), а также расположение узла разгрузки измельченного материала относительно центральной оси корпуса измельчителя. Например, расположение узла разгрузки при -90° сопровождается механическим выносом недоизмельченного материала как из-за силы тяжести, так и за счет формирующихся в рабочей камере воздушных потоков.

Для испытаний использовались пробы кварцевой руды твердостью по шкале Мооса 7, классами крупности: $-5+3$ мм; $-3+2$ мм; $-2,5+1,6$ мм. Частота вращения подвижного рабочего органа составляла 1500 об./мин. Диапазон регулировки зазора между дисками составил от 3 до 10 мм. Для определения гранулометрического состава продуктов измельчения и определения степени измельчения применялся ситовый анализатор со стандартной методикой определения гранулометрического состава.

На рис. 4 приведены варианты установки узла разгрузки под определенным углом относительно центральной оси корпуса, что соответствует и оси вращения рабочих органов измельчителя.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 5 представлены результаты измельчения кварцевой руды класса крупности $-3+2$ мм при наиболее рациональных зазорах от 3 до 7 мм. Наиболее эффективные показатели измельчения получены при зазоре 3 мм.

Далее были проведены экспериментальные исследования по измельчению разных классов крупности (рис. 6). При измельчении класса крупности $-5+3$ мм в продуктах измельчения наблюдается наиболее низкий выход характерного критического класса крупности материала $-1,6+1$ мм, что и определяет в основном эффективность процесса измельчения в целом.

В таблицах 1–3 представлены результаты экспериментальных исследований по циклическому измельчению кварцевой руды в лабораторной модели от 1 до 3 циклов.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты по циклам по степени измельчения. Из полученных данных видно, что степень измельчения (1–3 цикла) у исходной измельчаемой пробы класса крупности $-5+3$ мм выше, чем у проб классов крупности $-3+2$ мм, $-2,5+1,6$ мм. Очевидно, что это связано с особенностью ударного разрушения в режиме свободного удара, зависящего от массы частицы. Для повышения эффективности измельчения мелких классов крупности возможным вариантом является уменьшение зазора между рабочими органами. Однако такой путь будет связан с увеличением доли разрушения материа-

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ НОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД

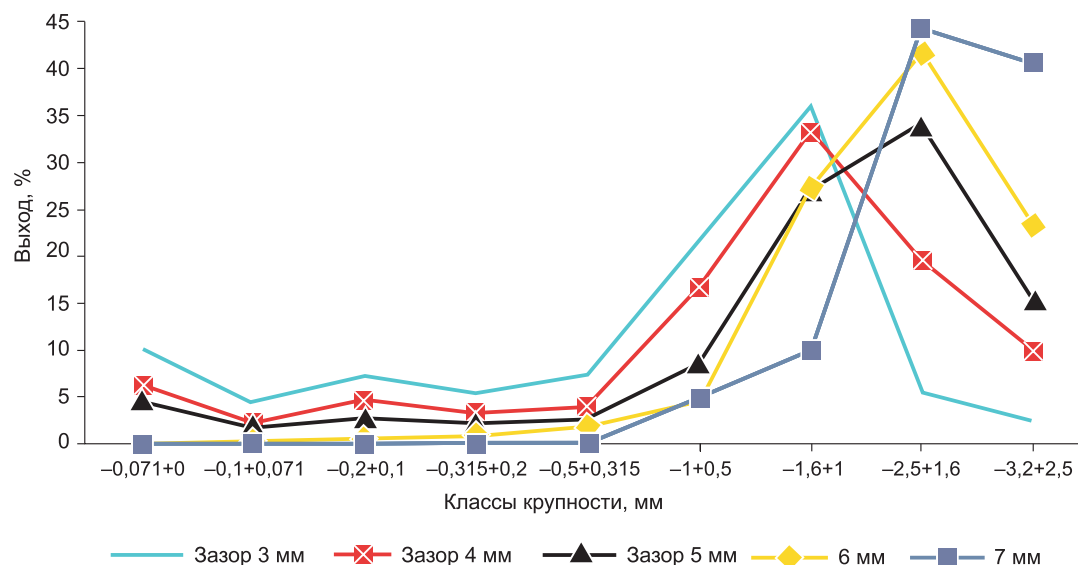


Рис. 5. Распределение продуктов измельчения при разных зазорах.

Fig. 5. Distribution of grinding products at different gaps.

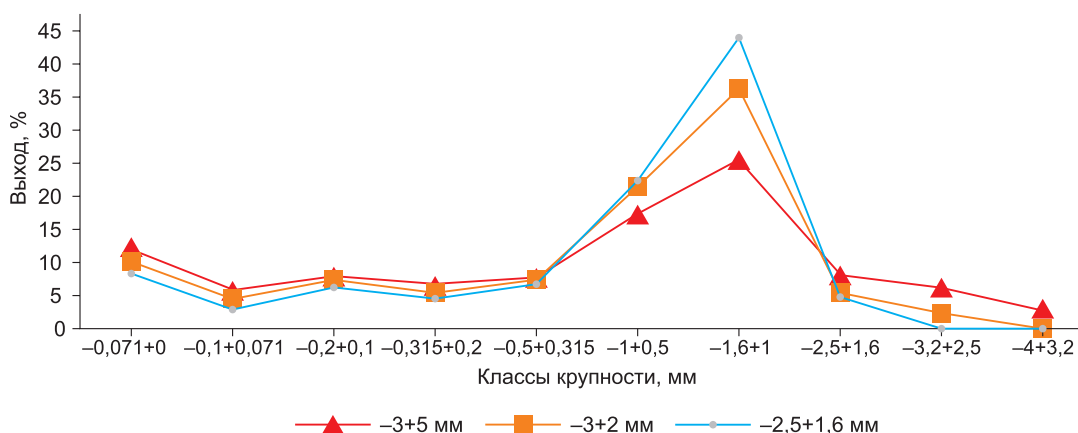


Рис. 6. Сравнительные результаты измельчения.

Fig. 6. Comparative grinding results.

ла за счет истирания, что неизбежно повлечет за собой повышенный износ рабочих органов.

При экспериментальном определении угла разгрузки на эффективность измельчения материала использовались пробы кварцевой руды твердостью по шкале Мооса 7, классом крупности $-2,5+1,6$ мм. Экспериментальные исследования проводились на однокамерной модели центробежного вертикального измельчителя с возможностью регулировки угла наклона разгрузочного отверстия относительно соосно установленных рабочих органов, который одновременно отвечает за разгрузку и за качество продуктов измельчения.

На рис. 7 приведены сравнительные результаты измельчения при разных углах установки

узла разгрузки относительно центральной оси корпуса при наиболее рациональном зазоре 3 мм между рабочими органами, который был определен экспериментальным путем.

На основании полученных результатов установлено, что при угле разгрузки -150° гранулометрический состав продуктов измельчения наиболее равномерный с наибольшим содержанием мелких классов, потому что именно при таком критическом значении угла разгрузки происходит вынос наиболее мелких и легких фракций из зоны измельчения.

Таким образом, были определены наиболее рациональные рабочие параметры вертикальной мельницы (зазор, угол разгрузки), которые по-

Таблица 1

Результаты исследований
при 1 цикле измельчения

Table 1

Research results for 1 grinding cycle

Класс крупности, мм	Выход, %		
	–5+3 мм	–3+2 мм	–2,5+1,6 мм
–0,071+0	12,2	10,2	8,3
–0,1+0,071	5,6	4,4	2,9
–0,2+0,1	8	7,3	6,3
–0,315+0,2	6,8	5,4	4,4
–0,5+0,315	7,6	7,3	6,8
–1+0,5	17,3	21,5	22,4
–1,6+1	25,7	36,1	43,9
–2,5+1,6	8	5,4	4,8
–3,2+2,5	6	2,4	0
–4+3,2	2,8	0	0

Таблица 3

Результаты исследований
при 3 циклах измельчения

Table 3

Research results for 3 grinding cycles

Классы крупности, мм	–5+3 мм	–3+2 мм	–2,5+1,6 мм
–0,071+0	12,8	10,2	9,6
–0,1+0,071	5,1	5,1	4,3
–0,2+0,1	9,2	8,2	7,5
–0,315+0,2	7,2	6,6	5,9
–0,5+0,315	7,7	7,7	6,4
–1+0,5	23,6	25,6	26,7
–1,6+1	30,7	34,3	38
–2,5+1,6	2,5	2	0
–3,2+2,5	1	0	0

звляют управлять процессом измельчения в режиме многократных динамических и истирающих воздействий (исключение выброса недоизмельченных материалов из рабочей камеры измельчителя) и задавать крупность помола продуктов дезинтеграции.

Также при работе лабораторной модели наблюдалось скопление шлама и неразрушенных частиц на кольцевых отбойных элементах (рис. 8). Для устранения недостатка внутренняя поверхность кольцевых отбойных элементов должна иметь вогнутую, пологую форму, что будет пре-

Таблица 2

Результаты исследований
при 2 циклах измельчения

Table 2

Research results for 2 grinding cycles

Классы крупности, мм	Выход, %		
	–5+3 мм	–3+2 мм	–2,5+1,6 мм
–0,071+0	11,6	9,4	8
–0,1+0,071	4,8	4,7	3,5
–0,2+0,1	8,7	7,8	7,6
–0,315+0,2	6,3	5,2	5,5
–0,5+0,315	7,7	7,3	7
–1+0,5	21,7	25,1	25,2
–1,6+1	31,9	35,6	40,4
–2,5+1,6	4,8	3,6	2,5
–3,2+2,5	2,4	1	0

Таблица 4

Сравнительные результаты исследований
по циклам измельчения

Table 4

Comparative results of research on grinding cycles

Классы крупности, мм	Степень измельчения ($i = d_n/d_k$)		
	1 цикл	2 цикл	3 цикл
–5+3	5,6	6,4	7,5
–3+2	3,5	4	4,7
–2,5+1,6	2,5	2,9	3,4

пятствовать накоплению на них шлама и неразрушенных частиц.

С учетом полученных данных на лабораторной модели измельчителя разработан эскизный проект основных узлов опытно-промышленного образца центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12 конструкции ИГДС СО РАН производительностью до 12 т/ч. По сравнению с лабораторной моделью в опытно-промышленном образце ожидаются более высокие показатели измельчения за счет увеличения диаметра рабочих органов (окружной скорости) и коррекции формы отбойных кольцевых элементов.

Таким образом была разработана, испытана и исследована модель центробежного вертикального измельчителя ЦВИ комбинированного действия конструкции ИГДС СО РАН. Получены исходные данные для проектирования и техниче-

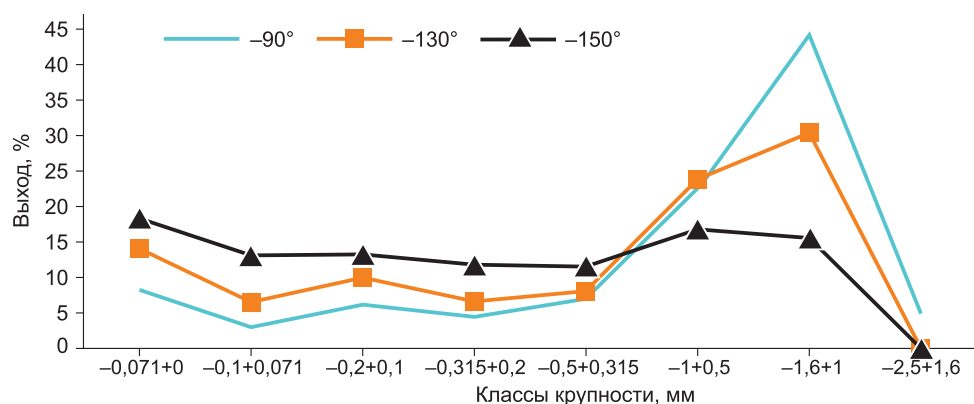


Рис. 7. Характеристика продуктов измельчения при разных углах разгрузки.

Fig. 7. Characterization of grinding products at different discharge angles.

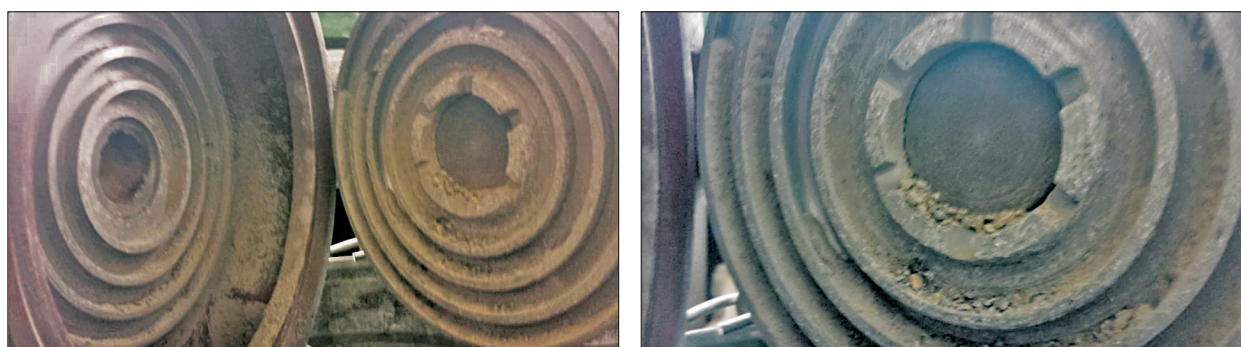


Рис. 8. Скопление неразрушенных частиц на отбойных элементах.

Fig. 8. The accumulation of undestroyed particles on the fenders.

ской документации на изготовление опытно-промышленного варианта центробежного измельчителя ЦВИ-12.

Полученные результаты исследований на лабораторной модели вертикального центробежного измельчителя позволят повысить эффективность измельчения многократными динамическими и истирающими воздействиями за счет возможности регулирования наиболее важных рабочих параметров, таких как зазор между рабочими органами и возможность изменения расположения узла разгрузки измельченного материала.

Закключение

Экспериментальными исследованиями на лабораторной модели центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12 конструкции ИГДС СО РАН установлены рациональные рабочие параметры вертикального измельчителя (зазор между рабочими дисками – 3 мм, угол разгрузки – 150°), что позволило обеспечить управление процессом

измельчения в режиме многократных динамических и истирающих воздействий (исключение выброса недоизмельченных частиц из рабочей зоны измельчения), а также задавать степень сокращения продуктов дезинтеграции. Разработаны проект и рабочая документация на опытно-промышленный образец центробежного вертикального измельчителя ЦВИ-12 с производительностью до 12 т/ч.

Литература

1. Клушанцев Б. В. и др. Дробилки. М.: Машиностроение, 1990.
2. Oliveira J.F.G., Silvab R.J., Duoc C., Hashimoto F. Manufacturing technology // Industrial challenges in grinding. 2009. Vol. 58, Iss. 2. P. 663–680.
3. Крупна П.И., Щербачев В.И. Перспективы реконструкции рудоподготовительных операций обогащательных фабрик на основе модернизации процессов дробления и нового поколения российского дробильно-классифицирующего оборудования // Горные машины и автоматика. 2004. № 3. С. 35–38.

4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Состояние и перспективы комплексных системных исследований процессов измельчения сыпучих материалов // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. XXXIII, № 4. С. 362.
5. Газалеева Г.И., Цыпин Е.Ф., Червяков С.А. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 14 с.
6. Хопунов Э.А. Новый взгляд на процессы переработки минерального сырья // Современная техника и технологии. 2015. № 3 [Электронный ресурс]. <http://technology.snauka.ru/2015/03/5944>
7. Кулебакин В.Г. Применение механохимии в гидрометаллургических процессах. Новосибирск: Наука, 1988. 271 с.
8. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / О.С. Богданов и др.; под ред. О.С. Богданова. М.: Недра, 1982. 366 с.
9. Учитель С.А., Стець В.А. Опыт применения центробежно-ударных дробилок. М., 1991. 25 с. (Обзорная информация / Институт «Черметинформация». Сер. Обогащение руд; Вып. 1).
10. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П. Новое оборудование для дробления и измельчения материалов // Горный журнал. 2000. № 3. С. 45–52.
11. Центробежные дробилки и мельницы «Титан» // Новые технологии. 2005. № 6.
12. Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П. Новые машины и комплектные технологические линии для дробления и измельчения материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 2002. № 1. С. 64–71.
13. Баловнев В.И. Интенсификация измельчения материалов на основе обобщающей гипотезы дробления // Строительные и дорожные машины. 2001. № 6. С. 31–35.
14. Груздев А.В., Осадчий А.М., Колотыгин Ю.И. Современное дробильно-размольное оборудование ОАО «Объединенные машиностроительные заводы» // Горные машины и автоматика. 2003. № 6. С. 13–16.
15. Абрютин Д.В., Воронин Д.Ю., Пестриков А.Б. Дробильно-размольное оборудование для переработки рудного сырья // Горная Техника. 2004. № 7.
16. Левданский А.Э. Исследование и внедрение новых конструкций ударно-центробежных мельниц // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77, № 6. С. 956–960.
17. Hoon Lee, Heechan Cho, Jihoe Kwon. Powder Technology. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill/ Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, South Korea. Seoul. 2010. Vol. 198, Iss. 3. P. 364–372.
18. Ладаев Н.М., Гуюмджян П.П., Жбанова Е.В. О критерии разрушения одиночных частиц хрупких материалов ударом // Информационная среда вуза. XV Международная научно-техническая конференция. Иваново, 2008. С. 837–839.
19. Гуюмджян П.П. Закономерности разрушения одиночных частиц ударом // Сб. трудов Ивановской государственной архитектурно-строительной академии. Иваново; ИГАСА, 1999. С. 38–41.
20. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г. Научные основы рациональных режимов разрушения горных пород механическими способами при динамическом приложении нагрузки М.: Ин-т горного дела им. Скопинского, 1986. 57 с.
21. Липанов А.М., Денисов В.А., Причинин А.Е. Модель процесса измельчения в ударно-центробежной мельнице ММС-1500-900-10 // Междунар. конгресс по управлению отходами (ВэйстТэк-2005): сб. докл. М.: СИБИКО Инт., 2005. С. 203–204.
22. Левданский А.Э. Исследование ударно-центробежного измельчения материалов // Инж.-физ. журнал. 2004. Т. 77, № 5. С. 46–51.
23. Смирнов Н.М. Совершенствование процессов и оборудования для ударного измельчения материалов различной абразивности: Дисс. ... д-ра техн. наук. Иваново, 1997. 390 с.
24. Власов О.Е., Смирнов С.А. Сравнение показателей работ различных измельчителей // Теор. основы хим. технологии. 1986. Т. 2, № 4. С. 831–837.
25. Барон Л.И., Веселова Г.М., Коняшин Ю.Г. Экспериментальные исследования горных пород ударом / Л.И. Барон, М.: АН СССР, 1962. 219 с.
26. Ладаев Н.М., Ваганов Ф.А., Гуюмджян П.П. О давлении, возникающем в хрупком материале при ударе // Информационная среда вуза. XV Международная научно-техническая конференция. Иваново, 2008. С. 833–836.
27. Buss B. Uber die Einzelkornprall zerkleinerung von Steinsalz und anderen Stoffen // Bergakademie. 1980. Vol. 22, No. 10. P. 592–598.
28. Ревнивцев В.И., Гапонов В.Г., Загоратский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.
29. Saravacos G., Kostaropoulos A.E. Handbook of Food Processing Equipment/Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015/Mechanical Processing Equipment, P. 149–232.
30. Матвеев А.И., Львов Е.С., Винокуров В.Р. Новое в рудоподготовке – аппараты дробления и измельчения многократного ударного действия // Горн. информ.-аналит. бюл. 2016. № 8 (специальный выпуск № 21). С. 242–252.
31. Патент № 2198028, 7 В 02 С 13/20. Центробежный измельчитель / Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Винокуров В.Р. / Ин-т горн. дела Севера СО РАН. Заявл. 11.01.01; Опубл. 10.02.2003 // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 4, ч. 2. С. 338.
32. Патент № 2150323 7 В 02 С 13/20. Центробежный измельчитель встречного удара / Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е. / Ин-т горн. дела Се-

вера СО РАН. Заявл. 28.10.97; Оpubл. 10.06.2000 // Изобретения. Полезные модели. – 2000. № 16. ч. 2. С. 268.

33. Патент № 2322299/2006.01 Российская Федерация. ВО2С13/00/ Центробежный аппарат дезинтег-

рации / Матвеев А.И., Григорьев А.Н.; заявитель и патентообладатель Учреждение Рос. акад. наук Ин-т горн. дела Севера им. Н. В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – № 2006106684/03; заявл. 03.03.2006; опубл. 20.04.2008, Бюл. № 11.

Поступила в редакцию 15.05.2020

Принята к публикации 03.07.2020

Об авторах

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-4298-599>, andrei.mati@yandex.ru;

ВИНОКУРОВ Василий Романович, младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>, vaviro@mail.ru.

Информация для цитирования

Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Разработка конструкции нового измельчителя комбинированного действия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 63–73. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6

Development of the design of a new chopper of combined action

A.I. Matveev, V.R. Vinokurov

Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
vaviro@mail.ru

Abstract. The results of experimental studies of grinding processes in a new centrifugal vertical grinder CVI designed at the IGDS, SB RAS are presented. The most important design factors for the equipment of the new type that affect the efficiency of geomaterial grinding taking into account the initial maximum size of the material are the gap between the working bodies and the location of the unloading unit for crushed geomaterial (relative to the central axis of the grinder body). The rational working parameters of the vertical centrifugal grinder were established by model tests with a laboratory sample (unloading angle – 150 deg., the gap between the working disks – 3 mm). Changes in these factors within certain limits allow one to control the grinding process, in the combined mode of multiple dynamic and abrasive effects. The control of the grinding process consists in the possibility of limiting the output of under-crushed particles from the grinding zone, as well as setting the degree of reduction of disintegration products. The project and working documentation for a pilot industrial model of a vertical centrifugal grinder CVI-12 with a capacity of up to 12 t/h are developed.

Key words: centrifugal mills, construction, grinding, working bodies, grinding efficiency, discharge unit, particles, ground material, experimental studies, operating parameters.

References:

1. Klushancev B.V. i dr. Drobilki. M.: Mashinostroyeniye, 1990.
2. Oliveira J.F.G., Silvab R.J., Duoc C., Hashimoto F. Manufacturing technology // Industrial challenges in grinding. 2009. Vol. 58, Iss. 2. P. 663–680.

3. Krupna P.I., Shherbachev V.I. Perspektivy rekonstrukcii rudopodgotovitel'nyh operacij obogatitel'nyh fabrik na osnove modernizacii processov drobleniya i novogo pokoleniya rossijskogo drobil'no-klassificirujushhego oborudovaniya // Gornye mashiny i avtomatika. 2004. No. 3. P. 35–38.

4. Kafarov V.V., Dorohov I.N., Arutjunov S.Ju. Sos-tojanie i perspektivy kompleksnyh sistemnyh issle-dovaniy processov izmel'chenija sypuchih materialov // Zhurnal VHO im. D.I. Mendeleeva. 1988. Vol. XXXIII, No. 4. P. 362.
5. Gazaleeva G.I., Cypin E.F., Chervjakov S.A. Rudopodgotovka. Droblenie, grohochenie, obogashhenie. Ekaterinburg: OOO «UCAO», 2014. 914 p.
6. Hopunov Je.A. Novyj vzgljad na processy pererabotki mineral'nogo syr'ja // Sovremennaja tehnika i tehnologii. 2015. No. 3 [Elektronnyj resurs]. <http://technology.snauka.ru/2015/03/5944>
7. Kulebakin V.G. Primenenie mehanohimii v gidrometallurgicheskikh processah. Novosibirsk: Nauka, 1988. 271 p.
8. Spravochnik po obogashheniju rud. Podgotovitel'nye processy / O.S. Bogdanov i dr.; pod red. O.S. Bogdanova. M.: Nedra, 1982. 366 p.
9. Uchitel' S.A., Stec' V.A. Opyt primeneniya centrobezhno-udarnykh drobilok. M., 1991. 25 p. (Obzornaja informacija / Institut «Chermetinformacija». Ser. Obogashhenie rud.; Vyp. 1).
10. Vajsberg L.A., Zarogatskij L.P. Novoe oborudovanie dlja droblenija i izmel'chenija materialov // Gornyj zhurnal. 2000. No. 3. P. 45–52.
11. Centrobezhnye drobilki i mel'nicy «Titan». Novye tehnologii. No. 6, 2005.
12. Vajsberg L.A., Zarogatskij L.P. Novye mashiny i komplektnye tehnologicheskie linii dlja droblenija i izmel'chenija materialov // Problemy Mashinostroenija i Nadezhnosti Mashin. Mashinovedenie. 2002. No. 1. P. 64–71.
13. Balovnev V.I. Intensifikacija izmel'chenija materialov na osnove obobshhajushhej gipotezy droblenija // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2001. No. 6. P. 31–35.
14. Gruzdev A.B., Ocachij A.M., Kolotygin Ju.I. Sovremennoe drobil'no-razmol'noe oborudovanie OAO «Ob'edinennye mashinostroitel'nye zavody» // Gornye Mashiny i Avtomatika. 2003. No. 6. P. 13–16.
15. Abrjutin D.V., Voronin D.Ju., Pestrikov A.B. Drobil'no-razmol'noe oborudovanie dlja pererabotki rudnogo syr'ja // Gornaja Tehnika. 2004. No. 7.
16. Levdanskiy A.Je. Issledovanie i vnedrenie novykh konstrukcij udarno-centrobezhnykh mel'nic // Zhurnal Prikladnoj Himii. 2004. Vol. 77, No. 6. P. 956–960.
17. Hoon Lee, Heechan Cho, Jihoe Kwon. Powder Technology. Using the discrete element method to analyze the breakage rate in a centrifugal/vibration mill/ Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, South Korea. Seoul. 2010. Vol. 198, Iss. 3. P. 364–372.
18. Ladaev N.M., Gujumdzhjan P.P., Zhbanova E.V. O kriterii razrushenija odinochnykh chastic hrupkih materialov udarom / Informacionnaja sreda vuza. XV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija. Ivanovo, 2008. P. 837–839.
19. Gujumdzhjan P.P. Zakonomernosti razrushenija odinochnykh chastic udarom // Sb. trudov Ivanovskoj gosudarstvennoj arhitekturno-stroitel'noj akademii. Ivanovo: IGASA, 1999. P. 38–41.
20. Baron L.I., Konjashin Ju.G. Nauchnye osnovy racional'nykh rezhimov razrushenija gornykh porod mehanicheskimi sposobami pri dinamicheskom prilozhenii nagruzki. M.: In-t gornogo dela im. Skochinskogo, 1986. 57 p.
21. Lipanov A.M., Denisov V.A., Prichinin A.E. Model' processa izmel'chenija v udarno-centrobezhnoj mel'nice MMS-1500-900-10 // Mezhdunar. kongress po upravleniju othodami (VjeystTjek-2005): sb. dokl. M.: SIBIKO Int., 2005. P. 203–204.
22. Levdanskiy A.Je. Issledovanie udarno-centrobezhnogo izmel'chenija materialov // Inzh.-fiz. Zhurnal. 2004. Vol. 77, No. 5. P. 46–51.
23. Smirnov N.M. Sovershenstvovanie processov i oborudovaniya dlja udarnogo izmel'chenija materialov razlichnoj abrazivnosti: Diss. ... d-ra tehn. nauk. Ivanovo, 1997. 390 p.
24. Vlasov O.E., Smirnov S.A. Sravnenie pokazatelej rabot razlichnykh izmel'chitelej // Teor. Osnovy Him. Tehnologii. 1986. Vol. 2, No. 4. P. 831–837.
25. Baron L.I., Veselova G.M., Konjashin Ju.G. Jeksperimental'nye issledovaniya gornykh porod udarom. M.: AN SSSR, 1962. 219 p.
26. Ladaev N.M., Vaganov F.A., Gujumdzhjan P.P. O davlenii, voznikajushhem v hrupkom materiale pri udare // Informacionnaja sreda vuza. XV Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija. Ivanovo, 2008. P. 833–836.
27. Buss B. Uber die Einzelkornprall zerkleinerung von Steinsalz und anderen Stoffen // Bergakademie. 1980. Vol. 22, No. 10. P. 592–598.
28. Revnivceva V.I., Gaponov V.G., Zagoratskij L.P. i dr. Selektivnoe razrushenie mineralov. M.: Nedra, 1988. 286 p.
29. Saravacos G., Kostaropoulos A.E. Handbook of Food Processing Equipment/Part of the series Food Engineering Series Date: 30 December 2015/Mechanical Processing Equipment. P. 149–232.
30. Matveev A.I., L'vov E.S., Vinokurov V.R. Novoe v rudopodgotovke – apparaty droblenija i izmel'chenija mnogokratnogo udarnogo dejstvija // Gorn. inform.-analit. bjul. 2016. No. 8 (special'nyj vypusk No. 21). P. 242–252.
31. Patent No. 2198028, 7 V 02 S 13/20. Centrobezhnyj izmel'chitel' /Matveev A.I., Grigor'ev A.N., Vinokurov V.R. / In-t gorn. dela Severa SO RAN. Zajavl. 11.01.01; Opubl. 10.02.2003 // Izobretenija. Poleznye modeli. 2003. No. 4, Pt. 2. P. 338.
32. Patent No. 2150323 7 V 02 S 13/20. Centrobezhnyj izmel'chitel' vstrechnogo udara / Matveev A.I., Grigor'ev A.N., Filippov V.E. / In-t gorn. dela Severa SO RAN. Zajavl. 28.10.97; Opubl. 10.06.2000 // Izobretenija. Poleznye modeli. 2000. No. 16. Pt. 2. P. 268.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ НОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД

33. *Patent* No. 2322299/2006.01 Rossijskaja Federacija. VO2S13/00/ Centrobezhnyj apparat dezintegracii; Matveev A.I., Grigor'ev A.N.; zayavitel' i patentobladatel' Uchrezhdenie Ros. akad. nauk In-t gorn. dela

Severa im. N. V. Cherskogo Sib. otd-nija Ros. akad. nauk. No. 2006106684/03; zayavl. 03.03.2006; opubl. 20.04.2008, Bjul. №11

About the authors

MATVEEV Andrey Innokentievich, doctor of technical sciences, full member of the academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), chief researcher, Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-4298-599>, andrei.mati@yandex.ru;

VINOKUROV Vasily Romanovich, junior researcher, Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>, vaviro@mail.ru.

Citation

Matveev A.I., Vinokurov V.R. Development of the design of a new chopper of combined action // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 63–73. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-6>

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 599.32

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-7

Население млекопитающих бассейна Верхней Муны (Арктическая зона Западной Якутии): современное состояние и прогноз

Е.Г. Шадрина^{1*}, Я.Л. Вольперт², И.М. Охлопков¹, М.М. Сидоров¹, В.А. Данилов²

¹Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера

им Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

*shadrina@yandex.ru

Аннотация. Активная экспансия горно-добывающей промышленности на территорию Арктической зоны диктует необходимость получения объективных данных об исходном состоянии экосистем, прогноза последствий освоения и разработки мер по минимизации негативных процессов. На основе полевых и дистанционных методов исследований дана полная характеристика населения млекопитающих в районе разработки нового месторождения алмазов в Арктической зоне Западной Якутии, который ранее не изучался. Установлено, что териофауна района исследований включает 28 видов млекопитающих. Выявлена численность охотничьих видов, параметры сообщества мелких млекопитающих. Основное хозяйственное значение имеют дикий северный олень и соболь. Прогнозируется, что основное воздействие от нового объекта будет оказано на лено-оленьекскую популяцию дикого северного оленя, которой использует район исследований в период осенней миграции и нажировки. Разработаны рекомендации по минимизации негативного воздействия на охотничьи виды, которые внедрены в практику и дали положительный результат.

Ключевые слова: население млекопитающих, охотничьи виды, мелкие млекопитающие, дикий северный олень, Арктика, горно-добывающая промышленность, прогноз воздействия, методы минимизации негативного воздействия.

Благодарности. Работа выполнена в рамках выполнения госзадания ИБПК СО РАН, проект «Структура и динамика популяций и сообществ животных холодного региона Северо-Востока России в современных условиях глобального изменения климата и антропогенной трансформации северных экосистем: факторы, механизмы, адаптации, сохранение» (0376-2016-0002; рег. номер АААА-А17-117020110058-4) и Государственного задания Минобрнауки РФ на период 2020–2022 гг. Проект FSRG-2020-0018 «Изучение особенностей функционирования арктических и субарктических экосистем Якутии в условиях усиления техногенного воздействия и глобального изменения климата». Авторы приносят благодарность [Виталию Данилову] и [Семену Григорьеву] за участие в сборе материалов в 2007 г.

Введение

Освоение обширной территории северо-западной Якутии промышленностью до последнего времени носило локальный характер: относительно давно разрабатываются трубки Айхал и Удачная (соответственно 60 лет и 53 года) и разрабатываются россыпные месторождения в бассейнах рек Анабар и Молодо. Указанные обстоя-

тельства в сочетании с низкой численностью населения и отсутствием развитой дорожной сети в определенной мере способствовали сохранению природных ландшафтов этой территории.

В последнее время ситуация стремительно меняется, началась промышленная разработка Верхне-Мунского месторождения алмазов, на очереди Томторское месторождение редкоземельных ме-

таллов, идут активные поиски углеводородного сырья на севере региона, расширяется география разработки россыпных месторождений алмазов, периодически предпринимаются попытки освоить имеющиеся запасы каменного угля и т. д. Все вышесказанное остро ставит вопрос сохранения окружающей среды региона, в этой ситуации резко повышается ценность данных по состоянию экосистем до начала освоения, которые в дальнейшем должны служить точкой отсчета для проведения мониторинга, в частности, по состоянию животного населения.

Широко известен факт, что животные, в особенности имеющие потребительскую ценность, при освоении промышленностью девственных ландшафтов страдают в первую очередь, что приводит к ущемлению интересов местного населения, в частности коренных малочисленных народов Севера, если не принимать специальных мер по минимизации негативного воздействия на животный мир. Верхне-Мунское месторождение алмазов административно находится на территории Оленекского эвенкийского национального района, социальное благополучие коренного населения которого находится в прямой зависимости от ресурсной базы охотничьего промысла.

Целью настоящей статьи является дать полную характеристику населения млекопитающих в районе Верхне-Мунского месторождения алмазов (добыча началась в октябре 2018 г.), а также прогноз влияния разработки на население млекопитающих и меры по минимизации ущерба.

Первые сведения по млекопитающим Анабарского бассейна приводятся в сводке «Птицы и млекопитающие Якутии» [1] и монографии А.А. Романова «Пушные звери Ленско-Хатангского края и их промысел» [2]. В процессе создания капитальной монографии «Млекопитающие Якутии» [3] основные материалы собирались на территории Северо-Восточной, Южной и Центральной Якутии, поэтому данные по Западной Якутии в ней весьма ограничены. В 1997 г. вышла монография И.И. Мордосова [4], в которой подведены итоги многолетних работ автора в Западной Якутии. Кроме того, имеются работы по состоянию промысловых млекопитающих бассейна р. Анабар [5] и Анабар-Оленекского междуречья [6]. Несколько публикаций посвящено дикому северному оленю – основному промысловому виду региона [7 – 9].

Сведения о населении мелких млекопитающих в природных ландшафтах Северо-Западной

Якутии ограничены [4, 10]. Имеется ряд работ, посвященных воздействию подземных ядерных взрывов на население мелких млекопитающих [15–17], трансформации населения млекопитающих в районах разработки россыпных месторождений алмазов в бассейне р. Анабар [11–14], а также рудных месторождений в районе г. Удачный [18–22]. Недавно появились материалы по состоянию населения млекопитающих на Оленек-Анабарском междуречье в районе Томторского месторождения редкоземельных металлов [23].

Материал и методика

Территориально Верхне-Мунское месторождение находится на территории Оленекского эвенкийского национального района РС (Я), в 75 км севернее Полярного круга (67°15'41.0" с.ш., 115°01'12.9" в.д.), в долине р. Уулаах-Муна, в 15 км от ее впадения в р. Муна. Полевые исследования населения млекопитающих проводились в августе 2007, октябре 2008 и в июле–августе 2018 гг.

Охотничье-промысловые виды. Зимние учетные работы проводились с 16 по 30 октября 2008 г. в соответствии с «Методическими указаниями по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учета охотничьих животных в РСФСР» [24]. Работы проводились двумя охоттаксаторами. Всего было отработано семь маршрутов общей протяженностью 80 км.

В 2018 г. для наблюдения за охотничьими видами млекопитающих и миграциями популяций дикого северного оленя на звериных тропах и старых геодезических профилях было установлено четыре фотоловушки для фиксации передвижений парнокопытных и других крупных животных на срок с 10.07 по 18.08.2018 г. Также были проведены пешие маршруты, во время которых были зафиксированы следы жизнедеятельности охотничьих видов млекопитающих. Пройденное расстояние оценивалось при помощи GPS-навигатора и по карте. Встреченные животные, а также увиденные следы и продукты жизнедеятельности фиксировались с указанием географических координат находок.

Для расчетов плотности населения промысловых видов зверей нами приняты рекомендации Департамента биологических ресурсов МОП Республики Саха (Якутия) 2007 г. Используются следующие средневзвешенные для Дальневосточного и Восточносибирского регионов пересчетные коэффициенты: волк – 0,11, белка – 4,50, гор-

ностаи – 1,05, заяц-беляк – 1,17, и вычисленные нами в 2007 г. пересчетные коэффициенты: соболь – 0,34, лось – 0,46, дикий северный олень (таежный) – 0,16.

Исследования по использованию территории дикими северными оленями проводилось с 2010 г. по настоящее время методом дистанционного спутникового слежения [25]. Для мечения оленей использовались спутниковые радиоошейники «Пульсар» производства ООО «ЭС-ПАС» (РФ) с определением местонахождения радиомаяка на базе эффекта Доплера, которые функционировали в составе спутниковой системы определения местоположения и сбора данных ГЛОНАСС/Argos. Данный метод позволяет отслеживать дальние миграции копытных за короткий интервал времени в течение 1–2 лет. В обработку включались только данные самого высокого 3 класса точности (± 250 м), поступавшие с частотой через каждые 20 мин. За указанный период на водной переправе через р. Оленек в общей сложности было отловлено и мечено радиоошейниками 150 диких северных оленей возраста 5 лет и более, 112 самок и 38 самцов.

В течение всего периода исследований проводился сбор опросных сведений по характеру использования территории млекопитающими среди местного населения, в первую очередь, среди работников природоохранных ведомств и основных официальных природопользователей. Для анализа промысла охотничьих видов использовали также данные Госкомкомитета по статистике РС (Я). Для анализа состояния запасов копытных кроме фондовых материалов использовались данные авиаучетов, проведенных ДБР МОП РС (Я) в 2000–2001 гг.

Население мелких млекопитающих. Отлов осуществлялся с помощью давилок Геро и канавок с конусами [26, 27], облавливались все доступные биотопы. Канавки прокапывались длиной 20 м и глубиной 12–15 см, в каждую устанавливалось по два конуса с водой. При отлове давилками Геро использовали классическую приманку (хлеб, смоченный растительным маслом), давилки устанавливали линиями по 50 штук в биотопе. Всего за период исследований отработано 1558 конусо-суток, 2400 ловушко-суток и отловлено 425 экземпляров мелких млекопитающих. Для оценки структуры сообществ использовались только данные отлова конусами. Показатели видового разнообразия μ и доли редких видов h рассчитывались по Л.А. Животовскому [28].

Результаты и обсуждение

Фауна млекопитающих региона, учитывая его северное расположение, характеризуется относительно высоким видовым богатством. Согласно нашим и литературным данным [3, 4], териофауна района исследований на современном уровне изученности включает 28 видов (табл. 1). Большинство из перечисленных видов имеют широкое распространение по всей таежной зоне. В то же время необходимо обратить внимание на присутствие крошечной бурозубки и мыши-малютки, которые были отловлены нами в 2018 г.

В особенности интересна находка последнего вида. На настоящий момент это самая северная точка отлова мыши-малютки в Якутии [29], ранее вид регистрировался в окрестностях с. Эйик ($66^{\circ}01'$ с.ш., $117^{\circ}23'$ в.д.) [4]. Интересно, что в окрестностях г. Удачный, несмотря на многолет-

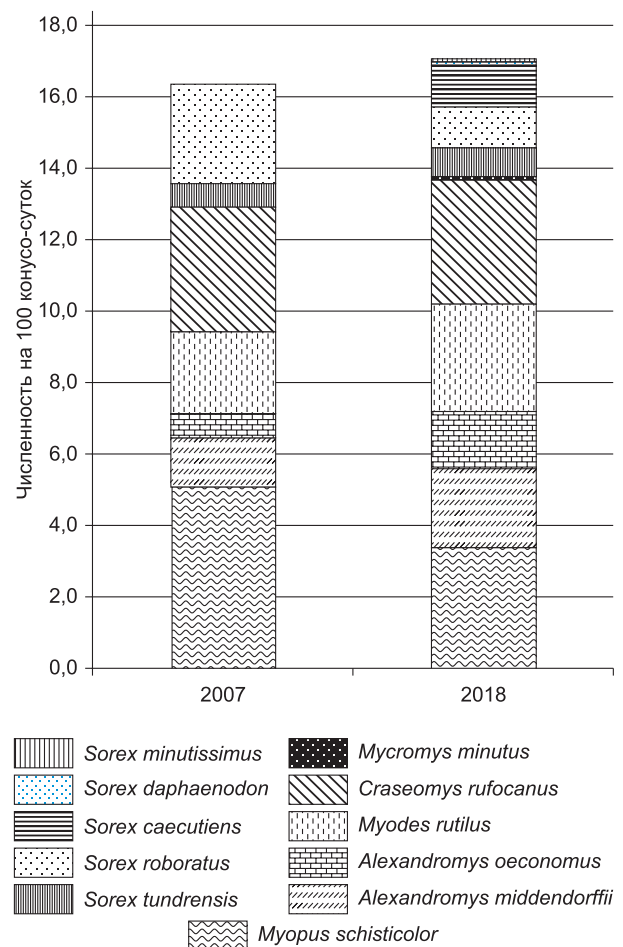


Рис. 1. Численность и структура сообществ мелких млекопитающих в период исследований.

Fig. 1. Abundance and structure of communities of small mammals during the research period.

ние исследования, крошечная бурозубка и мышь-малютка не отлавливались. Соответственно, видовое богатство в верхнем течении р. Муна выше, чем в районе г. Удачный [30], хотя последний находится южнее (66°28 с.ш., 112° в.д.), расстояние между указанными местами отлова всего 85 км. При этом надо учесть, что г. Удачный расположен на берегу р. Далдын (приток р. Марха), которая, в свою очередь, является притоком р. Вилюй. В среднем течении р. Марха эти виды нами отлавливались, но выше даже до устья р. Далдын они не проникают. Тогда как Верхне-Мунское месторождение приурочено к верховьям р. Муна, притока р. Лены 1-го порядка. Самой северной известной точкой отлова мыши-малютки в долине р. Лена является район устья р. Леписке. Крошечная бурозубка фиксировалась в районе устья р. Бесюке, севернее устья р. Муна [31, 32]. К сожалению, данные по составу терио-

фауны в районе устья, в нижнем и среднем течении р. Муна отсутствуют, что затрудняет анализ формирования фауны в районе исследований.

Население мелких млекопитающих. Численность мелких млекопитающих в оба периода наблюдений была практически одинаковой и ее можно охарактеризовать как невысокую (рис. 1), в то же время имеются определенные различия в структуре населения. В первую очередь, в 2018 г. была ниже доля лесного лемминга и бурой бурозубки, а доля средней бурозубки – наоборот – возросла по сравнению с 2007 г. При этом доля лесного лемминга осталась достаточно высокой, указанное явление становится в последнее время обычным для Якутии. Ранее этот вид повсеместно считался малочисленным [3, 4], но в 1982 и в 1987–1988 гг. фиксировалась очень высокая обилие этого вида в долине р. Индигирка, в 1982–1983 гг. – в долине р. Колыма [32], в

Таблица 1

Фауна млекопитающих долины верхней Муны

Table 1

Mammalian fauna of the Upper Muna valley

Отряд Насекомоядные – Eulipotyphla

Семейство Землеройки – Soricidae

1. Крошечная бурозубка – *Sorex minutissimus* Zimmermann, 1780
2. Крупнозубая бурозубка – *Sorex daphaenodon* Thomas, 1907
3. Бурая бурозубка – *Sorex roboratus* Hollister, 1913
4. Тундрная бурозубка – *Sorex tundrensis* Merriam, 1900
5. Средняя бурозубка – *Sorex caecutiens* Laxmann, 1788

Отряд Зайцеобразные – Lagomorpha

Семейство Зайцевые – Leporidae

6. Заяц-беляк – *Lepus timidus* L., 1758
- Семейство Пищуховые – Lagomyidae*
7. Северная пищуха – *Ochotona hyperborea* Pallas, 1811

Отряд Грызуны – Rodentia

Семейство Беличьи – Sciuridae

8. Летяга – *Pteromys volans* L., 1758
9. Обыкновенная белка – *Sciurus vulgaris* L., 1776
10. Азиатский бурундук – *Eutamias sibiricus* Laxmann, 1769

Семейство Хомяковые – Cricetidae

11. Ондатра – *Ondatra zibethica* L., 1766
12. Красно-серая полевка – *Craseomys rufocanus* Sundervall, 1846
13. Красная полевка – *Myodes rutilus* Pallas, 1779

14. Лесной лемминг – *Myopus schisticolor* Lilljeborg, 1844

15. Полевка Миддендорфа – *Alexandromys middendorffii* Poljakov, 1881

16. Полевка-экономка – *Alexandromys oeconomus* Pallas, 1776

Семейство Мышиные – Muridae

17. Мышь-малютка – *Micromys minutus* Pallas, 1771

Отряд Хищные – Carnivora

Семейство Псовые – Canidae

18. Волк – *Canis lupus* L., 1758
19. Обыкновенная лисица – *Vulpes vulpes* L., 1758
20. Песец – *Alopex lagopus* L., 1758

Семейство Медвежьи – Ursidae

21. Бурый медведь – *Ursus arctos* L., 1758

Семейство Куны – Mustelidae

22. Соболь – *Martes zibellina* L., 1758
23. Росомаха – *Gulo gulo* L., 1758
24. Горностай – *Mustela erminea* L. 1758
25. Ласка – *Mustela nivalis* L., 1766

Семейство Кошачьи – Felidae

26. Рысь – *Felis lynx* L., 1758

Отряд Парнопалые – Artiodactyla

Семейство Олени – Cervidae

27. Лось – *Alces alces* L., 1758
28. Дикий северный олень – *Rangifer tarandus* L., 1758

2014–2015 гг. отмечалась высокая численность лесного лемминга на Анабар-Оленекском междуречье [23]. Отмечены подъемы численности этого вида в других регионах Евразии [34, 35].

В качестве объяснения столь существенного изменения роли вида в таежном сообществе на обширной части ареала можно предположить несколько вариантов. Первый: исследователи стали шире применять отлов конусами, тогда как в давилки с классической приманкой этот вид практически не ловится. Второй: что мы имеем дело с реакцией на изменения климата. Третий: проявление многолетней цикличности, нечто подобное наблюдается для водяной полевки, у которой отмечается депрессия численности на обширном пространстве [36].

В 2007 г. доминантами сообщества были лесной лемминг и красно-серая полевка, тогда как красная полевка, типичный обитатель таежных местообитаний, уступала им по численности. Аналогичную картину мы наблюдали и при подъемах численности лесного лемминга на северо-востоке Якутии, расхождение по времени

подъемов численности у совместно обитающих видов мы рассматриваем как адаптацию сообщества к обитанию в условиях ограниченности природных ресурсов, характерную для северных экосистем [37]. В 2018 г. наблюдалось полидоминантное сообщество, что нехарактерно для населения мелких млекопитающих северотаежных ландшафтов Якутии, как правило, такое явление возникает при низкой численности видов [38].

Распределение населения по биотопам в 2018 г. носило классический характер. Наибольшее видовое богатство отмечено в ерниковых зарослях на месте старого поселка (табл. 2), доминант – лесной лемминг, субдоминанты – полевка-экономка и полевка Миддендорфа (рис. 2). В результате отлова давилками преобладает красная, субдоминант – красно-серая полевки. При рассмотрении по биотопам выявлено, что в лиственничном лесу численность наиболее низкая, а в ерниках наблюдается наибольшее видовое разнообразие и наибольшее видовое богатство (табл. 2).

Для всего периода исследований была характерна низкая численность насекомоядных, среди

Таблица 2

**Показатели численности и видового разнообразия населения
мелких млекопитающих по местообитаниям**

Table 2

Figures of small mammal diversity population in different biotopes

Биотоп Biotopes	Отловлено, экз. Collected, ind.	Отработано к.-с. Accumulated cone-days	Числ-ть на 100 к.-с. Abundance per 100 cone-days	Видовое богатство Species richness	Видовое разнообразие Species diversity, μ	Доля редких видов Proportion of rare species, h
Разнотравно-злаковый луг Graminoid and forb meadow	43	310	13,9	8	6,85±0,43	0,14 ±0,38
Ерник на месте старого поселка Dwarf birch thicket over an abandoned settlement	15	62	24,2	4	3,85±0,20	0,04±0,20
Ерник на берегу р. Уулаах-Муна Dwarf birch thicket on the Uulaakh-Muna bank	94	458	20,5	10	8,16±0,40	0,18±0,42
Лиственничник зеленомошный Moss larch forest	31	258	12,0	5	4,08 ±0,35	0,18± 0,43
Старый профиль в лиственничнике Old cutting in a larch forest	6	36	16,7	3	2,67±0,38	0,11± 0,33

которых доминировали средняя, бурая и тундряная бурозубки (см. рис. 2). В целом население мелких млекопитающих вполне типично для северотаежной подзоны, его основу составляют таежные виды – красно-серая и красная полевки, лесной лемминг, полевка-экономка.

Охотничье-промысловые виды. В настоящее время реальный промысел в районе исследований ограничивается всего двумя видами – соболь и дикий северный олень (ДСО). В последнее пятилетие охотниками на территории Оленекского улуса добывается от 217 до 895 соболей, что явно не соответствует запасам вида в угодьях (табл. 3), а пик закупок соболиных шкурок приходился на 1966 г. (4591 шт.). В последующие годы закупки несколько снизились и вновь достигли максимума в 1989 г., когда в заготовительную сеть охотниками было сдано 4122 шкурки соболя. Эти цифры отражают и общую тенденцию промысла зверька в республике.

Плотность населения соболя в верховьях р. Муна в 2007 г. можно охарактеризовать как обычную для этого региона: в Оленекском улусе по данным ДБР МОП РС (Я), она составила в

этом же году 0,32 особи на 1000 га, а в Жиганском – 0,76, в 2018 г. плотность населения на территории ООПТ «Бэке» составила 0,45 особи на 1000 га.

Необходимо отметить высокую встречаемость в районе исследований волка, вид регулярно отмечался в районе месторождения в период летних полевых работ и во время проведения ЗМУ (см. табл. 3). Судя по регулярности встреч волков в летний период, а также наличию следов сеголеток, верховья р. Муна являются районом размножения вида.

Основным объектом охотничьего промысла для Оленекского улуса является ДСО, которого здесь добывают в значительном количестве, так, в 2018 г., по информации Минэкологии Якутии, на территории улуса было добыто 4138 особей ДСО, что составляет 29,3 % от общего объема промысла этого вида в Якутии и 36,1 % от всей добычи оленей лено-оленинской популяции. По данным авиаучета 2018 г. численность этой популяции ДСО оценивается в 84 тысячи голов [39].

Миграция ДСО. Необходимо отметить, что в районе работ, в том числе по району расположе-

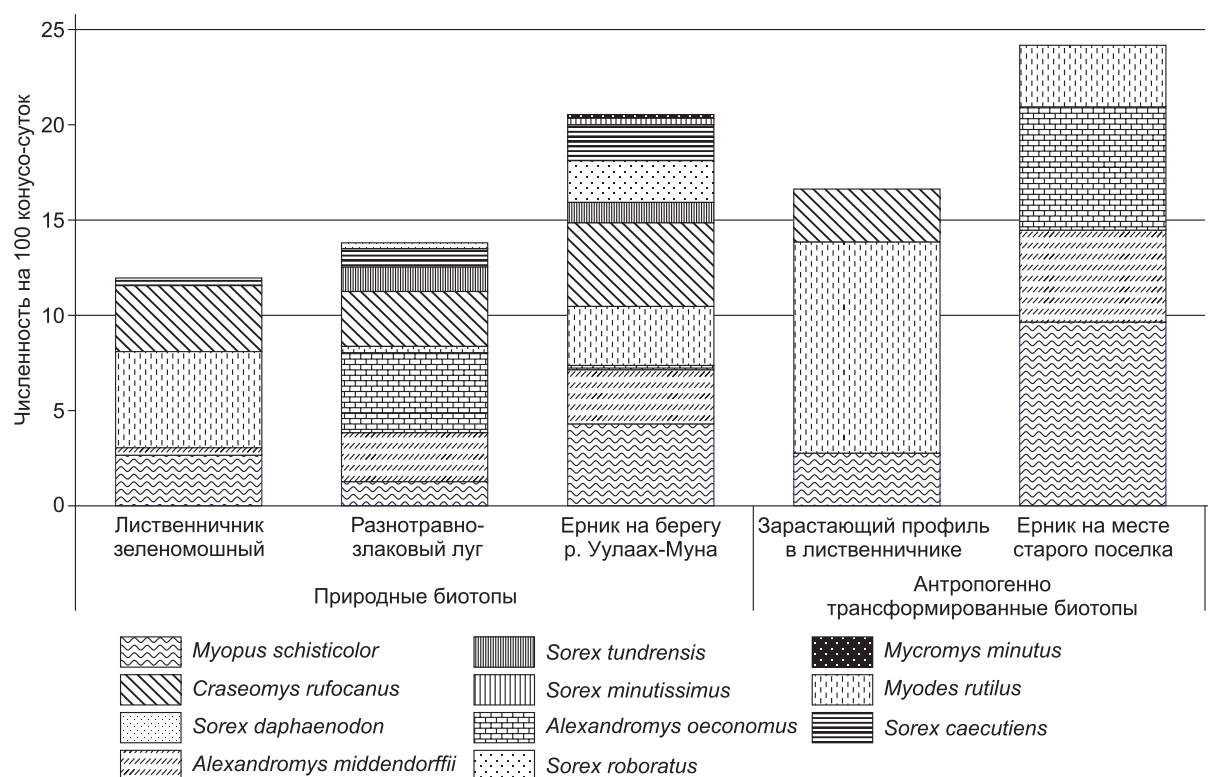


Рис. 2. Структура населения мелких млекопитающих по биотопам.

Fig. 2. Population structure of small mammals in different biotopes.

ния Верхне-Мунского месторождения, активно мигрирует лено-оленинская популяция и, кроме того, часть попирайской группировки (Таймыр) этого вида [8, 9]. По нашим материалам спутникового слежения за миграцией ДСО таймырской популяции (2013–2020 гг.), данные о наличии миграций попирайской группировки в район исследований не подтверждаются.

В августе 2007 г. во время полевых работ нами наблюдалась активная миграция ДСО, движение началось 13 августа, когда был замечен первый табун из 7–8 взрослых оленей, перешедших р. Улаах-Муна с правого берега на левый. После этого с 14–15-го числа начался массовый ход. Так, на участке дороги вдоль руч. Онхой длиной 1,5 км за двое суток (15–16 августа) прошло 73 оленя – 57 взрослых и 16 тугутов. Все они пересекали дорогу в направлении от р. Муна и двигались почти строго на запад, пересекая р. Онхой. Спустя 4 дня в ходе маршрутных работ на руч. Рудный видели несколько табунов оленей. За 2 дня насчитали примерно 65 голов. На маршруте вверх по руч. Онхой в течение дня видели пять групп оленей по 3–10 голов. В последующие дни также наблюдались перемещения оленей группами от 2–3 до 7–8 особей, встречались также одиночные, заходившие практически на территорию лагеря. Наиболее заметна была миграция на правом берегу р. Улаах-Муна. Большая часть оленей двигалась, пересекая руч. Онхой, в сторону руч. Рудный, а небольшая часть пересекала р. Улаах-Муна, двигаясь в северо-западном направлении. В лесу за время миграции появились хорошо заметные протоптанные тропы, большое количество экскрементов. После 24-го числа интенсивность миграции начала спадать, но отдельные группы и одиночные олени все еще регистрировались.

В период летних экспедиционных работ в августе 2018 г. фотоловушками первые особи дикого северного оленя зафиксированы 25 июля. Во время миграции отдельные табуны ДСО шли от устья р. Улаах-Муна вверх по течению реки. Некоторые прямо по профилю выходили на устье р. Онхой недалеко от вахтового поселка. В ходе маршрутных исследований по правому берегу р. Улаах-Муна от устья р. Онхой протяженностью примерно 2,5 км и обратно по левому берегу до лагеря были проведены регулярные учеты встречаемости ДСО. По этим наблюдениям с 9 августа по 15 августа наблюдалась интен-

сивная миграция ДСО, пик активности был зафиксирован 9 августа. В октябре 2008 г. следы ДСО отмечались на отдельных маршрутах (см. табл. 3), но табунки были небольшие, скорее всего в это время здесь проходит хвост миграции, состоящий из животных, задержавшихся на летовках и, возможно, на жировке в верховьях р. Муна.

По данным дистанционного наблюдения за миграцией ДСО, в районе верхнего течения р. Муна пролегают осенние миграционные пути дикого северного оленя тундровой лено-оленинской популяции. Смешанные группы оленей начинают проникать в данный район, отпочковываясь с хребта Чекановского (маточные стада) и плато Кыстык (самцовые стада), в среднем с первой декады августа и держатся здесь до начала–середины октября, в отдельные теплые годы до начала ноября. Таким образом, в указанный период здесь идет осенняя наживка оленей. В период осенней миграции к местам зимовок в бассейне верхней Муны проходит до 90 % животных популяции. В зимний период (ноябрь–март) олени здесь встречаются единично, но в отдельные годы, как 2010, 2016, 2019, при перераспределении по зимним стадам, обычно в конце ноября, может наблюдаться обратное прохождение копытных (около 20 %, а в 2019 г. – 60 % популяции), которые направляются в бассейн р. Молодо и к южным отрогам хребта Чекановского (бассейн р. Экиит).

По данным спутниковых передатчиков и наземных наблюдений, миграция от мест зимовок оленей начинается в среднем со второй декады апреля (маточные группы) и с середины мая (самцовые группы), не затрагивает район исследований. Основные пути миграции к летним пастбищам олени проходят, пересекая р. Оленек в устье р. Силигир, а часть – пересекая р. Муна в ее среднем течении.

Следовательно, исследованная территория является основным миграционным коридором лено-оленинской популяции к зимним пастбищам и самое главное, районом осенней наживки в лесной зоне.

Прогноз последствий разработки месторождения на охотничьи виды млекопитающих. Как нами было показано ранее, разработка месторождений неизбежно приводит к изменению характеристик населения млекопитающих под воздействием широкого круга факторов [21]. Одними из самых значимых являются отторжение природ-

**Показатели плотности населения охотничьих животных
в районе Верхне-Мунского месторождения алмазов (2007 г.)**

Table 3

**Figures of population density of commercial and game hunting species
in the area of the Upper-Muna deposit**

Номер маршрута Route number	Дата проведения учетов Census taking date	Показатели численности: $\frac{\text{следов на 10 км маршрута}}{\text{особей на 1000 га}}$				
		Волк <i>Canis lupus</i>	Горностай <i>Mustela erminea</i>	Заяц-беляк <i>Lepus timidus</i>	Соболь <i>Martes zibellina</i>	ДСО <i>Rangifer tarandus</i>
		Abundance parameters: $\frac{\text{tracks per 10 km of the route}}{\text{individuals per 1,000 ha}}$				
№ 1	20.10.2008 г.	$\frac{0,71}{0,08}$	$\frac{3,57}{3,7}$	$\frac{10,0}{11,7}$	$\frac{5,71}{1,94}$	—
		—	$\frac{5,0}{5,25}$	$\frac{15,0}{17,5}$	$\frac{5,0}{1,7}$	—
№ 2	21.10.2008 г.	—	$\frac{3,3}{3,5}$	$\frac{5,0}{5,8}$	$\frac{5,8}{1,97}$	$\frac{5,0}{0,8}$
№ 3	22.10.2008 г.	$\frac{4,4}{0,5}$	$\frac{3,3}{3,5}$	$\frac{14,4}{16,8}$	$\frac{6,6}{2,24}$	$\frac{7,7}{1,2}$
№ 4	23.10.2008 г.	$\frac{1,87}{0,2}$	$\frac{1,25}{1,3}$	$\frac{1,87}{2,2}$	$\frac{3,75}{1,27}$	$\frac{1,87}{0,3}$
№ 5	24.10.2008 г.	$\frac{4,28}{0,5}$	$\frac{4,28}{4,5}$	$\frac{7,14}{8,3}$	$\frac{5,71}{1,94}$	—
	25.10.2008 г.	—	$\frac{5,71}{6,0}$	$\frac{11,42}{13,4}$	$\frac{4,28}{1,45}$	—
№ 6	26.10.2008 г.	$\frac{2,30}{0,25}$	$\frac{2,30}{2,4}$	$\frac{0,76}{0,9}$	$\frac{4,6}{1,56}$	$\frac{10,76}{1,7}$
В среднем Average		$\frac{2,72}{1,86}$	$\frac{3,59}{3,77}$	$\frac{8,19}{9,59}$	$\frac{5,5}{1,75}$	$\frac{6,33}{0,5}$

ных ландшафтов и прямое преследование. В данном случае отторжение достаточно ограниченного участка природной территории не должно оказать принципиального влияния на состояние популяции основного пушно-промыслового вида региона – соболя. Хотя отторжение площадей, занятых промышленными площадками и инфраструктурой, включая дороги, плюс минимальная зона воздействия, которая определяется нами при принятии природопользователем специальных мер по минимизации в 2,5–3,0 км [40], неизбежно приведут к потерям для вида.

Гораздо опаснее возможная интенсификация прямого преследования, так как резко возрастает доступность угодий. Решить эту проблему также возможно с помощью специальных мер, которые мы рассмотрим ниже.

Наибольшую опасность представляет воздействие недавно введенного промышленного объек-

та на миграцию ДСО. Как нами указывалось выше, территория Верхне-Мунского месторождения находится в пределах коридора миграции лено-оленьской популяции ДСО к зимним пастбищам. Если относительно небольшая площадь рудного месторождения не может сама по себе служить серьезным препятствием, то технический проезд Верхне-Мунское месторождение – г. Удачный протяженностью 130 км с достаточно интенсивным движением технологического автотранспорта, который расположен поперек оси миграции стад, является труднопреодолимым препятствием. Ситуация усугубляется тем, что планируется разработка россыпных месторождений от Верхне-Мунского месторождения до устья р. Уулаах-Муна, что продлит преграду мигрирующим стадам еще на 15 км. Таким образом, на пути мигрирующих стад ДСО появилось препятствие, которое в бли-

жайшее время увеличится и достигнет протяженности 145 км.

Если не принимать специальных мер по минимизации, последствия могут быть очень неприятными. В первую очередь, можно ожидать резкого падения численности Лено-Оленекской популяции ДСО и изменения маршрутов миграции, что в свою очередь может привести к существенным потерям объемов промысла для жителей Оленекского улуса. Для того что избежать столь негативных последствий, нами были разработаны специальные меры минимизации, которые касались разработки рудных месторождений и проезда Верхне-Мунское месторождение – г. Удачный.

Меры по минимизации негативного воздействия разработки Верхне-Мунского месторождения на население млекопитающих. В российской практике сложился устойчивый стереотип, что развитие промышленности неизбежно сопровождается потерями биологических ресурсов. Безусловно, негативное воздействие всегда имеет место при любых антропогенных преобразованиях окружающей среды, которое диагностируется на том или ином уровне биологической системы [41], но во многих случаях грамотно примененные меры по минимизации негативного воздействия могут во многом снизить интенсивность последнего [42]. К сожалению, отечественная практика природопользования не обеспечивает экономической заинтересованности природопользователей во внедрении этих мер в достаточной мере [43, 44], по этой причине в практику они внедряются трудно. Нами для смягчения последствий разработки месторождения были предложены мероприятия, исходя из следующих предпосылок.

Изъятие территории не имеет определяющего значения. Фактор прямого преследования достаточно эффективно ликвидируется в случае вахтового способа освоения, полным запретом для работников на занятие охотой и наличия охотничьего снаряжения при нахождении на лицензионном участке. Еще лучше, если существует полный запрет на выход работников за пределы установленного периметра [21].

Как указывалось выше, основное негативное воздействие оказывается на пути миграции ДСО от технического проезда Верхне-Мунское месторождение – г. Удачный. Для минимизации ущерба от этого линейного сооружения нами предложены следующие меры.

1. Полностью запретить отстрел ДСО в окрестностях дороги всем природопользователям.

2. Разрешить проезд по дороге только специального транспорта, для чего организовать контрольно-пропускные пункты.

3. Организовать мониторинг за миграцией ДСО в районе дороги с помощью радиоошейников.

4. Согласно получаемой оперативной информации на период миграции закрывать дорогу для всех видов транспорта.

В данном случае природопользователь отнесся достаточно внимательно к проблеме, поскольку разработка месторождения могла оказать сильное негативное воздействие на социальные условия КМНС Оленекского улуса, и реализовал все перечисленные выше предложения. Дополнительно в 2017 г. в основных точках перехода оленьими технологической дороги, определенных как спутниковым слежением, так и наземными исследованиями, компанией были оборудованы переходы. По имеющимся на настоящий момент данным, в районе работ не наблюдается сколько-либо существенных изменений состояния популяции ДСО. Естественно, что мониторинговые наблюдения необходимо продолжать и в дальнейшем во избежание развития негативных процессов.

На момент разработки предложений по минимизации негативного воздействия на млекопитающих было неизвестно о продвижении добычи алмазов до устья р. Уулаах-Муна с выходом на р. Муна, в связи с появлением указанных объектов необходимо разработать новые рекомендации и учесть технологии разработки рассыпных месторождений. Нельзя сбрасывать со счетов возможную разработку Томторского месторождения редкоземельных металлов, которое также способно оказать сильное негативное воздействие на лено-оленекскую популяцию ДСО [6].

Выводы

Фауна млекопитающих верхнего течения р. Муна включает 28 видов млекопитающих. Среди мелких млекопитающих основу сообщества составляли лесной лемминг, красная и красно-серая полевки, численность насекомоядных в оба периода наблюдений была достаточно низкой. Видовое богатство здесь несколько выше, чем на сопредельных территориях, в фаунистическом плане наибольший интерес представляет отлов мыши-малютки, район исследований на настоящий момент является самой северной точкой обнаружения этого вида на территории Якутии.

В районе исследований проходит основной миграционный коридор лено-оленекской популяции ДСО к зимним пастбищам, и, что немало-

важно, это место осенней наживки вида в лесной зоне, поэтому состояние территории во многом определяет благополучие популяции. Предложенные нами меры по минимизации негативного воздействия разработки Верхне-Мунского месторождения алмазов на популяцию ДСО до настоящего времени способствуют сохранению стада, но нужно принимать во внимание расширение географии добычи алмазов, что диктует настоятельную необходимость проведения специализированных мониторинговых наблюдений.

Литература

1. Тугаринов А.Я., Смирнов Н.А., Иванов А.И. Птицы и млекопитающие Якутии // К десятилетию ЯАССР: Тр. СОНС. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 134 с.
2. Романов А.А. Пушные звери Ленско-Хатангского края и их промысел // Тр. Науч.-исслед. Ин-та полярного земледелия, животноводства и промыслового хозяйства. Серия «Промысл. хоз-во». Вып. 17. Л.: Изд-во Главсевморпути, 1941. 139 с.
3. Млекопитающие Якутии / Отв. ред. В.А. Тавровский. М.: Наука, 1971. 660 с.
4. Мордосов И.И. Млекопитающие Западной Якутии. Якутск: Кн. изд-во, 1997. 220 с.
5. Величенко В.В. Состояние охотничье-промысловых ресурсов верхнего течения р. Анабар // Наука и образование. 2003. № 1. С. 11–14.
6. Вольперт Я.Л., Данилов В.А., Сидоров М.М. Современное состояние и возможные трансформации населения охотничье-промысловых видов млекопитающих в районе Томторского месторождения редкоземельных металлов // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 22–26.
7. Сафронов В.М. Экология и использование дикого северного оленя в Якутии. Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2005. 177 с.
8. Сафронов В.М. Динамика численности леноленекской популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus*) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2014. № 3. С. 88–94.
9. Кривошапкин А.А. Миграция диких северных оленей (*Rangifer tarandus* L.) таймырской популяции на территорию Северо-западной Якутии // Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова. 2016. № 6 (56). С. 15–20.
10. Докучаев Н.Е., Захаров Е.С., Сафронов В.М., Пестрякова Л.А. Бурозубки (*Sorex*, *Mammalia*) низовьев р. Анабар (северо-западная Якутия) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2014. № 4. С. 66–70.
11. Вольперт Я.Л., Величенко В.В., Прокопьев Н.П., Шадрин Д.Я. Воздействие разработки россыпных месторождений алмазов на млекопитающих // Экологическая безопасность при разработке россыпных месторождений алмазов. Якутск, 2004. С. 92–99.
12. Прокопьев Н.П. Население мелких млекопитающих в районе добычи россыпных месторождений алмазов (среднее течение ручья Биллях) // Экологическая безопасность при разработке россыпных месторождений алмазов. Якутск, 2004. С. 203–207.
13. Прокопьев Н.П. Териофауна и структура населения мелких млекопитающих бассейна р. Моргогор (северо-западная Якутия) // Наука и образование. 2009. № 1. С. 84–90.
14. Прокопьев Н.П. Фауна млекопитающих бассейна среднего течения реки Анабар // Экологическая безопасность Якутии. Матер. науч.-практ. конф., посвященной 15-летию ФГНУ «ИПЭС». Якутск, 2008. С. 455–462.
15. Колодезников В.Е. Мелкие млекопитающие северо-западной Якутии: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук: Якутск, 2005. 18 с.
16. Колодезников В.Е. Радиоэкологические исследования массовых видов млекопитающих в зоне воздействия аварийных подземных ядерных взрывов в западной Якутии // Изв. Самарского научного центра РАН. 2014. № 5. С. 369–372.
17. Шадрин Д.Я. Мелкие млекопитающие в условиях техногенно преобразованных ландшафтов Западной Якутии: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2006. 20 с.
18. Вольперт Я.Л., Шадрин Д.Я., Шадрин Е.Г., Данилов В.А., Величенко В.В. Сообщества мелких млекопитающих антропогенных ландшафтов Западной Якутии // Наука и образование. 2005. № 2 (38). С. 47–52.
19. Вольперт Я.Л., Шадрин Е.Г. Влияние техногенной трансформации таежных ландшафтов на сообщества мелких млекопитающих Западной Якутии // Проблемы региональной экологии. 2010. № 4. С. 153–157.
20. Вольперт Я.Л. Трансформации населения млекопитающих при промышленном освоении девственных территорий Севера // Фундаментальные исследования. 2012. № 4, ч. 1. С. 186–199.
21. Вольперт Я.Л., Шадрин Е.Г. Трансформация населения млекопитающих при техногенном преобразовании природных ландшафтов Арктики и Субарктики // Изв. РАН. Сер. биол. 2020. № 2. С. 213–223. DOI: 10.31857/s0002332920020101.
22. Шадрин Е. Г., Вольперт Я.Л., Алексеева Н.Н., Данилов В.А., Пудова Т.М. Биоиндикационная оценка изменения качества окружающей среды в результате воздействия алмазодобывающих предприятий // Горный журнал. 2012. № 2. С. 79–83.
23. Вольперт Я.Л., Данилов В.А. Население мелких млекопитающих Анабар-Оленекского междуречья // Вестник ИРГСХА. 2017. № 83. С. 17–24.
24. Методические указания по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учета охотничьих животных в РСФСР. М.: Главохота РСФСР, 1990. 40 с.
25. Рожнов В.В., Глазов Д.М., Сальман А.Л. Использование спутниковых технологий для изучения и сохранения биоразнообразия в российской Арктике // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. 2011. № 10. С. 76–79.

26. Кучерук В.В. Новое в методике количественного учета вредных грызунов и землероек // Организация и методы учета птиц и вредных грызунов. М., 1963. С. 159–183.
27. Карасева Е.В., Телицына А.Ю. Методы изучения грызунов в полевых условиях. М.: Наука, 1996. 227 с.
28. Животовский Л.А. Показатель внутривидового разнообразия // Журнал общей биологии. 1980. Т. 41, № 6. С. 828–836.
29. Данилов В.А. Новые данные о распространении мыши-малютки (*Microtus minutus*) в Якутии // Млекопитающие России: фаунистика и вопросы териогеографии: сб. тр. науч.-практ. конференции. Ростов-на-Дону, 17–19 апреля 2019 г. М., 2019. С. 55–56.
30. Volpert Y.L., Shadrina E.G. Latitude- and climate-associated patterns in small mammal fauna changes of the West Yakutia // Russian J. Theriol. 2019. Vol. 18, No. 2. P. 33–40. DOI: 10.15298/rusjtheriol.18.2.04.
31. Вольперт Я.Л., Юдин Б.С. Пространственные изменения фаунистических комплексов мелких млекопитающих Якутии // Охотничье-промысловые ресурсы Сибири. Новосибирск, 1986. С. 198–202.
32. Вольперт Я.Л., Поздняков В.И., Гермогенов Н.И. Территориальное распределение и видовой состав млекопитающих низовьев р. Лена // Зоогеографические и экологические исследования териофауны Якутии. Якутск, 1988. С. 96–106.
33. Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г. Экология лесного лемминга на северо-востоке Якутии // Экология. 1990. № 4. С. 42–50.
34. Емельянова Л.Г. Пространственная организация восточной части ареала лесного лемминга (*Myopus schisticolor* Lilljeborg, 1844) // Бюлл. МОИП. Отд. Биология. 2015. Т. 120, вып. 5. С. 26–30.
35. Bobretsov A.V., Lukyanova L.E. Population dynamics of wood lemming (*Myopus schisticolor*) in different landscapes of the Northern Pre-Urals // Russian Journal of Theriology. 2017. No. 16 (1). С. 86–93.
36. Транквилевский Д.В., Борисов С.А., Киселева Е.Ю., Матросов А.Н., Удовиков А.И., Захаров К.С., Сурков А.В., Кутузов А.В., Жуков В.И., Корсак М.Н., Бережная Т.В., Бережной А.В., Трегубов О.В., Шефтель Б.И. О результатах наблюдений за водяной полевкой (*Arvicola amphibius* Linnaeus, 1758) на территории Российской Федерации в 2011–2014 гг. по данным учреждений Роспотребнадзора // Пест-менеджмент. 2014. № 4. С. 14–26. <https://www.pestmanagement.ru/2014-3ru/2014-4ru/>
37. Volpert Y.L., Shadrina E.G. Peculiarities of rodent communities of the northern landscapes // Rodents et Spatium. The 14th International Conference on Rodent Biology. Lisbon, 28 July – 2 August 2014. The Book of abstracts. P. 89.
38. Вольперт Я.Л., Шадрина Е.Г. Сообщества мелких млекопитающих природных ландшафтов Якутии // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. Т. I. Ландшафты в XXI веке: анализ состояния, основные процессы и концепции исследований. Гл. I/76. М.: Изд-во ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 2018. С. 392–397. DOI: 10.25680/6084.2018.13.44.076.
39. Авиавизуальный учет численности дикого северного оленя лено-оленьской популяции в 2018 году. Отчет о НИР ИБПК СО РАН. Охлопков И.М., Кириллин Е.В., Мамаев Н.В. Якутск, 2018. 28 с.
40. Вольперт Я.Л., Величенко В.В., Аргунов А.В. Роль антропогенных факторов в существовании охотничье-промысловых видов млекопитающих Якутии // Прикладная экология Севера (опыт проведенных исследований, современное состояние и перспективы). Якутск, 2003. С. 184–192.
41. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Данилов В.А., Шадрин Д.Я. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера (морфогенетический подход). Новосибирск: Наука. 2003. 110 с.
42. Вольперт Я.Л., Мартынова Г.А. Основные направления минимизации воздействия алмазодобывающей промышленности Якутии на окружающую среду // Горный журнал. 2011. № 1. С. 100–102.
43. Вольперт Я.Л. Проблемы устойчивости экосистем в условиях интенсивного промышленного освоения Севера // Арктическая зона РФ: северо-восточный вектор развития. Сб. матер. Международной научно-практич. конф., посвящ. 380-летию вхождения Якутии в состав Российского государства, 28–30 ноября 2012 г. СПб., 2013. Ч. 1. С. 21–23.
44. Вольперт Я.Л. Минимизация негативного воздействия на окружающую среду как основа «устойчивого развития» регионов // Современные проблемы мерзлотного почвоведения и прикладной экологии севера. Матер. Всерос. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию д.б.н. академика АН РС(Я), засл. деятеля науки РФ проф. Д.Д. Саввинова, 29–30 марта 2012 г., г. Якутск. Якутск, 2013. С. 379–383.

Поступила в редакцию 16.05.2020
Принята к публикации 14.07.2020

Об авторах

ШАДРИНА Елена Георгиевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны ФИЦ «ЯНЦ» СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-shadrina@yandex.ru;

ВОЛЬПЕРТ Яков Лейзерович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, зав. лабораторией прикладной зоологии и биоиндикации, НИИ прикладной экологии Севера им. Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им М.К. Аммосова, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1385-8052>, ylv52@mail.ru;

ОХЛОПКОВ Иннокентий Михайлович, кандидат биологических наук, директор, Институт биологических проблем криолитозоны ФИЦ «ЯНЦ» СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, imokhlopkov@yandex.ru;

СИДОРОВ Михаил Михайлович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны ФИЦ «ЯНЦ» СО РАН, Россия, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,

<https://orcid.org/0000-0001-7490-2777>, sidorov_michail86@mail.ru;

ДАНИЛОВ Василий Алексеевич, НИИ Прикладной экологии Севера им. Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им М.К. Аммосова, Россия, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-1628-7512>, vasiliy_danilov01@mail.ru.

Информация для цитирования

Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л., Охлопков И.М., Сидоров М.М., Данилов В.А. Население млекопитающих бассейна Верхней Муны (Арктическая зона Западной Якутии): современное состояние и прогноз // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 74–88. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-7>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-7

Mammalian population of the Upper Muna Basin (the Arctic Zone of the West Yakutia): Current state and forecast

E.G. Shadrina^{1*}, Ya.L. Vol’pert², I.M. Okhlopov¹, M.M. Sidorov¹, V.A. Danilov²

¹Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

²Research Institute of Applied Ecology of the North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

*shadrina@yandex.ru

Abstract. Active expansion of the mining industry to the territory of the Arctic zone necessitates obtaining objective data on the initial state of ecosystems, forecasting the consequences of territory development, and developing measures for minimizing negative processes. The field and remote-research methods are used as the basis to provide a complete description of the mammalian population in the area of development of a new deposit of diamonds in the Arctic zone of West Yakutia that has not been studied before. It was found that the mammalian fauna of the studied area includes 28 species. The abundance of commercial and game hunting species and characteristics of small mammal communities were determined. The species of the greatest economic significance are the reindeer and sable. The new facility will most probably have the major impact on the Lena-Olenyok population of wild reindeer, which relies on this area during the autumn migration and foraging. Recommendations on minimizing the negative impact on commercial species were developed and put into practice with a positive result.

Key words: mammal population, commercial species, small mammals, wild reindeer, Arctic, mining industry, impact forecast, negative impact minimization methods.

Acknowledgements. The studies were carried out within the framework of the state task to IBPC SB RAS, project “Structure and dynamics of animal populations and communities in the cold region of the

North-East Russia in contemporary conditions of global climate change and anthropogenic transformation of Northern ecosystems: factors, mechanisms, adaptation, conservation (0376-2016-0002; reg. number AAAA17-117020110058-4) and the state task of the Ministry of education and science of the Russian Federation for 2020-2022. Project FSRG-2020-0018, "Study of the specifics of Arctic and subarctic ecosystems of Yakutia in conditions of intensifying anthropogenic impact and global climate change". The authors are grateful to [Vitaly Danilov] and [Semyon Grigoriev] for their help in collecting the material in 2007.

References

1. Tugarinov A.Ya., Smirnov N.A., Ivanov A.I. Pticy i mlekopitayushchie Yakutii / K desyatiletuyu YaASSR. Tr. SONS. L.: Izd-vo AN SSSR, 1934. 134 p.
2. Romanov A.A. Pushnye zveri Lensko-Hatangского kraia i ikh promysel // Tr. nauch.-issled. In-ta polyarnogo zemledeliya, zhivotnovodstva i promyslovogo hozyajstva. Seriya «Promysl. hoz-vo». Vyp. 17. L.: Izd-vo Glavsevmorputi, 1941. 139 p.
3. Mlekopitayushchie Yakutii / Otv. red. V.A. Tavorovskii. M.: Nauka, 1971. 660 p.
4. Mordosov I.I. Mlekopitayushchie Zapadnoi Yakutii. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1997. 220 p.
5. Velichenko V.V. Sostoyanie ohotnich'e-promyslovyyh resursov verkhnego techeniya r. Anabar // Nauka i obrazovanie. 2003. No. 1. P. 11-14.
6. Vol'pert Ya.L., Danilov V.A., Sidorov M.M. Sovremennoe sostoyanie i vozmozhnye transformacii naseleniya ohotnich'e-promyslovyyh vidov mlekopitayushchikh v rajone Tomtorskogo mestorozhdeniya redkozemel'nykh metallov // Problemy regional'noi ekologii. 2018. No. 5. P. 22-26.
7. Safronov V.M. Ekologiya i ispol'zovanie dikogo severnogo olenya v Yakutii. Yakutsk: YaF GU Izd-vo SO RAN, 2005. 177 p.
8. Safronov V.M. Dinamika chislennosti leno-olenekskoi populyacii dikogo severnogo olenya (*Rangifer tarandus*) // Vestnik SVNC DVO RAN. 2014. No. 3. P. 88-94.
9. Krivoshapkin A.A. Migratsiya dikikh severnykh olenei (*Rangifer tarandus* L.) tajmyrskoi populyacii na territoriyu Severo-zapadnoj Yakutii // Vestnik SVFU im. M.K. Ammosova. 2016. No. 6 (56). P. 15-20.
10. Dokuchaev N.E., Zaharov E.S., Safronov V.M., Pestryakova L.A. Burozubki (*Sorex*, *Mammalia*) nizov'ev r. Anabar (severo-zapadnaya Yakutiya) // Vestnik SVNC DVO RAN. 2014. No. 4. P. 66-70.
11. Vol'pert Ya.L., Velichenko V.V., Prokop'ev N.P., Shadrina E.G. Vozdejstvie razrabotki rossypnykh mestorozhdenii almazov na mlekopitayushchikh // Ekologicheskaya bezopasnost' pri razrabotke rossypnykh mestorozhdenii almazov. Yakutsk, 2004. P. 92-99.
12. Prokop'ev N.P. Naselenie melkikh mlekopitayushchikh v rajone dobychi rossypnykh mestorozhdenii almazov (srednee techenie ruch'ya Billyakh) // Ekologicheskaya bezopasnost' pri razrabotke rossypnykh mestorozhdenii almazov. Yakutsk, 2004. P. 203-207.
13. Prokop'ev N.P. Teriofauna i struktura naseleniya melkikh mlekopitayushchikh basseina r. Morgogor (severo-zapadnaya Yakutiya) // Nauka i obrazovanie. 2009. No. 1. P. 84-90.
14. Prokop'ev N.P. Fauna mlekopitayushchikh basseina srednego techeniya reki Anabar // Ekologicheskaya bezopasnost' Yakutii. Mater. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 15-letiyu FGUN «IPES». Yakutsk, 2008. P. 455-462.
15. Kolodeznikov V.E. Melkie mlekopitayushchie severo-zapadnoi Yakutii. Avtoref. diss. ... cand. biol. nauk. Yakutsk, 2005. 18 p.
16. Kolodeznikov V.E. Radioekologicheskie issledovaniya massovykh vidov mlekopitayushchikh v zone vozdejstviya avariynykh podzemnykh yadernykh vzryvov v zapadnoi Yakutii // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoi akademii nauk. 2014. No. 5. P. 369-372.
17. Shadrin D.Ya. Melkie mlekopitayushchie v usloviyakh tekhnogenno preobrazovannykh landshaftov Zapadnoj Yakutii: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk. Petrozavodsk, 2006. 20 p.
18. Vol'pert Ya.L., Shadrin D.Ya., Shadrina E.G., Danilov V.A., Velichenko V.V. Soobshchestva melkikh mlekopitayushchikh antropogennykh landshaftov Zapadnoi Yakutii // Nauka i obrazovanie. 2005. No. 2(38). P. 47-52.
19. Vol'pert Ya.L., Shadrina E.G. Vliyanie tekhnogennoi transformacii taezhnykh landshaftov na soobshchestva melkikh mlekopitayushchikh Zapadnoi Yakutii // Problemy regional'noi ekologii. 2010. No. 4. P. 153-157.
20. Vol'pert Ya.L. Transformacii naseleniya mlekopitayushchikh pri promyshlennom osvoenii devstvennykh territorij Severa // Fundamental'nye issledovaniya. 2012. No. 4, pt. 1. P. 186-199.
21. Vol'pert Ya.L., Shadrina E.G. Transformaciya naseleniya mlekopitayushchikh pri tekhnogennom preobrazovanii prirodnykh landshaftov Arktiki i Subarktiki // Izv. RAN. Seriya biol. 2020. No. 2. P. 213-223. DOI: 10.31857/s0002332920020101.
22. Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L., Alekseeva N.N., Danilov V.A., Pudova T.M. Bioindikatsionnaya otsenka izmeneniya kachestva okruzhayushchei sredy v rezul'tate vozdejstviyaalmazodobyvayushchikh predpriyatii // Gornyi zhurnal. 2012. No. 2. P. 79-83.
23. Vol'pert Ya.L., Danilov V.A. Naselenie melkikh mlekopitayushchikh Anabar-Olenekskogo mezhdurech'ya // Vestnik IrGSKHA. 2017. No. 83. P. 17-24.
24. Metodicheskie ukazaniya po organizatsii, provedeniyu i obrabotke dannyh zimnego marshrutnogo ucheta ohotnich'ih zhivotnykh v RSFSR. M.: Glavkhota RSFSR, 1990. 40 p.
25. Rozhnov V.V., Glazov D.M., Sal'man A.L. Ispol'zovanie sputnikovyyh tekhnologii dlya izucheniya i sokhraneniya bioraznoobraziya v rossijskoi Arktike // Zemlya iz kosmosa: naibolee effektivnye resheniya. 2011. No. 10. P. 76-79.

26. Kucheruk V.V. Novoe v metodike kolichestvennogo ucheta vrednykh gryzunov i zemleroev // Organizatsiya i metody ucheta ptits i vrednykh gryzunov. M., 1963. P. 159–183.
27. Karaseva E.V., Telitsyna A.Yu. Metody izucheniya gryzunov v polevykh usloviyakh. M.: Nauka, 1996. 227 p.
28. Zhivotovskiy L.A. Pokazatel' vnutripopulyatsionnogo raznoobraziya // Zhurnal Obshchei biologii. 1980. Vol. 41, No. 6. P. 828–836.
29. Danilov V.A. Novye dannye o rasprostraneni myshimalyutki (*Micromys minutus*) v Yakutii // Mlekopitayushchie Rossii: faunistika i voprosy teriogeografii: Sb. tr. Nauch.-prakt. Konferentsii, Rostov-na-Donu, 17–19 aprelya 2019 g. M., 2019. P. 55–56.
30. Volpert Y.L., Shadrina E.G. Latitude- and climate-associated patterns in small mammal fauna changes of the West Yakutia // Russian J. Theriol. 2019. Vol. 18, No. 2. P. 33–40. DOI: 10.15298/rusjtheriol.18.2.04.
31. Volpert Ya.L., Yudin B.S. Prostranstvennye izmeneniya faunisticheskikh kompleksov melkikh mlekopitayushchikh Yakutii // Ohotnich'e-promyslovye resursy Sibiri. Novosibirsk, 1986. P. 198–202.
32. Volpert Ya.L., Pozdnyakov V.I., Germogenov N.I. Territorial'noe raspredelenie i vidovoi sostav mlekopitayushchikh nizov'ev r. Lena // Zoogeograficheskie i ekologicheskie issledovaniya teriofauny Yakutii. Yakutsk, 1988. P. 96–106.
33. Volpert Ya.L., Shadrina E.G. Ekologiya lesnogo lemminga na severo-vostoke Yakutii // Ekologiya. 1990. No. 4. P. 42–50.
34. Emel'yanova L.G. Prostranstvennaya organizatsiya vostochnoj chasti areala lesnogo lemminga (*Myopus schisticolor* Lilljeborg, 1844) // Byull. MOIP. otd. Biologiya. 2015. Vol. 120, Iss. 5. P. 26–30.
35. Bobretsov A.V., Lukyanova L.E. Population dynamics of wood lemming (*Myopus schisticolor*) in different landscapes of the Northern Pre-Urals // Russian Journal of Theriology. 2017. No. 16 (1). C. 86–93.
36. Trankvilevskii D.V., Borisov S.A., Kiseleva E.Yu., Matrosov A.N., Udovikov A.I., Zakharov K.S., Surkov A.V., Kutuzov A.V., Zhukov V.I., Korsak M.N., Berezhnaya T.V., Berezhnoi A.V., Tregubov O.V., Sheftel' B.I. O rezul'tatakh nablyudenii za vodyanoi polevkoy (*Arvicola amphibius* Linnaeus, 1758) na territorii Rossijskoi Federatsii v 2011–2014 gg. po dannym uchrezhdenii Rosпотребнадзора // Pest-menedzhment. 2014. No. 4. P. 14–26. <https://www.pestmanagement.ru/2014-3ru/2014-4ru/>
37. Volpert Y.L., Shadrina E.G. Peculiarities of rodent communities of the northern landscapes // Rodents et Spatium. The 14th International Conference on Rodent Biology. Lisbon, 28 July–2 August 2014. The Book of abstracts. P. 89.
38. Volpert Ya.L., Shadrina E.G. Soobshchestva melkikh mlekopitayushchikh prirodnikh landshaftov Yakutii // Novye metody i rezul'taty issledovaniy landshaftov v Evrope, Central'noj Azii i Sibiri / Pod red. V.G. Sycheva, L. Myullera. Vol. I. Landshafty v XXI veke: analiz sostoyaniya, osnovnye protsessy i kontseptsii issledovaniy. Gl. I/76. M.: Izd-vo FGBNU «VNII Agrohimii», 2018. 504 p. DOI 10.25680/3078.2018.69.72.005
39. Aviazivual'nyi uchet chislennosti dikogo severnogo olenya leno-olenekskoi populyatsii v 2018 godu. Otchet o NIR IBPK SO RAN / Ohlopkov I.M., Kirillin E.V., Mamaev N.V. Yakutsk, 2018. 28 p.
40. Volpert Ya.L., Velichenko V.V., Argunov A.V. Rol' antropogennykh faktorov v sushchestvovanii ohotnich'e-promyslovyykh vidov mlekopitayushchikh Yakutii // Prikladnaya ekologiya Severa (opyt provedennykh issledovaniy, sovremennoe sostoyanie i perspektivy). Yakutsk, 2003. P. 184–192.
41. Shadrina E.G., Volpert Ya.L., Danilov V.A., Shadrin D.Ya. Bioindikatsiya vozdeystviya gornodobyvayushchei promyshlennosti na nazemnye ekosistemy Severa (morfogeneticheskii podhod). Novosibirsk: Nauka, 2003. 110 p.
42. Volpert Ya.L., Martynova G.A. Osnovnye napravleniya minimizatsii vozdeystviya almazodobyvayushchei promyshlennosti Yakutii na okruzhayushchuyu sredu // Gornyi zhurnal. 2011. No. 1. P. 100–102.
43. Volpert Ya.L. Problemy ustojchivosti ekosistem v usloviyakh intensivnogo promyshlennogo osvoeniya Severa // Arkticheskaya zona RF: severo-vostochnyi vektor razvitiya. Sb. mater. Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. konferents., posvyashch. 380-letiyu vkhozhdeniya Yakutii v sostav Rossijskogo gosudarstva, 28–30 noyabrya 2012 g. CH. 1. SPb., 2013. P. 21–23.
44. Volpert Ya.L. Minimizatsiya negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu kak osnova «ustoychivogo razvitiya» regionov // Sovremennye problemy merzlotnogo pochvovedeniya i prikladnoi ekologii severa. Mater. Vseros. Nauch.-prakt. konf., posvyashch. 80-letiyu d.b.n. akademika AN RS (Ya), zasl. deyatelya nauki RF prof. D.D. Savvinova, Yakutsk, 29–30 marta 2012 g. Yakutsk, 2013. P. 379.

About the authors

SHADRINA Elena Georgievna, professor, doctor of biological sciences, chief researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Federal research center “Yakut scientific center SB RAS”, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-9660-0072>, e-shadrina@yandex.ru;

VOLPERT Yakov Leizerovich, doctor of biological sciences, chief researcher, the head of the laboratory of Applied Zoology and Bioindication D.D. Savvinov, Research Institute of Applied ecology of the North, North-Eastern Federal University, 43 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1385-8052>, ylv52@mail.ru;

OKHLOPKOV Innokenty Mikhailovich, candidate of biological sciences, director, of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Federal research center “Yakut scientific center SB RAS”, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, imokhlopkov@yandex.ru;

SIDOROV Mikhail Mikhailovich, candidate of biological sciences, researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Federal research center “Yakut scientific center SB RAS”, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7490-2777>, sidorov_michail86@mail.ru;

DANILOV Vasily Alekseevich, junior researcher, D.D. Savvinov Research Institute of Applied ecology of the North, North-Eastern Federal University, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1628-7512>, vasiliy_danilov01@mail.ru.

Citation

Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L., Okhlopkov I.M., Danilov V.A., Sidorov M.M. Mammalian population of the Upper Muna Basin (Arctic Zone of the West Yakutia): Current state and forecast // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 74–88. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-7>

Содержание флавоноидов в биомассе *Atriplex patula* L. при механоактивационной обработке

И.В. Воронов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
viv_2002@mail.ru

Аннотация. Изучено влияние измельчения надземной биомассы *Atriplex patula* L. до размеров частиц 1,0–1,5 мм (грубый помол), 0,8–0,9 мм (средний помол) и 0,5–0,6 мм (мелкий помол) с обработкой в механоактивационной мельнице на общее содержание флавоноидов (спектрофотометрический метод определения), количество рутина, дигидрокверцетина и лютеолин-7-О-глюкозида (метод ВЭЖХ) в растительной муке. Установлено повышение в 1,2 раза экстрактивности общего количества флавоноидов при измельчении до размеров частиц 0,5–0,6 мм относительно изученных вариантов помола. Механоактивационная (МА) обработка в течение 1 мин приводила к снижению общего количества флавоноидов во всех вариантах помола. Измельчение до размеров частиц 0,8–0,9 мм (средний помол) способствовало снижению содержания рутина в растительной муке в 1,6–2,0 раза относительно контрольных значений исследованных вариантов измельчения. МА-воздействие на муку грубого помола способствовало увеличению выхода рутина, за исключением двухминутной МА-обработки. Измельчение до размеров частиц 0,5–0,6 мм приводило к повышению экстрагирования ДКВ, при МА-обработке его уровень не изменялся, за исключением одномоментного МА-воздействия, когда содержание флавоноида снижалось. Измельчение сырья до размеров 1,0–1,5 и 0,5–0,6 мм способствовало повышению содержания лютеолин-7-О-глюкозида, при этом процесс МА-обработки приводил к снижению его количества, за исключением МА муки среднего помола, где наблюдалось увеличение на 33,3 % содержания лютеолин-7-О-глюкозида относительно контроля по группе. Установлен наиболее оптимальный режим МА воздействия со скоростью вращения ротора 1500 об./мин в атмосфере воздуха с предмеханоактивационным измельчением биомассы *A. patula* до размеров частиц 0,5–0,6 мм, который не влияет на изменение количества исследованных физиологически активных веществ в сырье.

Ключевые слова: механоактивация, *Atriplex patula* L., рутин, дигидрокверцетин, лютеолин-7-О-глюкозид.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания ИБПК СО РАН по проекту № АААА-А17-117020110056-0.

Введение

Экологически безопасные и эффективные решения в переработке природного растительного сырья – актуальная задача для биотехнологической отрасли [1, 2]. Одна из ключевых задач переработки биоматериала – интенсификация процессов выделения экстрактивных веществ и идентификации их состава, представляющих практический интерес. Механохимические методы получения биологически активных веществ растительного происхождения основаны на твердофазном превращении этих веществ в растворимые формы путем механической обработки растительного сырья и специально подобранных реагентов [3–5]. Использование предваритель-

ной механической активации (МА) позволяет достигать максимальной эффективности на стадии последующего экстрагирования физиологически активных веществ, в том числе в водных средах [6–9]. Ударно-сдвиговое воздействие сопровождается измельчением и разупорядочением структуры обрабатываемого материала, сопряженным с разрывом химических связей, что может влиять на экстракцию компонентов [10, 11]. Направленное использование механических воздействий позволяет увеличить поверхности контакта взаимодействующих фаз, накопление в частицах дефектов структуры, появление на свежобразованной поверхности активных центров и радикалов. В результате могут протекать ги-

дротермальные химические процессы, образуются механокомпозиты и изменяются каталитические свойства пористых тел вследствие процессов декристаллизации [12, 13]. В данное время вопрос взаимосвязи процессов предмеханоактивационной пробоподготовки с явлениями механоактивации в аппаратах планетарного типа и их влияние на содержание физиологически активных веществ (ФАВ) в продукте помола остается открытым. Известно, что эффективность МА определяется типом аппарата и режимом воздействия мелющих (рабочих) тел на обрабатываемый материал (истирающим, вихревым, ударным). Существенное влияние на результаты МА оказывают также отношение массы рабочих тел к массе и размеру обрабатываемого материала, материал размольной гарнитуры, геометрия рабочих тел и другие факторы [14].

Существенными преимуществами механоактивационного подхода является исключение из технологии химических реагентов, снижение материальных и трудовых затрат на производство. Дополнительно появляется возможность использовать в качестве источника биологически активных веществ маловостребованные ресурсы – отходы сельскохозяйственного производства и лесной промышленности, сырье с низким содержанием активных веществ [15]. Предполагается, что деформация составляющих веществ сырья может приводить к изменению межмолекулярных и межмолекулярных связей, сопровождающемуся их ослаблением и в предельном случае вызывающему механический разрыв химических связей и образование активных радикалов [16]. В последние 10–15 лет интенсивно ведутся работы по созданию высокоинтенсивных механохимических аппаратов, основное назначение которых – не только измельчение, но одновременно придание обрабатываемому веществу особых свойств, которые приводят к увеличению его реакционной способности [17].

Цель – выявить влияние механоактивационной обработки надземной биомассы *Atriplex patula* L. на содержание рутина, ДКВ и лютеолин-7-О-глюкозида при разных условиях пробоподготовки биосырья.

Материал и методы

Объект исследования – лебеда раскидистая *Atriplex patula* L., дикорастущее однолетнее травянистое растение, широко распространенное в Центральной Якутии, относится к семейству

Амарантовые (Amaranthaceae), растет вдоль дорог, на сорных, рудеральных местах и солончатых лугах [18]. Цветение и созревание семян *A. patula* идет в течение всего вегетационного периода, каждое растение дает большое количество семян. Цветет в июне–июле. Многие представители рода *Atriplex* издавна используются в народной медицине. *A. patula* имеет промежуточный тип фотосинтеза [19]. Компонентный состав *A. patula*, произрастающей в условиях криолитозоны, изучен недостаточно. Ранее установлено, что листья лебеды богаты белками, минеральными веществами; содержат витамины С, Е, Р, РР, рутин, эфирное масло, сапонины, алкалоиды [20, 21]. Семена и листья растения содержат значительное количество углеводов и аминокислот. *A. patula* может использоваться в качестве кормового и пищевого растения [22].

Посадка семян проводилась во вспаханную почву в конце мая, расстояние между рядами 70 см, глубина заделки 1–1,5 см. Сбор вегетативной биомассы проводился в середине июля в фазе цветения. Сушка биосырья проводилась в хорошо проветриваемом помещении без доступа света.

Механоактивацию вегетативных частей растения *Atriplex patula* L. проводили на лабораторном механоактиваторе АГО-3 с циркониевыми шарами диаметром 6 мм, число оборотов барабана 1500 об./мин в течение 1, 2 и 3 мин в атмосфере воздуха. МА-обработке подвергались 100 г предварительно измельченной надземной биомассы *Atriplex patula* L. на мельнице грубого помола Fritsch (Германия), размер частиц 1,0–1,5 мм (грубый помол) и мельнице мелкого помола Culatti (Германия) с размерами частиц 0,8–0,9 мм (средний помол) и 0,5–0,6 мм (мелкий помол). Среднее максимальное значение скорости шаров составляло 20,41 м/с и рассчитывалось по формуле $V = 2\pi\nu R_k/60$, где ν – частота вращения вала, R_k – радиус контейнера [23].

Общее содержание флавоноидов в биомассе определяли спектрофотометрическим методом, который основан на реакции флавоноидов с лимоннокислым борным реактивом с образованием устойчивого окрашенного комплекса. Оптическую плотность растворов измеряли на спектрофотометре UV-2600 фирмы Shimadzu (Япония) при длине волны 420 нм [24].

Определение содержания флавоноидов в метанольных экстрактах осуществляли методом ВЭЖХ на микроколоночном хроматографе Ми-

лихром А-02 фирмы «ЭкоНова» (Россия) с последующей компьютерной обработкой результатов исследования, используя программу «Мульти-Хром» для Windows. Навеску растительной муки массой 0,05 г экстрагировали в 1,0 мл метанола (Merck) в течение 24 ч при постоянном перемешивании в комнатных условиях, после чего полученные экстракты пропускали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,20 мкм.

Разделение проводили на хроматографической колонке ProntoSIL 120-5-C18 AQ размером 2×75 мм при условиях: подвижная фаза элюент А – 0,1%-й водный раствор уксусной кислоты; В — ацетонитрил, градиентный режим элюирования с возрастанием доли В от 10 до 75 % в течение 50 мин при скорости потока 50 мкл/мин и температуре колонки 40 °С. Объем проб 4 мкл. Детектирование осуществляли с помощью УФ-спектрофотометрического детектора при длине волны 350 нм.

В качестве стандартных образцов использовали лютеолин-7-О-глюкозид, рутин (кверцетин-3-О-рутинозид) и дигидрокверцетин (3,3',4',5,7-пентагидроксифлавонон гидрат) производства Sigma-Aldrich. Смесь растворов стандартных образцов готовили в концентрациях 6,25, 12,5, 25,0, 50,0, 100,0 и 200,0 мкг/мл в метиловом спирте. В качестве градуировочных зависимостей использовали уравнения линейной регрессии, связывающие концентрации характеризующих соединений и площади пиков. Содержание индивидуальных компонентов в образцах определяли методом внешнего стандарта как оптимального при хроматографическом анализе многокомпонентных смесей [25].

Все измерения выполнены в четырех повторностях. Полученные результаты представлены в виде средней арифметической величины и ее стандартного отклонения ($M \pm SD$). Статистический анализ полученных данных выполнялся с помощью программы Statistica 10. Достоверность различий определялась по критерию Стьюдента, различия считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Общее содержание флавоноидов в контрольных вариантах исследованных предмеханоактивных обработок сырья было выше в среднем в 1,2 раза у растительной муки мелкого помола с размером частиц 0,5–0,6 мм, что может объясняться наиболее лучшей экстрактивностью веществ, при данном варианте измельче-

ния (см. таблицу). Применение различных вариантов МА вегетативной биомассы *A. patula* при скорости вращения 1500 об./мин оказывало статистически достоверное влияние на общее содержание флавоноидов относительно времени МА. Наименьшее содержание общего количества флавоноидов наблюдалось при МА-воздействии на муку грубого и среднего помола в течение 1 мин (до 2,320 мг-экв кверцетина/г_{сух.ткани}) по сравнению со всеми условиями обработки, а также в варианте с мукой мелкого помола, где зафиксирован минимум общего содержания флавоноидов внутри группы (3,050 мг-экв кверцетина/г_{сух.ткани}). Таким образом, отмечено, что воздействие МА в течение 1 мин приводило к снижению общего количества флавоноидов в муке из вегетативной биомассы *A. patula* во всех вариантах измельчения.

Увеличение времени ударно-сдвигового воздействия до 2 и 3 мин для растительной муки грубого и среднего помола имело разнонаправленное действие относительно общего содержания флавоноидов и четкой закономерности не имело. Следует отметить, что МА-воздействие на растительную муку мелкого помола при экспозиции 2 и 3 минуты не оказывало влияние на общее содержание флавоноидов относительно контроля по группе. Предположено, что МА-воздействие на растительную муку *A. patula* в атмосфере воздуха снижает (1 мин) количество общего содержания флавоноидов вследствие их окисления/деструкции или не оказывает влияния на их содержание при увеличении экспозиции от 2 до 3 мин, возможно, это компенсируется за счет увеличения уровня экстрактивности.

Установлено, что помол до размеров частиц 0,8–0,9 мм (средний помол) способствует снижению содержания рутина в растительной муке в 1,6–2,0 раза относительно контрольных значений исследованных вариантов помола. При этом увеличение времени МА-воздействия на растительную муку среднего помола не влияет на содержание рутина. Наибольшее содержание рутина наблюдалось в контрольном варианте и во всех режимах МА муки мелкого помола, а также при одно- и трехминутной обработке муки грубого помола. Анализ содержания ДКВ в муке *A. patula* показал, что высокое его содержание наблюдалось в контроле при мелком помоле и в вариантах МА, за исключением одноминутного воздействия, при котором выявлено снижение содержания флавоноида в 1,8 раза. Минималь-

Содержание флавоноидов в биомассе *A. patula* L. при различных вариантах предварительного обмола и времени механоактивационной обработки

The content flavonoids in biomass *A. patula* L. with various options for preliminary grinding and time of mechanical activation treatment

Время, мин Time, minutes	Общее содержание флавоноидов, мг-экв кверцетина/г _{сух. ткани} Total flavonoid content, mg-Eq quercetin/g _{dry tissue}	Рутин, мг/г _{сух. ткани} Rutin, mg/g _{dry tissue}	Дигидрокверцетин, мг/г _{сух. ткани} Dihydroquercetin, mg/g _{dry tissue}	Лютеолин-7-О-глюкозид, мг/г _{сух. ткани} Luteolin-7-O-glucoside, mg/g _{dry tissue}
Грубый помол/Coarse grinding				
Контроль/ Control	2,780±0,080 ^c	0,450±0,010 ^b	0,030±0,002 ^c	0,060±0,003 ^f
1	2,320±0,060 ^a	0,490±0,020 ^c	0,030±0,001 ^c	0,010±0,001 ^a
2	2,880±0,080 ^c	0,430±0,010 ^b	0,030±0,001 ^c	0,020±0,001 ^b
3	2,610±0,070 ^b	0,490±0,020 ^c	0,010±0,001 ^a	0,050±0,003 ^c
Средний помол/Medium grinding				
Контроль/ Control	2,670±0,080 ^b	0,280±0,010 ^a	0,020±0,001 ^b	0,030±0,002 ^c
1	2,220±0,070 ^a	0,260±0,010 ^a	0,020±0,001 ^b	0,040±0,002 ^d
2	2,750±0,080 ^b	0,260±0,010 ^a	0,020±0,001 ^b	0,040±0,001 ^d
3	2,920±0,090 ^c	0,280±0,010 ^a	0,020±0,001 ^b	0,040±0,001 ^d
Мелкий помол/Fine grinding				
Контроль/ Control	3,240±0,100 ^d	0,550±0,030 ^c	0,070±0,003 ^c	0,060±0,003 ^f
1	3,050±0,090 ^c	0,530±0,020 ^c	0,040±0,002 ^d	0,020±0,001 ^b
2	3,190±0,100 ^d	0,500±0,020 ^c	0,070±0,003 ^c	0,060±0,003 ^f
3	3,330±0,100 ^d	0,510±0,020 ^c	0,070±0,003 ^c	0,030±0,002 ^c

Примечание. Значения с одинаковыми надстрочными литерами статистически значимо не различались при $p < 0,05$.

Note. Values with the same superscript letters were not statistically significantly different at $p < 0,05$.

ная концентрация ДКВ была определена в варианте трехминутной МА муки грубого помола (0,010 мг/г_{сух. ткани}). Возможно, что длительное МА-воздействие на муку с размером частиц 1,0–1,5 мм (грубый помол) в атмосфере воздуха способствует процессам, связанным с окислением ДКВ, вследствие этого наблюдается снижение его количества в пробах. Следует учесть, что в остальных вариантах при увеличении времени МА снижения количества ДКВ не наблюдалось. Известно, что важное значение имеет и размер частиц, подвергающихся МА-обработке: мука *A. patula* среднего помола в контроле и в вариантах МА-действия содержала одинаковое количество ДКВ, что может указывать на интенсификацию экстрактивности вещества при МА-обработке на фоне возможных процессов окисления. Высокое содержание ДКВ (0,070 мг/г_{сух. ткани}) выявлено в муке мелкого помола во всех исследованных

вариантах, за исключением одноминутной МА, где наблюдалось снижение его количества в 1,8 раза относительно значений по группе. Сравнивая разные варианты предмеханоактивационного помола биомассы *A. patula* выявлено снижение в 2,0 раза количества лютеолин-7-О-глюкозида в муке среднего помола относительно контрольных значений других групп, при этом МА-воздействие способствовало увеличению в 1,3 раза его содержания. В вариантах МА муки грубого помола с увеличением времени воздействия наблюдалось повышение содержания данного флавоноида в максимальном значении при трехминутной обработке (0,050 мг/г_{сух. ткани}), но в сравнении с контролем по группе его содержание было снижено в 1,2 раза. Количество лютеолин-7-О-глюкозида в растительной муке мелкого помола оставалось на уровне контроля только в варианте двухминутного МА-воздействия, тог-

да как при одно- и трехминутном наблюдалось снижение его содержания в 3,0 и 2,0 раза соответственно.

Полученные данные по содержанию ФАВ в *A. patula* позволяют говорить о наиболее оптимальном режиме МА со скоростью вращения ротора 1500 об./мин, в атмосфере воздуха с предмеханоактивационным измельчением биомассы сырья до размеров частиц 0,5–0,6 мм. Следует отметить и тот факт, что помол до размеров частиц 0,5–0,6 мм без применения МА-обработки также содержит высокие концентрации ФАВ в сырье, но при этом не исключается возможность передачи энергии при МА-воздействии на молекулы веществ, что может способствовать увеличению их реакционной способности.

Выводы

Установлено повышение в 1,2 раза экстрактивности общего количества флавоноидов при измельчении до размеров частиц 0,5–0,6 мм (мелкий помол) относительно изученных вариантов помола. Механоактивационная обработка в течение 1 мин приводила к снижению общего количества флавоноидов во всех вариантах помола. Измельчение до размеров частиц 0,8–0,9 мм (средний помол) способствует снижению содержания рутина в растительной муке в 1,6–2,0 раза относительно контрольных значений исследованных вариантов измельчения. МА-воздействие на муку грубого помола (0,5–0,6 мм) способствовало увеличению выхода рутина, за исключением двухминутной МА-обработки. Измельчение до размеров частиц 0,5–0,6 мм приводит к повышению экстрагирования ДКВ, а при МА-обработке его уровень не изменялся, за исключением одноминутного МА-воздействия, где наблюдалось снижение содержания флавоноида. Показано, что измельчение сырья до размеров 1,0–1,5 и 0,5–0,6 мм способствовало повышению содержания лютеолин-7-О-глюкозида в растительной муке относительно измельчения 0,8–0,9 мм, при этом процесс МА-обработки приводил к снижению его количества, за исключением МА муки среднего помола, где наблюдалось увеличение на 33,3 % содержания лютеолин-7-О-глюкозида относительно контроля по группе.

Установлен наиболее оптимальный режим МА-воздействия со скоростью вращения ротора 1500 об./мин в атмосфере воздуха с предмеханоактивационным измельчением биомассы *A. patula* до размеров частиц 0,5–0,6 мм, который не

влияет на изменение количества исследованных физиологически активных веществ в сырье.

Литература

1. Бирюков В.В. Основы промышленной биотехнологии. М., 2004. 296 с.
2. Rodionova N.S., Popov E.S., Kustov V.Yu. et al. Impact of mechanical activation on the prebiotic properties of plant biological resources // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. No. 10(01). P. 1718–1730.
3. Ломовский О.И., Белых В.Д. Механохимическая экстракция водорастворимых компонентов из растительного липидсодержащего сырья // Периодический сборник научных трудов «Обработка дисперсных материалов и сред». 2000. № 10. С. 71–75.
4. Chuev V.P., Kameneva O.D., Chikalo T.M. Use of mechanochemical activation to modify properties of bioactive compounds // Siberian Chemical Journal. 1991. No. 5. P. 156–157.
5. Vedernikov N., Karlivans V., Roze I., Rolle A. Mechanochemical destruction of plant raw materials polysaccharides in presence of small amounts of concentrated sulfuric acid // Siberian Chemical Journal. 1991. No. 5. P. 67–72.
6. Ильина И.А., Земскова З.Г., Миронова О.П. Проблемы интенсификации процесса производства модифицированных пектинов на основе методов механохимии // Наука Кубани. 2007. № 2. С. 61–67.
7. Сунцова А.П., Метелева Е.С., Душкин А.В. Механохимическое получение и исследование водорастворимых композиций на основе флавоноидов – генистеина, дигидрокверцетина, рутина // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 2174–2179.
8. Kamarludin S., Jainal S., Azizan M. et al. Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production // Applied Mechanics and Materials. 2014. No. 625. P. 838–841. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.625.838>
9. Lomovsky O., Bychkov A., Lomovsky I. Mechanical pretreatment. biomass fractionation technologies for a lignocellulosic feedstock based biorefinery. Elsevier. 2016. P. 23–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00002-5>.
10. Савельева А.В., Юдина Н.В. Механохимические превращения кислородсодержащих соединений липидов торфа // Химия растительного сырья. 2013. № 4. С. 201–206. DOI: 10.14258/jcprm.1304201
11. Zhang W., Liang M., Lu C. Morphological and structural development of hardwood cellulose during mechanochemical pretreatment in solid state through pan-milling // Cellulose. 2007. No. 14(5). P. 447–456.
12. Bychkov A., Podgorbunskikh E., Bychkova E., Lomovsky O. Current achievements in the mechanically pretreated conversion of plant biomass // Biotechnol Bioeng. 2019. Vol. 116(5). P.1231–1244. doi: 10.1002/bit.26925.
13. Vtjurina L.M. Khvoshchev S.S. Synthesis and characterization of MWW zeolites // Studies in Surface

Science and Catalysis. 2002. Vol. 144. P. 671–675. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(02\)80195-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(02)80195-1)

14. Чижевская С.В., Чекмарев А.М., Клименко О.М. и др. Интенсификация на основе механической активации процессов разложения редкометалльного сырья пиро-, гидро- и сольвометаллургическими методами // Научные основы химии и технологии переработки комплексного сырья и синтеза на его основе функциональных материалов. Сб. научн. тр. Апатиты, 2008. Ч. 1, т. 1. С. 198–200.

15. Хренкова Т.М. Механохимическая активация углей. М., 1993. 176 с.

16. Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. Новосибирск, 1983. 64 с.

17. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск, 1986. 305 с.

18. Иванова В.П. Двудольные растения окрестностей г. Якутска (определитель). Якутск, 1990. 160 с.

19. Конспект флоры Сибири: Сосудистые растения / сост. Л.И. Малышев, Г.А. Пешкова, К.С. Байкова и др.; под ред. К.С. Байков. Новосибирск, 2005. 362 с.

20. Тимофеев Н.П. Протеиновая ценность новых культур в условиях Севера (Теоретическое обоснова-

ние и практическая реализация) // Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. Сб. научн. тр. Вып. 6. М.: РАЕН, 2002. С. 115–139.

21. Пашинский В.Г. Лекарственные растения в терапии сахарного диабета. Томск: НИИ фармакологии ТНЦ СО РАМН, 1990. 145 с.

22. Воронов И.В. Аминокислотный состав *Atriplex patula* L. и *Amaranthus retroflexus* L. (Amaranthaceae), произрастающих в Центральной Якутии // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 69–74. DOI: 10.14258/jcrpm.2018033610

23. Бороненко М.П., Лавриков В.В., Серегин А.Е. и др. Контроль энергии измельчения и механоактивации планетарной мельницы АГО-3 // Вестник Югорского государственного университета. 2016. № 2 (41). С. 7–16.

24. Рогожин В.В. Методы биохимических исследований. Якутск, 1999. 113 с.

25. Шеин А.А., Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Журавская А.Н. Влияние техногенного загрязнения на содержание фотосинтетических пигментов и флавоноидов у *Matricaria chamomila* (Asteraceae) // Растительные ресурсы. 2014. № 50(2). С. 235–241.

Поступила в редакцию 15.06.2020

Принята к публикации 03.08.2020

Об авторе

ВОРОНОВ Иван Васильевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-5460-4024>, Researcher ID:S-8071-2018, viv_2002@mail.ru.

Информация для цитирования

Воронов И.В. Содержание флавоноидов в биомассе *Atriplex patula* L. при механоактивационной обработке // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 89–96. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-8>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-8

The content of flavonoids in *Atriplex patula* L. biomass during mechanical activation treatment

I.V. Voronov

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
viv_2002@mail.ru

Abstract. The effect of grinding of the aboveground biomass of *Atriplex patula* L. to particle size of 1.0–1.5 mm (coarse grinding), 0.8–0.9 mm (average grinding) and 0.5–0.6 mm (fine grinding) with further processing in a mechanical mill on the total content of flavonoids, amounts of rutin, dihydroquercetin and luteolin-7-o-glucoside in vegetable flour was studied. The total content of flavonoids in the biomass was

determined by means of spectrophotometry, the content of rutin, dihydroquercetin and luteolin-7-O-glucoside was determined by means of HPLC. It was found that the yield of the total amount of flavonoids increased by a factor of 1.2 when crushed to a particle size of 0.5–0.6 mm, with respect to the studied grinding versions. Mechanical activation (MA) for one minute led to a decrease in the total amount of flavonoids in all grinding versions. It was found that grinding to a particle size of 0.8–0.9 mm (average grinding) reduces the content of rutin in plant flour by a factor of 1.6–2.0 with respect to the control. MA of coarse flour increased the yield of rutin, with the exception of the two-minute MA treatment. It was found that grinding to the particle size of 0.5–0.6 mm leads to an increase in the amount of extracted dihydroquercetin; with MA treatment of the resulting flour, dihydroquercetin content does not change, except for one-minute MA, when there was a 1.8 times decrease in dihydroquercetin content. It is shown that the grinding of raw materials to the size of 1.0–1.5 and 0.5–0.6 mm causes an increase in the content of luteolin-7-O-glucoside in plant flour. The MA treatment of plant flour led to a decrease in the amount of luteolin-7-O-glucoside under these grinding conditions. The exception was MA treatment of average-milled flour, where the content of dihydroquercetin increased by 33.3 % (with respect to the control in the group). The most optimal mode of MA was established, with a rotor speed of 1500 rpm in air, with pre-MA grinding of *A. patula* biomass to a particle size of 0.5–0.6 mm, which does not affect the change in the amount of the studied physiologically active substances in the raw material.

Key words: mechanical activation, *Atriplex patula* L., rutin, dihydroquercetin, luteolin-7-O-glucoside.

Acknowledgements. This work was carried out as part of the state tasks of the IBPC SB RAS on projects № AAAA-A17-117020110056-0.

References

1. Biryukov V.V. Osnovy promyshlennoj biotekhnologii. M., 2004. 296 p.
2. Rodionova N.S., Popov E.S., Kustov V.Yu. et al. Impact of mechanical activation on the prebiotic properties of plant biological resources // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. No. 10(01). P. 1718–1730.
3. Lomovsky O.I., Belykh V.D. Mekhanohimicheskaya ekstrakciya vodorastvorimyh komponentov iz rastitel'nogo lipidsoderzhashchego syr'ya // Periodical collection of scientific papers «Processing of dispersed materials and media». 2000, No. 10. P. 71–75.
4. Chuev V.P., Kameneva O.D., Chikalo T.M. Use of mechanochemical activation to modify properties of bioactive compounds // Siberian Chemical Journal. 1991. No. 5. P. 156–157.
5. Vedernikov N., Karlivans V., Roze I., Rolle A. Mechanochemical destruction of plant raw materials polysaccharides in presence of small amounts of concentrated sulfuric acid // Siberian Chemical Journal. 1991. No. 5. P. 67–72.
6. Ilyina I.A., Zemskova Z.G., Mironova O.P. Problemy intensifikacii processa proizvodstva modifitsirovannyh pektinov na osnove metodov mekhanohimii // Nauka Kubani. 2007. No. 2. P. 61–67.
7. Suntsova A.P., Meteleva E.S., Dushkin A.V. Mekhanohimicheskoe poluchenie i issledovanie vodorastvorimyh kompozitsij na osnove flavonoidov – genisteina, digidrokvercitina, rutina // Fundamentalnye Issledovaniya. 2014. No. 11.P. 2174–2179.
8. Kamarludin S., Jainal S., Azizan M. et al. Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production // Applied Mechanics and Materials. 2014. No. 625. P. 838–841. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.625.838>
9. Lomovsky O., Bychkov A., Lomovsky I. Mechanical pretreatment. biomass fractionation technologies for a lignocellulosic feedstock based biorefinery. Elsevier. 2016. P. 23-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00002-5>.
10. Savelyeva A.B., Yudina N.V. Mekhanohimicheskie prevrashcheniya kislorodsoderzhashchih soedinenij lipidov torfa // Chimija rastitelnogo syriya. 2013. No. 4. P. 201–206. DOI: 10.14258/jcprm.1304201
11. Zhang W., Liang M., Lu C. Morphological and structural development of hardwood cellulose during mechanochemical pretreatment in solid state through pan-milling // Cellulose. 2007. No. 14(5). P. 447–456.
12. Bychkov A., Podgorbunskikh E., Bychkova E., Lomovsky O. Current achievements in the mechanically pretreated conversion of plant biomass // Biotechnol Bioeng. 2019. Vol. 116(5). P.1231–1244. doi: 10.1002/bit.26925.
13. Vtjurina L.M., Khvoshchev S.S. Synthesis and characterization of MWW zeolites // Studies in Surface Science and Catalysis. 2002. Vol. 144. P. 671–675. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(02\)80195-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(02)80195-1)
14. Chizhevskaya S.V., Chekmarev A.M., Klimenko O.M. et al. Intensifikaciya na osnove mekhanicheskoy aktivacii processov razlozheniya redkometal'nogo syr'ya piro-, gidro- i sol'vometallurgicheskimi metodami. // Nauchnye osnovy khimii i technologii pererabotki kompleksnogo syriya i sinteza na ego osnove funktsionalnykh materialov. Sat scientific tr Apatity, 2008. Part 1, vol. 1. P. 198–200.
15. Khrenkova T.M. Mekhanohimicheskaya aktivaciya uglej. M., 1993. 176 p.

16. *Boldyrev V.V.* Eksperimental'nye metody v mekhanohimii tverdyh neorganicheskikh veshchestv. Novosibirsk, 1983. 64 p.
17. *Avvakumov E.G.* Mekhanicheskie metody aktivatsii himicheskikh processov. Novosibirsk, 1986. 305 p.
18. *Ivanova V.P.* Dvudol'nye rasteniya okrestnostej g. Yakutsk (opredelitel'). Yakutsk, 1990. 160 p.
19. *Konspekt flory Sibiri: Sosudistye rasteniya / sost. L.I. Malyshev, G.A. Peshkova, K.S. Bikes and others; pod red. K.S. Bikes.* Novosibirsk, 2005. 362 p.
20. *Timofeev N.P.* Proteinovaya cennost' novyh kul'tur v usloviyakh Severa (Teoreticheskoe obosnovanie i prakticheskaya realizatsiya) // *Netraditsionnyye prirodnyye resursy, innovatsionnyye tehnologii i produkty*. Vol. 6. M., RANS, 2002. P. 115–139.
21. *Pashinsky V.G.* Tomsk: NII farmakologii, TSC SB RAMS, 1990. 145 p.
22. *Voronov I.V.* Aminokislotnyy sostav *Atriplex patula* L. i *Amaranthus retroflexus* L. (Amaranthaceae), proizrastayushchih v Central'noj Yakutii // *Chimija rastitel'nogo syriya*. 2018. No. 3. P. 69–74. DOI: 10.14258/jcpm.2018033610
23. *Boronenko M.P., Lavrikov V.V., Seregin A.E. et al.* Kontrol' energii izmel'cheniya i mekhanoaktivatsii planetarnoj mel'nicy AGO-3 // *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No. 2 (41). P. 7–16
24. *Rogozhin V.V.* Metody biohimicheskikh issledovanij. Yakutsk, 1999. 113 p.
25. *Shein A.A., Prokopyev I.A., Filippova G.V., Zhuravskaya A.N.* Vliyanie tekhnogennogo zagryazneniya na sodержanie fotosinteticheskikh pigmentov i flavonoidov u *Matricaria Chamomila* (Asteraceae) // *Rastitelnyye resursy*. 2014, Vol. 50 (2). P. 235–241.

About the author

VORONOV Ivan Vasilievich, candidate of biological sciences, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Federal Research Center «Yakut scientific center SB RAS», 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-5460-4024>, Researcher ID:S-8071-2018, viv_2002@mail.ru.

Citation

Voronov I.V. The content of flavonoids in *Atriplex patula* L. biomass during mechanical activation treatment // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 89–96. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-8>

Материалы к лишенобиоте Центральной Якутии

Л.Н. Порядина

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

poryadina-lena@rambler.ru

Аннотация. Центральная Якутия расположена в среднем течении реки Лена, для всей территории типичны спокойный рельеф и незначительные абсолютные высоты. Климат резко-континентальный, район расположен в области распространения криолитозоны. Для Центральной Якутии характерны лиственничные (*Larix cajanderi* Mayr) и сосновые (*Pinus sylvestris* L.) леса. Ельники (*Picea obovata* Ledeb.) приурочены к долинам рек и аласам. На лугово-лесостепных участках встречаются березовые (*Betula platyphylla* Sukacz.) колки с обильным разнотравьем. Фрагменты степных участков представлены луговыми и злаковыми или злаково-полынными степями. Лишенобиота Центральной Якутии изучалась с 40-х годов прошлого века и к настоящему времени насчитывает 273 вида из 90 родов отдела сумчатых лишайников (Ascomycota). В статье приводится список 48 видов лишайников, найденных в ходе комплексных экспедиционных исследований ИБПК СО РАН разных лет. Приведенные в статье виды лишайников дополняют данные о лишенобиоте Центральной Якутии, особенно накипных эпиксильных, а также эпифитных видов; лишайников остепненных сообществ. Список лишайников Центральной Якутии пополнился 13 новыми видами, для Якутии найдено 3 новых вида лишенобиоты (*Calicium notarissii*, *Carbonicola anthracophila*, *Hertelidea botryosa*). Редкими в Якутии и на смежных территориях являются 10 видов лишайников.

Ключевые слова: лишайники, флористический район, распространение, Центральная Якутия, гербарий лишайников SASY-L.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания ИБПК СО РАН на 2017-2021 гг. АААА-А17-117020110056-0 «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии».

Введение

Центральная Якутия расположена в среднем течении реки Лена, охватывает средние и нижние течения рек Вилюй и Алдан, включает Лено-Вилюйское и Лено-Амгинское междуречья и ограничивается с востока и северо-востока Верхоянским хребтом и его отрогами, с юга – Патомским, с юга-востока – Алданским нагорьями, с запада – Вилюйским плато. Для всей этой территории типичны спокойный рельеф и незначительные абсолютные высоты (от 112 до 450–500 м над ур. моря).

Климат района резко-континентальный, что проявляется в больших колебаниях сезонных температур воздуха, малом количестве осадков, приходящихся главным образом на теплый период года. Летний сезон теплый и местами очень засушливый, среднегодовое количество выпадающих осадков 190–220 (300) мм. Район расположен в области распространения криолитозоны мощностью до 500 м.

Центрально-Якутский флористический район (ФР) значительно отличается от других районов не только в почвенном и климатическом отношении, но и своеобразием флоры и растительности. Для района характерны лиственничные (*Larix cajanderi* Mayr) и сосновые (*Pinus sylvestris* L.) леса. Ельники (*Picea obovata* Ledeb.) распространены небольшими ленточными массивами и приурочены к долинам рек и аласам. На лугово-лесостепных участках встречаются березовые (*Betula platyphylla* Sukacz.) колки с обильным разнотравьем. Фрагменты степных участков представлены луговыми дерновинно-злаково-разнотравными и злаковыми или злаково-полынными степями [1, 2].

Лишенобиота Центральной Якутии представлена в работах А.Н. Окснера [3, 4], М.Н. Караваева [5, 6], И.Д. Кильдюшевского [7], Ю.В. Рыковой [8], Л.Н. Порядиной [9–18], М.П. Журбенко [19], И.А. Галаниной [20–22], в монографии «Растительность бассейна реки Вилюя» [23].

Биоразнообразие лишайников Центрально-Якутского ФР представлено 273 видами лишайников из 90 родов отдела сумчатых лишайников (Ascomycota).

Материалы и методы

Основу данной статьи составляют личные сборы автора в рамках комплексных экспедици-

онных исследований ИБПК СО РАН разных лет в Кобяйском (2002), Мирнинском (2006), Хангаласском (2000, 2007, 2017), Чурапчинском (2017), Намском (2019) районах Республики Саха (Якутия), в окрестностях г. Якутск (2008, 2011, 2018, 2019); а также материалы гербария лишайников ИБПК СО РАН (SASY-L). При сборе и определении лишайников использована стандартная ме-

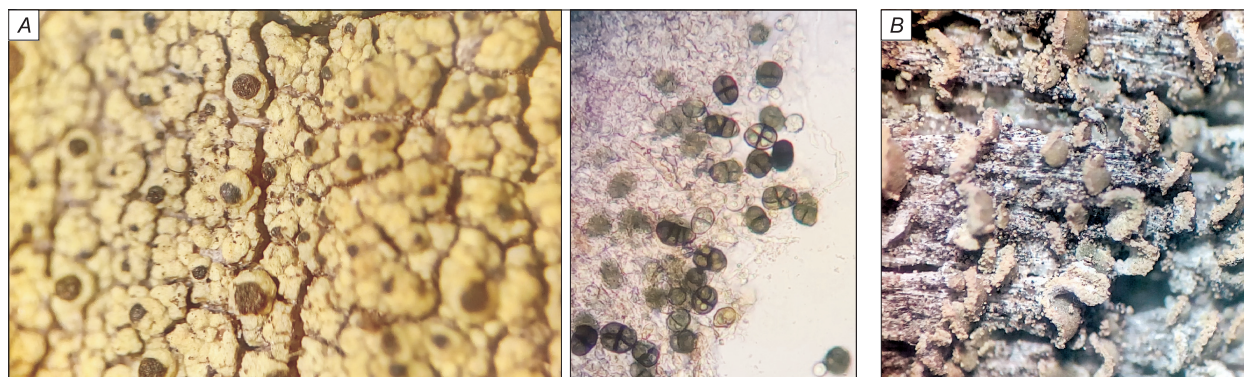


Рис. 1. Виды лишайников, новые для Якутии.

A – *Calicium notarisii* (Tul.) M. Prieto & Wedin (таллом, споры); *B* – *Carbonicola anthracophila* (Nyl.) Bendiksby & Timdal.

Fig. 1. Lichen species new to Yakutia.

A – *Calicium notarisii* (Tul.) M. Prieto & Wedin (the thallus, the spores); *B* – *Carbonicola anthracophila* (Nyl.) Bendiksby & Timdal.

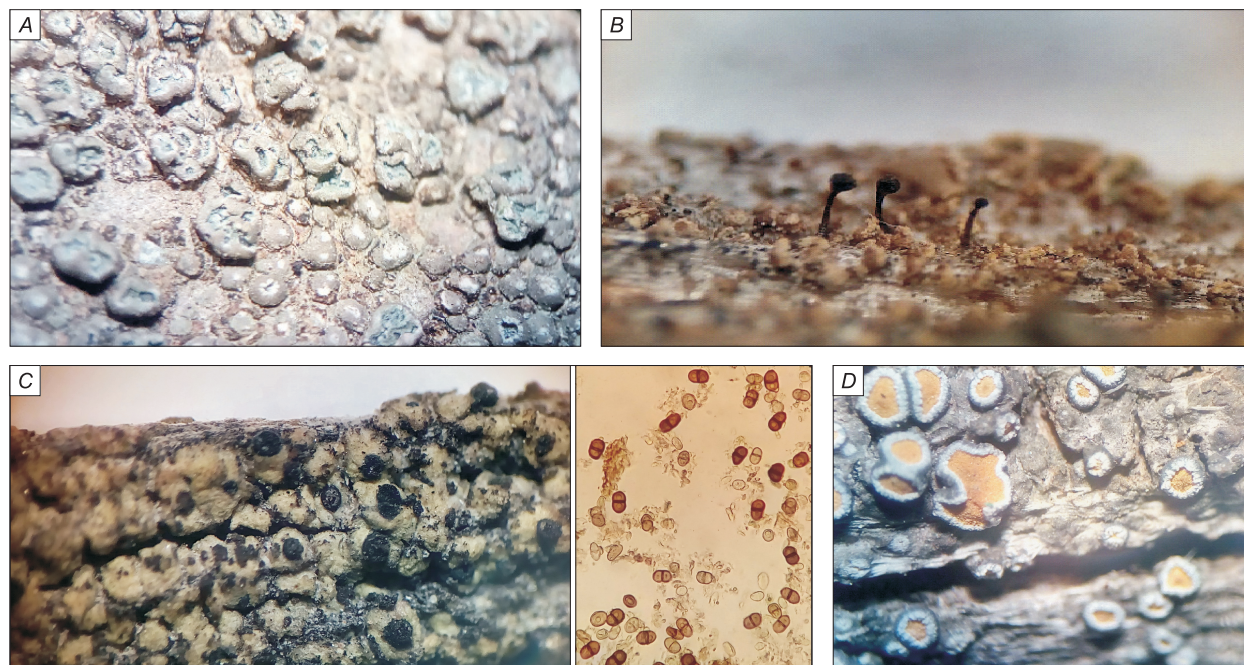


Рис. 2. Виды лишайников, новые и редкие для Центральной Якутии.

A – *Aspicilia desertorum* (Kremp.) Mereschk; *B* – *Chaenothecopsis savonica* (Räsänen) Tibell; *C* – *Cyphelium tigillare* (Ach.) Ach. (таллом, споры); *D* – *Caloplaca cerina* (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr.

Fig. 2. Lichen species, new and rare in Central Yakutia.

A – *Aspicilia desertorum* (Kremp.) Mereschk; *B* – *Chaenothecopsis savonica* (Räsänen) Tibell; *C* – *Cyphelium tigillare* (Ach.) Ach. (the thallus, the spores); *D* – *Caloplaca cerina* (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr.

тодика [24]. Идентификация видов лишайников проводилась автором в лаборатории флористики, геоботаники и мерзлотного лесоведения ИБПК СО РАН. Актуальное название вида приводится в соответствии с Index Fungorum [25], Myco-bank [26]. Фотографии сделаны автором с использованием бинокля МСП-1 и микроскопа Motic B1-223ASC (рис. 1, 2).

Места сбора образцов лишайников, приведенных в статье, данные описаний указаны ниже. Коллектором в описаниях 1-23 является автор статьи. Географические координаты определены при помощи GPS-навигатора Garmin GPSmap 60Cx.

1. Хангаласский район, бассейн р. Синяя (левый приток р. Лена), устье р. Тас-Ханда, 61°29'24.1"N, 126°25'29.9"E, скалы из песчаника в окружении сосново-лиственничного леса, 04.07.2000; **2.** Кобяйский р-н, бассейн р. Леписке (Ляписке) (правый приток р. Лена), озеро Синнях, 64°59'38"N, 126°39'30"E, елово-лиственничный лес, 09.07.2002; **3.** Кобяйский р-н, бассейн р. Леписке (Ляписке) (правый приток р. Лена), 49,5 км от устья, 64°40'45"N, 126°23'39"E, выходы скал, 15.07.2002; **4.** Мирнинский район, бассейн р. Улахан-Ботуобуя, в 2 км от устья р. Дюнку-Улах, выходы скал в багульниково-лишайниково-брусничном лиственничном лесу, 62°08'03.7" с.ш. 112°37'24.5" в.д., 16.08.2006; **5.** Мирнинский район, окрестности Вилюйского водохранилища (Негибильская труба), 60°24'01"N, 120°18'01"E, выходы скал в сосняке бруснично-лишайниковом, 23.08.2006; **6.** Хангаласский район, окрестности пос. Улах-Ан, 61°38'46.8"N, 129°12'33.7"E, склон сопки, остепненный участок в окружении соснового леса, выходы камней, 15.09.2007; **7.** Окрестности г. Якутск, по дороге на Кильдемцы, 33 км автодороги Р-503 (Якутск–Намцы), 62°16'19.2"N, 129°50'33.2"E, равнинный полынно-злаковый остепненный участок, 07.08.2008; **8.** Окрестности г. Якутск, городской парк, 62°02'29.7"N, 129°42'49.6"E заросли ивы и боярышника, 15.09.2008; **9.** Окрестности г. Якутск, пос. Табага, Табагинский мыс, 61°48'28.6"N, 129°31'96.3"E, 198 м над ур. м., лиственничник травяной толокнянковый, 17.09.2011; **10.** Окрестности г. Якутск, пос. Табага, Табагинский мыс, сосняк мертвopo-кровный, 62°50'03.9"N, 129°31'37.1"E, 211 м над ур. м., 17.09.2011; **11.** Хангаласский р-н, окрестности с. Еланка, левый берег р. Лена, правый берег р. Истях-Аппа, выходы скал, 61°15'06"N, 127°53'73"E, 110 м над ур. м., ельник на склоне коренного берега, 07.07.2017; **12.** Хангалас-

ский р-н, окрестности с. Еланка, левый берег р. Лена, вершина коренного берега, 61°15'07"N, 127°53'68"E, 151 м над ур. м., елово-сосновый разнотравный лес, 07.07.2017; **13.** Хангаласский р-н, окрестности с. Еланка, левый берег р. Лена, коренной берег, 61°15'62"N, 128°02'06"E, 198 м над ур. м., сосняк можжевельниково-шиповниковый брусничный, 09.07.2017; **14.** Хангаласский р-н, окрестности с. Еланка, левый берег р. Лена, коренной берег, 61°15'62"N, 128°02'08"E, 194 м над ур. м., остепненный склон, 09.07.2017; **15.** Хангаласский р-н, окрестности с. Еланка, левый берег р. Лена, склон остепненного коренного берега, выходы скал, 61°15'81.3"N, 128°05'14.1"E, 112 м над ур. м., выходы скал, 10.07.2017; **16.** Чурапчинский р-н, 144 км автодороги Р-504 «Колыма», 62°00'15" с. ш., 131°50'32" в. д., 195 м над ур. м., степное сообщество, 26.08.2017; **17.** Чурапчинский р-н, 144 км автодороги Р-504 «Колыма», 62°00'15"N, 131°50'32"E, 195 м над ур. м., березово-лиственничный лес, 26.08.2017; **18.** Окрестности г. Якутск, район Птицефабрики, 62°00'37"N, 129°34'37"E, 155 м над ур. м., послепожарный сосняк с березой иван-чаевый, 11.08.2018; **19.** Окрестности г. Якутск, с. Владимировка, по дороге к воинской части, 61°55'23.7"N, 129°25'09.6"E, 182 м над ур. м., сосняк бруснич-ный, 09.09.2018; **20.** Окрестности г. Якутск, Вилюйский тракт, 30 км, 62°05'67.5"N, 129°15'48.8"E, 255 м над ур. м., лиственничный лес с примесью березы лишайниково-брусничный, 22.09.2018; **21.** Окрестности г. Якутск, Вилюйский тракт, 35 км, 62°05'39.6"N, 129°12'40.7"E, 220 м над ур. м., сосняк редкостойный с примесью листвен-ницы лишайниково-толокнянковый, 22.09.2018; **22.** Намский р-н, правый берег р. Кенгкеме, 62°40'65.3"N, 129°02'31.8"E, 127 м над ур. м., ли-ственничник с березами и ивами травяно-бру-сничный, 01.06.19; **23.** Намский р-н, правый берег р. Кенгкеме, по дороге к Кюренг-Ат, 62°43'19.0"N, 129°20'64.6"E, 200 м над ур. м., лиственничник на возвышенности, 01.06.19; **24.** Вилюйский р-н, правый берег р. Вилюй, район Большого тукулана, островки с сосновым лесом посреди тукулана, 63°54'06.7"N, 123°16'57.8"E, высота 101 м над у. м., сосняк лишайниковый, 23.07.2019, собр. Л.П. Габышева; **25.** Вилюй-ский р-н, правый берег р. Вилюй, в 100 км к югу от Большого тукулана, в 5 км от трассы на пра-вой стороне, западная сторона Малого тукулана, 63°19'24.7"N, 123°42'16.0"E, высота 178 м над ур. м., лишайниковое сообщество на границе соснового леса и тукулана, 25.07.2019, собр. Л.П. Габышева.

Результаты и обсуждение

Список исследованной лишенобиоты включает 48 видов лишайников. Из числа приведенных видов новыми для Якутии являются 3 вида, в Центральной Якутии впервые найдено 13 видов лишайников.

Виды лишайников собраны в ходе комплексных экспедиционных исследований ИБПК СО РАН разных лет, а также привлечены материалы гербария лишайников SASY-L. Сборы произведены в различных растительных сообществах: лиственничных, сосновых, еловых, смешанных лесах, остепненных и эоловых сообществах.

Эколого-субстратные группы изученных видов лишенобиоты весьма разнообразны. Эпифиты (эпифлеодные) обитают на коре стволов и ветвей деревьев, кустарников: *Amandinea punctata*, *Candelariella lutella*, *Lecanora symmicta*, *Physcia tenella*, *Pseudosagedia aenea*, *Usnea lapponica*, *Usnea subfloridana*.

Особый интерес представляют эпиксилные виды лишайников, поселяющиеся на обнаженной древесине. Мертвая древесина является важной особенностью среды обитания лишайников в лесных экосистемах, но недостаточно данных о том, сколько и какие лишайники зависят от мертвой древесины. В исследованиях эпифитных лишайников Фенноскандии и Тихоокеанского северо-запада Северной Америки было показано, что 43 % изученных видов используют древесину в качестве субстрата, а 10 % облигатно связаны с мертвой древесиной. Представленные закономерности являются общими для северных хвойных экосистем [27]. Проведенный автором субстратный анализ лишенобиоты Западной Сибири (по данным Н.В. Седельниковой [28]) показал следующие соотношения: эпиксилы составляют 42 % от числа видов эпифитов, облигатные эпиксилы насчитывают 5 % соответственно. На территории Якутии лишайники-эпиксилы относятся к слабо изученной группе организмов. Приведенные в статье виды лишайников, поселяющиеся на древесине бревен, пней, валежника: *Buellia schaereri*, *Calicium abietinum*, *C. denigratum*, *C. glaucellum* Ach., *C. notarisii*, *C. trabinellum*, *Carbonicola anthracophila*, *Chaenothecopsis savonica*, *Cladonia botrytes*, *Cyphelium tigillare*, *Hertelidea botryosa*, *Hypocenomyce scalaris*, *Lecidea turgidula*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Physconia muscigena*, *Rinodina archaea*, *Rinodina olivaceobrunnea*, *Rinodina terrestris*, *Rinodina turfacea*, *Usnea glabrescens*.

Эпилитные виды осваивают каменистый субстрат: *Aspicilia desertorum*, *Gyalolechia flavovirens*, *Lecanora polytropa*, *Physconia detera*, *Protoparmeliopsis muralis*, *Xanthoparmelia tinctina*, *Xanthoria elegans*.

Эпигейные лишайники делятся на две группы [29, 30]. Эпигейды, представленные накипными и чешуйчатыми формами, обитают на поверхности почвы: *Diploschistes muscorum*, *Endocarpon pusillum*, *Phaeorrhiza sareptana*, *Psora decipiens*, *Toninia sedifolia*. Вид *Stereocaulon condensatum* найден в сообществах эоловых песков (тукуланов), представлен только первичным талломом, скрепляющим частицы песка и формирующим своеобразные «песчаные шапочки». Субэпигейды непосредственной связи с почвой не имеют, они поселяются на лесной подстилке (кустистые и листоватые формы): *Cetraria aculeata*, *Cladonia borealis*, *Cladonia verticillata*.

Эпифитореликвиты произрастают на растительных остатках, на отмерших мхах: *Caloplaca cerina*, *Rinodina terrestris*. Эпилихенофит *Rinodina olivaceobrunnea* обитает на слоевище лишайника *Peltigera leucophlebia*. Эпибриофит *Scytinium teretiusculum* поселяется на дернинках мхов.

Для каждого вида указываются сведения о местонахождении (номер описания), субстрат, номер образца в гербарии SASY-L. Приводятся данные о распространении видов лишайников в Центральной Якутии, на территории Якутии с указанием флористического района (ФР), а также распространение на смежных территориях или в целом по России [31]. Звездочкой * обозначены виды лишайников, новые для Якутии, двумя звездочками ** – новые для Центрально-Якутского флористического района. Образцы лишайников хранятся в Гербарии ИБПК СО РАН (SASY).

Amandinea punctata (Hoffm.) Coppins & Scheid. – 22, 23, на коре валежника, SASY-L 2019-06-01/1-1, SASY-L 2019-06-01/3-1. Центральная Якутия (ЦЯ): бассейн рек Синяя, Буотама [9]; тукуланы [22]. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский ФР [32]. Вид распространен на смежных территориях.

Aspicilia desertorum (Kremp.) Mereschk. – 7, на камнях, SASY-L 2008-08-07/0-1. В Якутии вид известен из степных местообитаний ЦЯ (окрестности с. Улах-Аан) [16] и среднего течения р. Индигирка [33, 34] (Яно-Индибирский ФР). Смежные территории: Красноярский край [35].

Buellia schaereri De Not. – 10, на древесине валежника, SASY-L 2011-09-17/3-6. На территории ЦЯ вид обитает в сообществах дюнных ком-

плексов (тукуланов) в среднем течении р. Вилюй [22]. Якутия: Яно-Индигоирский ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край [35], Иркутская область, Бурятия [36], Забайкальский край [37].

Calicium abietinum Pers. – 10, 19, на древесине валежника, SASY-L 2011-09-17/3-7, SASY-L 2018-09-09/6-2. ЦЯ: ресурсный резерват «Джун-кун» [14]. Якутия: Яно-Индигоирский ФР [38, 39]; Верхне-Ленский ФР [40]. Смежные территории: Красноярский край [41, 42], Иркутская область [43, 44], Бурятия [45].

Calicium denigratum (Vain.) Tibell. ** – 22, на древесине валежника, SASY-L 2019-06-01/1-2. Якутия: Верхне-Ленский ФР [40], Алданский ФР [46]. Смежные территории: Красноярский край [35], Бурятия [47, 48], Забайкальский край [37].

Calicium glaucellum Ach. – 22, на древесине валежника, SASY-L 2019-06-01/1-3. Якутия: Алданский ФР [46]. Смежные территории: Красноярский край [49], Забайкальский край [37].

Calicium notarisi (Tul.) M. Prieto & Wedin (syn. *Cyphelium notarisi* (Tul.) Blomb. & Forsell) * – 23, на древесине валежника, SASY-L 2019-06-01/3-2. Смежные территории: Иркутская область [36].

Calicium trabinellum (Ach.) Ach. – 20, на древесине валежника, SASY-L 2018-09-22/8-7. В Якутии вид ранее был найден в Арктическом [50], Яно-Индигоирском [39] и Верхне-Ленском ФР [40]. Вид распространен на смежных территориях.

Caloplaca cerina (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr. – 6, выходы камней, на растительных останках, SASY-L 2007-09-15/0-3, SASY-L 2007-09-15/0-4; 9, на древесине валежника, SASY-L 2011-09-17/2-1. В ЦЯ вид известен как лишайник тукуланов [22]. Якутия: Арктический [51, 52], Яно-Индигоирский [39] и Верхне-Ленский ФР [40]. Вид широко распространен на смежных территориях.

Candelariella lutella (Vain.) Räsänen – 8, на коре ивы, SASY-L 2008-09-15/1-1. ЦЯ: сообщества дюнных комплексов (тукуланов) [20]. Якутия: Яно-Индигоирский ФР [39]. Смежные территории: Красноярский край [42], Иркутская область, Бурятия [36, 43], Забайкальский край [37].

Carbonicola anthracophila (Nyl.) Bendiksby & Timdal (syn. *Hypocenomyce anthracophila* (Nyl.) P. James & Gotth. Schneid.) * – 23, на древесине пня, SASY-L 2019-06-01/3-3. Смежные территории: Красноярский край [42], Иркутская область [36].

Cetraria aculeata (Schreber) Fr. ** – 24, на почве, SASY-L 2019-07-23/4-1. В Якутии вид ранее

был обнаружен в Арктическом ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край, Иркутская область, Бурятия [36], Хабаровский край [53].

Chaenothecopsis savonica (Räsänen) Tibell ** – 23, на древесине пня, SASY-L 2019-06-01/3-4. Якутия: Верхне-Ленский ФР [40]. Смежные территории: Красноярский край [49, 54], Иркутская область [55].

Cladonia borealis S. Stenroos ** – 24, на почве, SASY-L 2019-07-23/4-2. Якутия: Оленекский, Яно-Индигоирский ФР [32]. Смежные территории: Иркутская область [36], Забайкальский край [37].

Cladonia botrytes (Hag.) Willd. – 18, 19, на древесине валежника, SASY-L 2018-08-11/2-6, SASY-L 2018-09-09/7-1. Якутия: вид распространен во всех флористических районах, кроме Арктического. Вид распространен на смежных территориях.

Cladonia verticillata (Hoffm.) Schaer. – 24, на почве, SASY-L 2019-07-23/4-3. Якутия: вид распространен во всех флористических районах. Вид широко распространен на смежных территориях.

Cyphelium tigillare (Ach.) Ach. – 20, на древесине пня, SASY-L 2018-09-22/8-1; 22, на древесине валежника, SASY-L 2019-06-01/1-4. ЦЯ: обитает в сообществах дюнных комплексов (тукуланов) [21, 22]. Якутия: Алданский ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край [42, 56], Иркутская область [36, 43], Забайкальский край [37].

Diploschistes muscorum (Scop.) R. Sant. – 5, на почве со скал, SASY-L 2006-08-23/23-2. В ЦЯ вид известен как лишайник тукуланов [20, 22]. Якутия: Яно-Индигоирский ФР [39]. Смежные территории: Красноярский край [35], Забайкальский край [37].

Endocarpon pusillum Hedw. – 6, выходы камней, на песчаной почве, SASY-L 2007-09-15/0-1. В ЦЯ вид был отмечен в НПП «Ленские столбы» [19]. В Якутии образцы вида найдены также в Арктическом [57] и Яно-Индигоирском ФР [3, 4, 19, 34]. Вид распространен на смежных территориях.

Gyalolechia flavovirescens (Wulfen) Søchting, Frödén & Arup (syn. *Caloplaca flavovirescens* (Wulfen) Dalla Torre & Sarnth.) – 3, на скалах, SASY-L 2002-07-15/0-4. В ЦЯ вид указывался ранее в степных комплексах окрестностей г. Якутск [16, 58]. Якутия: Яно-Индигоирский ФР [39]. Смежные территории: Красноярский край [42, 56], Иркутская область [29, 44], Бурятия [59].

Hertelidea botryosa (Fr.) Kantvilas & Printzen (syn. *Biatora botryosa* Fr., *Lecidea botryosa* (Fr.)

Th. Fr.) * – 20, на древесине бревна, SASY-L 2018-09-22/8-2. Смежные территории: Красноярский край [56], Бурятия [36].

Hypocenomyce scalaris (Ach.) M. Choisy – 10, на древесине валежника, SASY-L 2011-09-17/3-5; 13, обгоревшие пеньки, на горелой древесине, SASY-L 2017-07-09/7-1. Для ЦЯ вид упоминается как лишайник тукуланов [22]. В Якутии распространен также в Яно-Индибирском [39] и Верхне-Ленском ФР [40]. Вид распространен на смежных территориях.

Lecanora polytropa (Hoffm.) Rabenh. – 3, выходы скал, на скалах, SASY-L 2002-07-15/0-8. В ЦЯ вид ранее указывался для бассейна р. Синяя [9]. В Якутии распространен во всех флористических районах. Вид также широко распространен на смежных территориях.

Lecanora symmicta (Ach.) Ach. – 2, на коре березы, SASY-L 2002-07-09/0-2. В ЦЯ ранее вид был найден в бассейне р. Синяя [9], бассейн р. Виллой [10, 20], ресурсный резерват «Джун-кун» [14]. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский, Верхне-Ленский ФР. Распространенный вид на смежных территориях.

Lecidea turgidula Fr. ** – 21, на древесине, SASY-L 2018-09-22/9-1. В Якутии вид имеет распространение в Арктическом, Яно-Индибирском ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край [35, 56], Бурятия [36].

Nephroma isidiosum (Nyl.) Gyelnik ** – 4, на почве со скал, SASY-L 2006-08-16/12-4. Вид был известен из Южной Якутии [60]. Смежные территории: Иркутская область, Бурятия [36], Забайкальский край [37].

Phaeophyscia sciastra (Ach.) Moberg ** – 13, на валежнике, горелой древесине, моховой дернине, SASY-L 2017-07-09/7-11. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский ФР [32]. Вид распространен на смежных территориях.

Phaeorrhiza sareptana (Tomin) H. Mayrhofer & Poelt var. *sphaerocarpa* (Th.Fr.) H. Mayrhofer & Poelt – 12, на почве среди выходов камней, SASY-L 2017-07-07/3-2. В ЦЯ для подвида известно 2 точки (НПП «Ленские столбы») [19]. В Якутии: Яно-Индибирский ФР [19, 34]. Смежные территории: Красноярский край [56], Иркутская область [29, 36]. Россия: подвид распространен в Калмыкии, Сибири.

Physcia adscendens H. Olivier – 13, обгоревшие пеньки, на горелой древесине, SASY-L 2017-07-09/7-9. Ранее вид указывался для ЦЯ; распространен также в Арктическом, Яно-Ин-

дигирском ФР [32]. Распространенный вид на смежных территориях.

Physcia tenella (Scop.) DC. – 9, на ветках лиственницы, SASY-L 2011-09-17/2-2; 13, на отмерших ветках можжевельника, SASY-L 2017-07-09/7-2. Ранее вид указывался для ЦЯ [32]. Якутия: Яно-Индибирский [39], Верхне-Ленский [40], Алданский ФР [60]. Вид распространен на смежных территориях.

Physconia detersa (Nyl.) Poelt – 11, на камнях, SASY-L 2017-07-07/1-3. В ЦЯ вид ранее был найден в бассейне р. Синяя [9]. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский [32], Верхне-Ленский [40], Алданский ФР [60]. Широко распространен на смежных территориях.

Physconia muscigena (Ach.) Poelt – 13, на валежнике, горелой древесине, SASY-L 2017-07-09/7-3; 15, выходы скал, на замшелых камнях, 2017-07-10/9-9. Вид распространен в Арктическом, Яно-Индибирском, Центрально-Якутском, Алданском ФР [32]. Широко распространен на смежных территориях.

Protoparmeliopsis muralis (Schreb.) M. Choisy (syn. *Lecanora muralis* (Schreb.) Rabenh., *Placolecnora muralis* (Schreb.) Räsänen) – 14, на камнях, SASY-L 2017-07-09/8-7. В ЦЯ вид известен из степных местообитаний [16]. Якутия: Яно-Индибирский [33], Верхне-Ленский ФР [40]. Смежные территории: Красноярский край [35], Забайкальский край [37].

Pseudosagedia aenea (Körb.) Hafellner & Kalb (syn. *Porina aenea* (Körb.) Zahlbr.) ** – 20, на коре лиственницы, SASY-L 2018-09-22/8-5. В Якутии вид известен из Яно-Индибирского ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край [49], Бурятия [61], Приморский край [53].

Psora decipiens (Hedw.) Hoffm. – 12, на почве среди выходов камней, SASY-L 2017-07-07/3-3; 14, остепненный склон, на почве, SASY-L 2017-07-09/8-3. В ЦЯ вид указывался ранее в окрестностях г. Якутск [16, 58], НПП «Ленские столбы» [19], бассейне р. Амга [3]. Якутия: Арктический, Яно-Индибирский, Верхне-Ленский ФР. Широко распространен на смежных территориях.

Ramalina dilacerata (Hoffm.) Hoffm. – 13, на валежнике, SASY-L 2017-07-09/7-4. Ранее вид упоминался для ЦЯ [14, 20]. Якутия: Верхне-Ленский ФР [40, 62]. Широко распространен на смежных территориях.

Rinodina archaea (Ach.) Arnold – 20, древесина бревна, SASY-L 2018-09-22/8-6. Вид распространен в Центрально-Якутском, Арктическом, Яно-

Индигирском, Верхне-Ленском ФР [32]. Вид распространен на смежных территориях.

Rinodina olivaceobrunnea C.W. Dodge & G. E. Baker – 17, на древесине пня, SASY-L 2017-08-26/1-3; 22, на слоевище *Peltigera leucophlebia* (Nyl.) Gyeln., SASY-L 2019-06-01/1-7. На территории ЦЯ вид обитает в сообществах дюнных комплексов (тукуланов) в среднем течении р. Вилюй [22]. Вид известен также из Арктического ФР [63]. Смежные территории: Красноярский край [56], Забайкальский край [37], Хабаровский край [64].

Rinodina terrestris Tomin – 23, остепненный склон, растительные остатки, древесина, SASY-L 2019-06-01/3-5. Вид известен из Яно-Индигирского ФР [32]. Смежные территории: Красноярский край [49], Забайкальский край [37].

Rinodina turfacea (Wahlenb.) Körb. var. *ecrustacea* (Vain.) H. Olivier** – 22, древесина валежника, SASY-L 2019-06-01/1-6. Якутия: Арктический, Яно-Индигирский ФР [32]. Широко распространен на смежных территориях.

Scytinium teretiusculum (Wallr.) Otálora, P. M. Jørg. & Wedin ** – 4, на мхах на поверхности скал, SASY-L 2006-08-16/12-1. Якутия: Алданский ФР [65]. Смежные территории: Бурятия [48], Хабаровский край [64].

Stereocaulon condensatum Hoffm. – 25, на песке, SASY-L 2019-07-25/11-1. Вид известен из ЦЯ, а также в Арктическом, Яно-Индигирском, Алданском ФР [32]. Широко распространенный на смежных территориях.

Toninia sedifolia (Scop.) Timdal – 15, на почве, SASY-L 2017-07-09/8-4. В ЦЯ вид указывался ранее в Лено-Амгинском междуречье [58], НПП «Ленские столбы» [19]. Якутия: Арктический, Яно-Индигирский [32]. Распространен на смежных территориях.

Usnea glabrescens (Nyl. ex Vain.) Vain. – 13, на древесине обгоревших пеньков, SASY-L 2017-07-09/7-5. В ЦЯ вид известен в бассейне р. Дянышка [67], ресурсный резерват «Джункун» [14]. Якутия: Верхне-Ленский ФР [40, 63] и Алданский ФР [60, 66]. Распространен на смежных территориях.

Usnea lapponica Vain. – 10, на древесине валежника, ветвях сосны, SASY-L 2011-09-17/3-8. В ЦЯ вид известен в бассейне р. Дянышка (Кобяйский р-н), Улахан-Ботубуйя (Мирнинский р-н) [66]. Якутия: Оленекский, Яно-Индигирский, Верхне-Ленский, Алданский ФР. Распространен на смежных территориях.

Usnea subfloridana Stirt. – 13, на ветках лиственницы, SASY-L 2017-07-09/7-6. В ЦЯ вид известен в бассейне р. Бырандыя (Верхоянье), НПП «Ленские Столбы» [66]. Якутия: Яно-Индигирский, Верхне-Ленский, Алданский ФР. Широко распространенный вид на смежных территориях.

Xanthoparmelia tinctoria (Maheu & Gillet) Hale – 3, выходы скал, на скалах, SASY-L 2002-07-15/0-2; 4, на скалах, SASY-L 2006-08-16/12-2. Вид известен в ЦЯ, а также в Верхне-Ленском ФР. Смежные территории: Иркутская область, Бурятия [36], Забайкальский край [37], Амурская область [36].

Xanthoria elegans (Link) Th. Fr. (syn. *Rusavskia elegans* (Link) S.Y.Kondr. & Kärnefelt) – 1, на скалах, SASY-L 2000-07-04/2-3; 15, на камнях, SASY-L 2017-07-10/9-4. Для ЦЯ вид указывался ранее в Лено-Амгинском междуречье [16]. Якутия: Арктический, Верхне-Ленский, Алданский ФР [32]. Вид широко распространен на смежных территориях.

Выводы

1. В статье представлены результаты исследований автором лишайной биоты Центральной Якутии в ходе комплексных экспедиций ИБПК СО РАН разных лет, а также привлечены материалы гербария лишайников SASY-L.

2. Сборы лишайников произведены в различных растительных сообществах: лиственничных, сосновых, еловых, смешанных лесах; остепненных и эоловых сообществах.

3. Список изученной лишайной биоты насчитывает 48 видов лишайников. Новыми для Якутии являются 3 вида лишайников (*Calicium notarisii*, *Carbonicola anthracophila*, *Hertelidea botryosa*), в Центральной Якутии впервые найдено 13 видов (*Calicium denigratum*, *Cetraria aculeata*, *Chaenothecopsis savonica*, *Cladonia borealis*, *Lecidea turgidula*, *Nephroma isidiosum*, *Phaeophyscia sciatra*, *Pseudosagedia aenea*, *Rinodina turfacea*, *Scytinium teretiusculum*).

4. Для видов *Buellia schaeereri*, *Calicium abietinum*, *Caloplaca cerina*, *Candelariella lutella*, *Cyphelium tigillare*, *Diploschistes muscorum*, *Endocarpon pusillum*, *Hypocenomyce scalaris*, *Lecanora polytropia*, *Nephroma isidiosum*, *Rinodina olivaceobrunnea* было известно единичное местонахождение в Центральной Якутии.

5. Редкими в Якутии и на смежных территориях являются *Aspicilia desertorum*, *Calicium glaucellum*, *Calicium notarisii*, *Carbonicola an-*

thracophila, *Chaenothecopsis savonica*, *Hertelidea botryosa*, *Protoparmeliopsis muralis*, *Pseudosagedia aenea*, *Scytinium teretiusculum*. Подвид *Phaeorrhiza sareptana* var. *sphaerocarpa* распространен в Калмыкии и Сибири.

6. Эколого-субстратные группы изученных видов лишенобиоты представлены разнообразно (эпифиты, эпиксилы, эпилиты, эпигеиды, суб-эпигеиды, эпифитореликвиты, эпилихенофиты, эпибриофиты).

7. На территории Якутии лишайники-эпиксилы относятся к слабо изученной группе организмов. Виды лишайников данной группы поселяются на древесине бревен, пней, валежника; преобладают накипные формы.

Заключение

Приведенные в статье виды лишайников дополняют данные о лишенобиоте Центральной Якутии, особенно накипных эпиксильных видов; лишайников остепненных сообществ. Список лишайников Центральной Якутии пополнился 13 новыми видами; для Якутии найдено 3 новых вида лишенобиоты. Редкими в Якутии и на смежных территориях являются 10 видов лишайников.

Проведение дальнейших лишенологических исследований в Центральной Якутии и на близлежащих территориях позволит выявить новые виды лишайников, а также дополнить сведения по распространению видов лишенобиоты Сибири. Представляется особенно перспективным изучение накипных лишайников, поселяющихся на древесине, почве, песчаном субстрате, коре деревьев и кустарников, как хвойных, так и лиственных пород.

Литература

1. Кузнецова Л.В. Флористическое районирование // Разнообразие растительного мира Якутии / В.И. Захарова и др.; отв. ред. Н.С. Данилова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 26–30.
2. Захарова В. И. Разнообразие сосудистых растений Центральной Якутии. Новосибирск: Наука, 2014. 180 с.
3. Окснер А.М. Лишайники басейну рік Індігріки, Яни, Лени і Південного Прибайкалля. I // Журн. Інституту ботаніки АН УРСР. 1939. № 23 (31). С. 117–139.
4. Окснер А.М. Лишайники басейну рік Індігріки, Яни, Лени і Південного Прибайкалля. II–IV // Бот. журн. АН УРСР. 1940. Т. 1, № 1. С. 77–100; № 2. С. 313–324; № 3–4. С. 31–57.
5. Караваев М.Н. Фрагменты реликтовых степей с *Helictotrichon krylovii* (N. Pavl.) Henrard в Якутии // Ботан. журн. 1958. Т. 43, № 4. С. 481–489.
6. Караваев М.Н. О составе синузий напочвенных лишайников в реликтовых степных сообществах Якутии // Ботан. журн. 1976. Т. 61, № 7. С. 956–960.
7. Кильдюшевский И. Д. К флоре верховьев Вилюя // Леса Южной Якутии. Наука. М., 1964. С. 174–177.
8. Рыкова Ю.В. Лихенофлора хвойных лесов Центральной Якутии // Эколого-биолог. основы лесоводственных мер в Якутии: сб. науч. трудов. Якутск, 1987. С. 67–74.
9. Порядина Л.Н. Лишайники бассейнов рек Сияня и Буотама // Национальный природный парк «Ленские Столбы»: геология, почвы, растительность, животный мир, охрана и использование: сб. науч. трудов. 2001. С. 65–68.
10. Порядина Л.Н. Лишайники НПП «Усть-Вилюйский» (Центральная Якутия) // Сиб. экол. журн. 2003. № 4. С. 513–516.
11. Порядина Л.Н. Лишайники бассейна реки Ляписке (Центральная Якутия) // Проблемы ботанических и лесоводственных исследований в РС (Я) и Финляндии: Материалы международной Саха-Финляндской конференции, посвященной 100-летию экспедиции А. Каяндера по р. Лене. Якутск, 2003. С. 45–48.
12. Порядина Л.Н. Флора лишайников Центрально-Якутского флористического района // Материалы III Международной научной конференции «Проблемы изучения растительного покрова Сибири». Томск, 2005. С. 184–185.
13. Порядина Л.Н. Биоразнообразие лишайников антропогенных ландшафтов Центральной Якутии // Наука и образование. 2007. № 2(46). С. 5–10.
14. Порядина Л.Н. Лихенофлора ресурсного резервата «Джункун» // XII Съезд РБО. Петрозаводск, 2008. С. 215–218.
15. Захарова В.И., Сосина Н.К., Софронов Р.Р., Иванова Е.И., Порядина Л.Н. Мониторинговые исследования степей долины Туймада (Центральная Якутия) // Проблемы рег. экол. 2009. № 4. С. 163–168.
16. Порядина Л.Н. Лишайники степных экосистем Центральной Якутии // Наука и образование. 2010. № 2(58). С. 58–63.
17. Poryadina L.N. Lichen-indicative research in Central Yakutia (Russia) // The application of technologies for the conservation of nature in Cold Regions: Materials of The IX International Symposium on Cold Regions Development, 2010. P. 104.
18. Порядина Л.Н. Лишайники эоловых образований Центральной Якутии // Сб. материалов IX Международной НПК «Наука и современность – 2011». Новосибирск, 2011. С. 27–30.
19. Журбенко М.П. Новые и редкие виды лишайников (LICHENES) из Республики Саха-Якутия и Магаданской области // Ботан. журн. 2003. Т. 88, № 1. С. 111–118.

20. Галанина И.А. Лихенобиота Вилуйских тукуланов (Якутия) // Материалы Межд. микол. форума. Москва, 2015. Т. 4. С. 336–337.
21. Галанина И.А. Невидимая жизнь в песках тукуланов (Центральная Якутия) // Наука и техника. 2016. № 1(30). С. 27–34.
22. Галанина И.А. Дополнение к лихенобиоте дюнных комплексов (тукуланов) Центральной Якутии // Ботан. журн. 2016. Т. 101, № 12. С. 1486–1497.
23. Галактионова Т.Ф., Добрецова Л.А., Пермькова А.А., Усанова В.М. Растительность бассейна р. Вилюя // Труды Ин-та биологии ЯФ СО АН СССР. Вып. VIII. М.; Л., 1962. 136 с.
24. Степанчикова И.С., Гагарина Л.В. Сбор, определение и хранение лихенологических коллекций // Флора лишайников России. Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников / Отв. ред. М.П. Андреев, Д.Е. Гимельбрант. М.; СПб.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. С. 204–219.
25. Index Fungorum // <http://www.indexfungorum.org>.
26. Mycobank // <http://www.mycobank.org>.
27. Spribille T., Bunnell F.L., Thor G., Goward T., Björk C.R. Lichens on dead wood: species-substrate relationships in the epiphytic lichen floras of the Pacific Northwest and Fennoscandia // Ecography. 2008. Vol. 31. P. 741–750, 2008. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2008.05503.x.
28. Седельникова Н.В. Видовое разнообразие лихенобиоты Западной Сибири и оценка участия видов лишайников в основных ее горных и равнинных фитоценозах. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2017. 611 с.
29. Макрый Т.В. Лишайники Байкальского хребта. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 200 с.
30. Лиштва А.В. Лихенология: учеб.-метод. пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2007. 121 с.
31. Список лихенофлоры России / Сост. Г. П. Урбанавичюс. СПб., 2010. 194 с.
32. Порядина Л.Н. Лишайники // Разнообразие растительного мира Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. С. 126–150.
33. Афонина О.М., Бредкина Л.И., Макарова И.И. Мхи и лишайники лесостепного ландшафта в среднем течении р. Индигирки // Новости систем. низш. раст. 1979. Т. XVI. С. 175–186.
34. Афонина О.М., Бредкина Л.И., Макарова И.И. Распределение лишайников и мхов в лесостепных ландшафтах в среднем течении р. Индигирки // Ботан. журн. 1980. Т. 65, № 1. С. 66–82.
35. Жданов И.С. Первые сведения о лихенофлоре Центральносибирского биосферного заповедника // Новости систем. низш. раст. 2010. Т. 44. С. 153–170.
36. Урбанавичюс Г.П., Урбанавичене И.Н. Лишайники // Современное состояние биологического разнообразия на заповедных территориях России. Вып. 3. Лишайники и мохообразные. М., 2004. С. 5–236.
37. Чесноков С.В. Лишайники хребта Кодар (Становое нагорье): Дисс. на соискание ученой степени канд. биол. наук. СПб. 2017, 294 с.
38. Порядина Л.Н. Новые и редкие виды лишайников для флоры Азии // Новости систем. низш. раст. 1998. Т. 32. С. 76–81.
39. Порядина Л.Н. Лишайники заказника «Сунтар-Хаята» (Якутия) // Новости систем. низш. раст. 2001. Т. 34. С. 167–176.
40. Вершинина С.Э., Гимельбрант Д.Е., Кузнецова Е.С., Габышев Э.М., Габышева Л.М. Дополнение к лихенофлоре государственного заповедника «Олекминский» (Республика Саха (Якутия) // Труды Государственного природного заповедника «Олекминский». Вып. 1. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2015. С. 90–107.
41. Титов А.Н. Порошкоплодные лишайники северо-запада плато Путорана // Новости систем. низш. раст. 1984. Т. 21. С. 179–183.
42. Жданов И.С. Дополнения к лихенофлоре Центральносибирского биосферного заповедника (Красноярский край) // Новости систем. низш. раст. 2013. Т. 47. С. 200–214.
43. Лиштва А.В. Эпифитные лишайники Витимского заповедника // Проблемы экологии, биоразнообразия и охраны природных экосистем Прибайкалья. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2000. С. 185–195.
44. Макрый Т.В., Лиштва А.В. Лишайники // Биота Витимского заповедника: флора. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2005. С. 115–175.
45. Титов А.Н. Порошкоплодные лишайники Баргузинского и Байкальского заповедников // Новости систем. низш. раст. 1985. Т. 22. С. 191–196.
46. Чесноков С.В., Конорева Л.А., Порядина Л.Н., Кузнецова Е.С., Гимельбрант Д.Е., Катаева О.А., Андреев М.П. Новые и интересные находки лишайников для Республики Саха (Якутия) // Вестн. ТвГУ. Сер.: Биология и экология. 2015. № 4. С. 174–185.
47. Урбанавичене И.Н., Урбанавичюс Г.П. Лишайники Байкальского заповедника (аннотированный список видов) // Флора и фауна заповедников. Вып. 68. М., 1998. 55 с.
48. Харпугаева Т.М. Лишайники Джергинского государственного заповедника. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2010. 145 с.
49. Седельникова Н.В. Видовое разнообразие лихенобиоты Алтае-Саянского экорегиона // Растительный мир Азиатской России. 2013. № 2(12). С. 12–54.
50. Макарова И.И. К флоре лишайников низовьев реки Лены // Новости систем. низш. раст. 1989. Т. 26. С. 118–124.
51. Макарова И.И. Дополнение к лихенофлоре Усть-Ленского заповедника // Новости систем. низш. раст. 1998. Т. 32. С. 52–55.
52. Андреев М.П. Систематический состав лихенофлоры Анюйского нагорья // Новости систем. низш. раст. 1984. Т. 21. С. 137–140.

53. Чабаненко С.И. 2002. Конспект флоры лишайников юга российского Дальнего Востока. Владивосток, 2002. 231 с.
54. Zhdanov I. New and rare lichen records from the Central Siberian Biosphere Reserve (Krasnoyarsk Krai, Russia). II // *Folia Cryptog. Estonica*, Fasc. 2012. Vol. 49. P. 83–87.
55. Воронюк С.Э., Макрый Т.В. Калициевые лишайники лесов Восточного Присаянья // *Новости систем. низш. раст.* 2002. Т. 36. С. 89–94.
56. Журбенко М.П. Лишайники и лихенофильные грибы Путоранского заповедника (аннотированный список видов) // *Флора и фауна заповедников*. Вып. 89. М., 2000. 55 с.
57. Макарова И.И. Лишайники карбонатных местобитаний Усть-Ленского заповедника // *Новости систем. низш. раст.* 1996. Т. 31. С. 126–130.
58. Караваев М.Н. О составе синузий напочвенных лишайников в реликтовых степных сообществах Якутии // *Ботан. журн.* 1976. Т. 61, № 7. С. 956–960.
59. Будаева С.Э. Аннотированный список лишайников республики Бурятия: монография. Улан-Удэ: изд-во БГСХА им. В.Р.Филиппова, 2012. 182 с.
60. Фесько Н.Н. Материалы к флоре лишайников Токинского Становика. Якутск, 1990. 9 с. Рукопись деп. в ВИНТИ, № 2044 В90 Деп.
61. Урбанавичене И.Н., Урбанавичюс Г.П. Дополнения к флоре лишайников хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // *Новости систем. низш. раст.* 2001. Т. 35. С. 205–208.
62. Порядина Л.Н. Список лишайников р. Пилка и нижнего течения р. Витим // *Сборник научных трудов «Почвы, растительный и животный мир Юго-Западной Якутии»*. Новосибирск, 2006. С. 97–102.
63. Самарский М.А., Соколова М.В., Журбенко М.П., Афонина О.М. О флоре и растительности острова Жохова (Новосибирские острова) // *Ботан. журн.* 1997. Т. 82, № 4. С. 62–70.
64. Великанов А.В., Скирина И.Ф. Лишайники Ланжинских гор (северное побережье Охотского моря) // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2012. № 2. С. 68–77.
65. Чесноков С.В., Конорева Л.А., Порядина Л.Н., Пауков А.Г., Кузнецова Е.С., Андреев М.П., Гагарина Л.В. Новые и интересные находки лишайников для Республики Саха (Якутия). III // *Новости систем. низш. раст.* 2017. Т. 51. С. 220–231.
66. Gagarina, L.V. Poryadina L.N., Chesnokov S.V., Konoreva L.A. The lichen genus *Usnea* Dill. ex Adans. in the Sakha Republic (Yakutia) // *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation*. 2017. 6(1): 31–36 DOI: 10.17581/bp.2017.06107.

Поступила в редакцию 14.01.2020

Принята к публикации 14.05.2020

Об авторе

ПОРЯДИНА Лена Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, 677980, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6445-4269>, Researcher ID: S-9860-2018 e-mail: poryadina-lena@rambler.ru.

Информация для цитирования

Порядина Л.Н. Материалы к лихенобиоте Центральной Якутии // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25, № 3. С. 97–109. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-9>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-9

Materials on the lichenbiota of Central Yakutia

L.N. Poryadina

Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
poryadina-lena@rambler.ru

Abstract. Central Yakutia is located in the middle reach of the Lena river. Plain terrain and low absolute altitudes are typical for the entire territory. The climate of the district is sharply continental, the district is located in the area of cryolithozone. Central Yakutia is characterized by larch (*Larix cajanderi* Mayr) and pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. Spruce forests (*Picea obovata* Ledeb.) are confined to the river valleys and

alases. Birch (Betula platyphylla Sukacz.) outliers with abundant motley grass occur in the meadow-forest-steppe areas. The fragments of steppe areas are represented by meadow and cereal or cereal-sagebrush steppes. Lichenobiota of Central Yakutia has been studied since the 40-es of the past century, and currently contains 273 species from 90 genera of the Division of marsupial lichens (Ascomycota). The article provides a list of 48 species of lichens found in the course of complex expeditionary research carried out by IBPC SB RAS in different years. The lichen species presented in the article supplement the data on lichenobiota of Central Yakutia, especially scale epixylic and epiphytic species; lichens of steppified communities. The list of lichens of Central Yakutia was replenished with 13 new species, 3 found lichenobiota species were new for Yakutia (Calicium notarisii, Carbonicola anthracophila, Hertelidea botryosa). 10 lichen species are rare in Yakutia and adjacent territories.

Key words: lichens, floristic area, distribution, Central Yakutia, herbarium of lichens SASY-L.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of state assignment of Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS for 2017-2021 AAA-A17-117020110056-0 «Fundamental and applied aspects of the study of plant diversity of Northern and Central Yakutia».

References

1. Kuznecova L.V. Floristicheskoe rajonirovanie // Raznoobrazie rastitel'nogo mira YAKUTII / V.I. Zaharova i dr.; otv. red. N.S. Danilova. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2005. P. 26–30.
2. Zaharova V.I. Raznoobrazie sosudistyh rastenij Central'noj Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2014. P. 3–24.
3. Oksner A.M. Lishajniki basejnu rik Indigirki, Yani, Leni i Pivdennogo Pribajkallya. I // Zhurn. Institutu botaniki AN URSS. 1939. No. 23 (31). P. 117–139.
4. Oksner A.M. Lishajniki basejnu rik Indigirki, Yani, Leni i Pivdennogo Pribajkallya. II-IV // Bot. zhurn. AN URSS. 1940. Vol. 1, No. 1. P. 77–100; No. 2. P. 313–324; No. 3-4. P. 31–57.
5. Karavaev M.N. Fragmenty reliktovyh stepej s Helictotrichon krylovii (N.Pavl.) Henrard v Yakutii // Botan. zhurn. 1958. Vol. 43, No. 4. P. 481–489.
6. Karavaev M.N. O sostave sinuzij napochvennyh lishajnikov v reliktovyh stepnyh soobshchestvah Yakutii // Botan. zhurn. 1976. Vol. 61, No. 7. P. 956–960.
7. Kil'dyushevskij I.D. K flore verhov'ev Vilyuya // Lesa Yuzhnoj Yakutii. M.: Nauka. 1964. P. 174–177.
8. Rykova Yu. V. Lihenoflora hvoynyh lesov Central'noj Yakutii // Ekologo-biolog. osnovy lesovodstvennyh mer v Yakutii: sb. nauch. trudov. Yakutsk, 1987. P. 67–74.
9. Poryadina L.N. Lishajniki bassejnov rek Sinyaya i Buotama // Nacional'nyj prirodnyj park «Lenskij Stolby»: geologiya, pochvy, rastitel'nost', zhivotnyj mir, ohrana i ispol'zovanie: sb. nauch. trudov. 2001. P. 65–68.
10. Poryadina L.N. Lishajniki NPP «Ust'-Vilyujskij» (Central'naya Yakutiya) // Sib. ekol. zhurn. 2003. No. 4. P. 513–516.
11. Poryadina L.N. Lishajniki bassejna reki Lyapiske (Central'naya Yakutiya) // Problemy botanicheskij i lesovodstvennyh issledovanij v RS (YA) i Finlyandii: Materialy mezhdunarodnoj Saha-Finlyandskoj konferencii, posvyashchennoj 100-letiju ekspedicii A. Kayandera po r. Lene. Yakutsk, 2003. P. 45–48.
12. Poryadina L.N. Flora lishajnikov Central'no-Yakutskogo floristicheskogo rajona // Materialy III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Problemy izucheniya rastitel'nogo pokrova Sibiri». Tomsk, 2005. P. 184–185.
13. Poryadina L.N. Bioraznoobrazie lishajnikov antropogennyh landshaftov Central'noj Yakutii // Nauka i obrazovanie. 2007. No. 2(46). P. 5–10.
14. Poryadina L.N. Lihenoflora resursnogo rezervata «Dzhunkun» // XII S'ezd RBO. Petrozavodsk, 2008. P. 215–218.
15. Zaharova V.I., Sosina N.K., Sofronov R.R., Ivanova E.I. Poryadina L.N. Monitoringovyje issledovaniya stepej doliny Tujmada (Central'naya Yakutiya) // Problemy reg. ekol. 2009. No. 4. P. 163–168.
16. Poryadina L.N. Lishajniki stepnyh ekosistem Central'noj Yakutii // Nauka i obrazovanie. 2010. No. 2(58). P. 58–63.
17. Poryadina L.N. Lichen-indicative research in Central Yakutia (Russia) // The application of technologies for the conservation of nature in Cold Regions: Materials of The IX International Symposium on Cold Regions Development, 2010. P. 104.
18. Poryadina L.N. Lishajniki eolovyyh obrazovanij Central'noj Yakutii // Sb. materialov IX Mezhdunarodnoj NPK «Nauka i sovremennost' – 2011», Novosibirsk, 2011. P. 27–30.
19. Zhurbenko M.P. Novye i redkie vidy lishajnikov (LICHENES) iz Respubliki Saha-Yakutiya i Magadanskoj oblasti // Botan. zhurn. 2003. Vol. 88, No. 1. P. 111–118.
20. Galanina I.A. Lichenobiota Vilyujskijh tukulanov (Yakutiya) // Materialy Mezhd. mikol. foruma. Moskva. 2015. Vol. 4. P. 336–337.
21. Galanina I.A. Nevidimaya zhizn' v peskah tukulanov (Central'naya Yakutiya) // Nauka i tekhnika. No. 1(30) 2016. P. 27–34.
22. Galanina I.A. Dopolnenie k lihenobiote dyunnyh kompleksov (tukulanov) Central'noj Yakutii // Botan. zhurn. 2016. Vol. 101, No. 12. P. 1486–1497.
23. Galaktionova T.F., Dobrecova L.A., Permyakova A.A., Usanova V.M. Rastitel'nost' bassejna r. Vilyuya // Trudy In-ta biologii YAF SO AN SSSR. Vyp. VIII. M.; L., 1962. 136 p.

24. *Stepanchikova I.S., Gagarina L.V.* Sbor, opredelenie i hranenie lihenologicheskikh kollekcij // Flora lishajnikov Rossii. Biologiya, ekologiya, raznoobrazie, rasprostranenie i metody izucheniya lishajnikov / Otv. red. M.P. Andreev, D.E. Gimel'brant. M.; SPb.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. P. 204–219.
25. *Index Fungorum* // <http://www.indexfungorum.org>.
26. *Mycobank* // <http://www.mycobank.org>.
27. *Spribille T., Bunnell F.L., Thor G., Goward T., Björk C.R.* Lichens on dead wood: species-substrate relationships in the epiphytic lichen floras of the Pacific Northwest and Fennoscandia // *Ecography*. 2008. Vol. 31. P. 741–750, 2008. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2008.05503.x.
28. *Sedel'nikova N.V.* Vidovoe raznoobrazie lihenobioty Zapadnoj Sibiri i ocenka uchastiya vidov lishajnikov v osnovnykh eyo gornyykh i ravninnyykh fitocenozakh. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo «Geo», 2017. 611 p.
29. *Makryj T.V.* Lishajniki Bajkal'skogo hrebta. Novosibirsk: Nauka. Sib.otd-nie, 1990. 200 p.
30. *Lishtva A.V.* Lichenologiya: ucheb.-metod. posobie. Irkutsk: Izd-vo Irkut. gos. un-ta, 2007. 121 p.
31. *Spisok lihenoflory Rossii* / Sost. G.P. Urbanavichyus. SPb., 2010. 194 p.
32. *Poryadina L.N.* Lishajniki // Raznoobrazie rastitel'nogo mira Yakutii. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2005. P. 126–150.
33. *Afonina O.M., Bredkina L.I., Makarova I.I.* Mhi i lishajniki lesostepnogo landshafta v srednem techenii r. Indigirki // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1979. Vol. XVI. P. 175–186.
34. *Afonina O.M., Bredkina L.I., Makarova I.I.* Raspredelenie lishajnikov i mhov v lesostepnykh landshaftakh v srednem techenii r. Indigirki // *Botan. zhurn.* 1980. Vol. 65, No. 1. P. 66–82.
35. *Zhdanov I.S.* Pervye svedeniya o lihenoflore Central'nosibirskogo biosfernogo zapovednika // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2010. Vol. 44. P. 153–170.
36. *Urbanavichyus G.P., Urbanavichene I.N.* Lishajniki / *Sovremennoe sostoyanie biologicheskogo raznoobraziya na zapovednykh territoriyakh Rossii*. Vyp. 3. Lishajniki i mohoobraznye. M., 2004. P. 5–236.
37. *Chesnokov S.V.* Lishajniki hrebta Kodar (Stanovoe nagor'e): Dissert. na soiskanie uchyonoy stepeni kand. biol. nauk. SPb., 2017. 294 p.
38. *Poryadina L.N.* Novye i redkie vidy lishajnikov dlya flory Azii // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1998. Vol. 32. P. 76–81.
39. *Poryadina L.N.* Lishajniki zakaznika «Suntar-Hayata» (Yakutiya) // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2001. Vol. 34. P. 167–176.
40. *Vershinina S.E., Gimel'brant D.E., Kuznecova E.C., Gabyshev E.M., Gabysheva L.M.* Dopolnenie k lihenoflore gosudarstvennogo zapovednika «Olyokminskij» (Respublika Saha (Yakutiya)) // *Trudy Gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Olyokminskij»*. Vyp. 1. Yakutsk: Izdatel'skiy dom SVFU, 2015. P. 90–107.
41. *Titov A.N.* Poroshkoplodnye lishajniki severo-zapada plato Putorana // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1984. Vol. 21. P. 179–183.
42. *Zhdanov I.S.* Dopolneniya k lihenoflore Central'nosibirskogo biosfernogo zapovednika (Krasnoyarskiy kraj) // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2013. Vol. 47. P. 200–214.
43. *Lishtva A.V.* Epifitnye lishajniki Vitimskogo zapovednika // *Problemy ekologii, bioraznoobraziya i ohrany prirodnykh ekosistem Pribajkal'ya*. Irkutsk: Izd-vo Irkut. un-ta, 2000. P. 185–195.
44. *Makryj T.V., Lishtva A.V.* Lishajniki // *Biota Vitimskogo zapovednika: flora*. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo», 2005. P. 115–175.
45. *Titov A.N.* Poroshkoplodnye lishajniki Barguzinskogo i Bajkal'skogo zapovednikov // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1985. Vol. 22. P. 191–196.
46. *Chesnokov S.V., Konoreva L.A., Poryadina L.N., Kuznecova E.S., Gimel'brant D.E., Kataeva O.A., Andreev M.P.* Novye i interesnye nahodki lishajnikov dlya Respubliki Saha (Yakutiya) // *Vestn. TvGU. Ser.: Biologiya i ekologiya*. 2015. No. 4. P. 174–185.
47. *Urbanavichene I.N., Urbanavichyus G.P.* Lishajniki Bajkal'skogo zapovednika (annotirovannyj spisok vidov) // *Flora i fauna zapovednikov*. Vyp. 68. M., 1998. 55 p.
48. *Harpuhaeva T.M.* Lishajniki Dzherginskogo gosudarstvennogo zapovednika. Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2010. 145 p.
49. *Sedel'nikova N.V.* Vidovoe raznoobrazie lihenobioty Altae-Sayanskogo ekoregiona // *Rastitel'nyj mir Aziatskoj Rossii*. 2013. No. 2(12). P. 12–54.
50. *Makarova I.I.* K flore lishajnikov nizov'ev reki Leny // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1989. Vol. 26. P. 118–124.
51. *Makarova I.I.* Dopolnenie k lihenoflore Ust'-Lenskogo zapovednika // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1998. Vol. 32. P. 52–55.
52. *Andreev M.P.* Sistemicheskij sostav lihenoflory Anyujskogo nagor'ya // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1984. Vol. 21. P. 137–140.
53. *Chabanenko S.I.* Konspekt flory lishajnikov yuga rossijskogo Dal'nego Vostoka. Vladivostok, 2002. 231 p.
54. *Zhdanov I.* New and rare lichen records from the Central Siberian Biosphere Reserve (Krasnoyarsk Krai, Russia). II // *Folia Cryptog. Estonica, Fasc.* 2012. Vol. 49. P. 83–87.
55. *Voronyuk S.E., Makryj T.V.* Kalicievyje lishajniki lesov Vostochnogo Prisan'ya // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2002. Vol. 36. P. 89–94.
56. *Zhurbenko M.P.* Lishajniki i lihenofil'nye griby Putoranskogo zapovednika annotirovannyj spisok vidov // *Flora i fauna zapovednikov*. Vyp. 89. M., 2000. 55 p.
57. *Makarova I.I.* Lishajniki karbonatnykh mestoobitanij Ust'-Lenskogo zapovednika // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 1996. Vol. 31. P. 126–130.
58. *Karavaev M.N.* O sostave sinuzij napochvennykh lishajnikov v reliktovykh stepnykh soobshchestvakh Yakutii // *Botan. zhurn.* 1976. Vol. 61, No. 7. P. 956–960.

59. *Budaeva S.E.* Annotirovannyj spisok lishajnikov respublik Buryatiya: monografiya. Ulan-Ude: Izd-vo BGSKHA im. V.R. Filippova, 2012. 182 p.
60. *Fes'ko N.N.* Materialy k flore lishajnikov Tokinskogo Stanovika. Yakutsk, 1990. 9 s. Rukopis' dep. v VINITI, No. 2044 V90 Dep.
61. *Urbanavichene I.N., Urbanavichyus G.P.* Dopolneniya k flore lishajnikov hrebta Hamar-Daban (Yuzhnoe Pribajkal'e) // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2001. Vol. 35. P. 205–208.
62. *Poryadina L.N.* Spisok lishajnikov r. Pilka i nizhnego techeniya r. Vitim // *Sbornik nauchnyh trudov «Pochvy, rastitel'nyj i zhivotnyj mir Yugo-Zapadnoj Yakutii»*, Novosibirsk, 2006. P. 97–102
63. *Samarskij M.A., Sokolova M.V., Zhurbenko M.P., Afonina O.M.* O flore i rastitel'nosti ostrova Zhohova (Novosibirskie ostrova) // *Botan. zhurn.* 1997. Vol. 82, No. 4. P. 62–70.
64. *Velikanov A.V., Skirina I.F.* Lishajniki Lanzhinskih gor (severnoe poberezh'e Ohotskogo morya) // *Vestnik SVNC DVO RAN.* 2012. No. 2. P. 68–77.
65. *Chesnokov S.V., Konoreva L.A., Poryadina L.N., Paukov A.G., Kuznecova E.S., Andreev M.P., Gagarina L.V.* Novye i interesnye nahodki lishajnikov dlya Respubliki Saha (Yakutiya). III // *Novosti sistem. nizsh. rast.* 2017. Vol. 51. P. 220–231.
66. *Gagarina L.V., Poryadina L.N., Chesnokov S.V., Konoreva L.A.* The lichen genus *Usnea* Dill. ex Adans. in the Sakha Republic (Yakutia) // *Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation.* 2017. Vol. 6(1): P. 31–36 DOI: 10.17581/bp.2017.06107.

About the author

PORYADINA Lena Nikolaevna, candidate of biological sciences, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6445-4269>, Researcher ID: S-9860-2018 poryadina-lena@rambler.ru.

Citation

Poryadina L.N. Materials on the lichenbiota of Central Yakutia // *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2020. Vol. 25, No. 3. P. 99–109. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-9>

Биологические ресурсы

УДК 630*161

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-10

Особенности произрастания кедровостланиковых сообществ на Олекмо-Чарском нагорье Якутии

И.И. Чикидов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
chikidov@rambler.ru

Аннотация. Район исследований находится в пределах Олекмо-Чарского нагорья, южная часть Олекминского улуса (района) Республики Саха (Якутия). Рассмотрены кедровостланиковые насаждения из *Pinus pumila* (Pall.) Regel, как коренные типы, так и серийные, возникающие в результате антропогенных и природных нарушений. Кедровостланиковые сообщества в комплексе с каменистыми горными тундрами занимают склоны, привершинные участки, ровные вершины невысоких гор на высотах 1100–1400 м над у.м. При отсутствии катастрофических нарушений – воздействия огня или антропогенного воздействия, кедровостланиковый покров равномерен и образует самостоятельный сомкнутый подгольцовый растительный пояс.

Даны обобщенные характеристики господствующих коренных кедровостланиковых сообществ, приведены геоботанические описания серийных типов, возникших в результате антропогенного воздействия и лесных пожаров. Сделаны выводы о фитоценологической и типологической близости к кедровостланиковым сообществам Алданского нагорья. Отмечено участие *Vaccinium myrtillus* в травяно-кустарничковом ярусе подгольцовых кедровостлаников, проникновение на высокогорные участки *Alnus hirsuta*. При прохождении слабоинтенсивным лесным пожаром, на фоне дефицита семенного материала есть вероятность развития лесовосстановительного процесса по пути образования стабильных ерниковых ценозов из *Betula divaricata*. При развитии сукцессионного процесса через смену пород отмечено формирование сукцессионной кустарниковой стадии из *Duschekia fruticosa* при схожем общем направлении самого процесса с лесовосстановительными процессами у других хвойных видов. В травяно-кустарничковом покрове в первые годы после нарушения формирование растительного покрова идет по пути открытого травяного сообщества.

Ключевые слова: Южная Якутия, Олекмо-Чарское нагорье, *Pinus pumila* (Pall.) Regel, кедровостланиковые сообщества, подгольцовый растительный пояс, восстановление лесов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке проекта VI.52.1.8. «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии», (0376-2018-0001; рег. номер AAAA-A17-117020110056-0).

Введение

Район исследований находится на территории южной части Олекминского улуса (района) Республики Саха (Якутия), в пределах Олекмо-Чарской низкогорной провинции с преобладанием горноредколесных ландшафтов [1].

Согласно схеме геоботанического районирования ЯАССР [2], район исследования относится к Учуро-Олекминскому округу Южноякутской подпровинции бореальных лесов, по схеме лесорастительного районирования среднетаежной Якутии [3], входит в состав Алданского горного среднетаежного округа Южноякутской провинции сосново-лиственничной с участием темнохвойных лесов тайги, характеризуется преоблада-

нием лесов из лиственницы Гмелина, преимущественно зеленомошных, с широким участием ели, сосны и кедра. В состав подлеска часто входит кедровый стланник, образующий самостоятельные насаждения в предгольцовом поясе. В рамках данной статьи будут рассмотрены кедровостланиковые насаждения, занимающие в районе исследований около 8 % площади, как коренные типы, так и серийные, возникающие в результате антропогенных и природных нарушений.

Сведения об особенностях произрастания кедрового стланика в горных системах Якутии, его биологии и экологии можно встретить в ряде работ [4–14]. В силу важных защитных и кормовых свойств, кедровый стланник принято отно-

силь к одной из главных лесообразующих пород Якутии [15]. Характеристика современного состояния растительного покрова района исследований дана в работах Л.В. Кузнецовой [16,17] и других авторов [18].

Характеристика района исследования

Пестрота растительного покрова района обусловлена его ландшафтными особенностями, представляющими собой предгорья, плато и высокие нагорья с отметками до 1000–1400 м.

На высотах до 600–800 м над у.м. преобладает среднетаежная растительность, с господствующими лиственничными, с участием ели лесами зеленомошными, с небольшими участками сосновых и кедрово-сосновых лесов. В долинном комплексе обычны интразональные еловые леса, на речных галечниках встречаются пойменные леса из чозении и тополя душистого.

На следующем ландшафтном поясе, на высотах до 1000–1200 м над у.м., на плато между хребтов, по долинам ручьев господствуют лиственничные и еловые редколесья в комплексе с ерниковыми ассоциациями кустарничково-зеленомошные и кустарничково-лишайниковые. Заметно участие кедрового стланика в кустарниковом ярусе.

Склоны, привершинные участки, ровные вершины невысоких гор на высотах 1100–1400 м над у.м. заняты зарослями кедрового стланика кустарничково-зеленомошно-лишайниковыми в комплексе с каменистыми горными тундрами. При отсутствии катастрофических нарушений – воздействия огня или антропогенного воздействия, кедровостланиковый покров равномерен и образует самостоятельный сомкнутый подгольцовый растительный пояс [19, 20].

Климат района исследований континентальный, умеренно влажный – среднегодовое количество осадков колеблется в пределах от 400 до 600 мм. Среднегодовая температура 9,8 °С, при средней температуре июля около 18 °С, для района характерна большая суточная амплитуда летних колебаний температуры [21].

Методы исследований

При сборе материала использовался маршрутный метод исследований, лесные геоботанические описания растительности проводились на участках площадью до 400 м², по методике В.Н. Сукачева, С.В. Зонна [22]. При описании

кустарникового, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов были использованы методы глазомерного определения проективного покрытия в процентах, оценки обилия по Друде [23].

Результаты и обсуждение

Растительности района исследования, как и в других горных областях, свойственно поясное распределение по высоте. Характерная черта Олекмо-Чарского нагорья – широкое распространение еловых и лиственничных редколесий на межгорных плато, кедровый стланик здесь, встречаясь повсеместно, наряду с березой растопыренной составляет кустарниковый ярус. Выше, на высотах от 1000 м над у.м., на склонах и пологих вершинах гор ниже гольцового пояса кедровый стланик образует самостоятельные сомкнутые насаждения.

Кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) – хвойный ветвистый стелющийся кустарник средней высотой в Якутии до 2–5 м, но способный достигать в оптимальных условиях больших размеров [24–28]. Плодоношение начинается с 15–20-летнего возраста, имеет 2–3-годовую цикличность. На сопредельных регионах со схожими условиями возобновление на вырубках и гарях замедлено, идет через смену пород [29].

Синтезированное обобщенное геоботаническое описание господствующего кедровостланикового сообщества будет выглядеть следующим образом:

Кедровостланиковое сообщество рододендрово-лишайниковое. Близкие варианты этого коренного типа леса господствуют на склоновых участках выше 900 м над у.м. и на пологих вершинах гор на высотах 1100–1400 м над у.м.

Кусты *Pinus pumila* высотой до 5 м и диаметром стволов у основания до 20 см образуют практически сплошные заросли. Вторым ярусом в покрове встречаются с достаточно высоким обилием *Rhododendron aureum*, *Betula divaricata* (sp-cop₁).

Травяно-кустарничковый ярус, как правило, разрежен, проективное покрытие редко превышает 20 %. В покрове встречаются с невысоким обилием *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Loiseleuria procumbens* (sol-sp).

Моховой покров встречается пятнами, проективное покрытие до 5 %, в покрове представлены

Pleurozium schreberi, *Polytrichum commune* (sol). Лишайниковый покров практически сплошной. В покрове доминирует *Cladonia stellaris* (сор₂), с участием других представителей рода *Cladonia*.

В период интенсивных геолого-разведочных работ 70–80-х годов XX в. многие участки кедровостланиковых сообществ оказались нарушены – как вследствие горных работ, так и в результате воздействия лесных пожаров. Ко времени проведения геоботанических исследований (около 30 лет после нарушения растительности), участки были на разных стадиях восстановительного процесса. В целом, нарушение естественного состояния насаждений заключалось в гибели кедровостланикового покрова, одномоментном, в случае горных работ или интенсивного воздействия огня, либо постепенном, в случае воздействия малоинтенсивного лесного пожара. Далее будут приведены описания по каждому случаю:

Гарь на месте зарослей кедрового стланика. Участок расположен на вершине небольшой сопки, примыкающей к плато, нарушенный участок, пройденный сплошным фронтом пожара, занимает территорию как на плато (гарь лиственничного леса), так и на склоне сопки и его вершине. По всему участку – начиная с середины склона сопки, обильно встречаются погибшие стволы кедрового стланика. Живые кусты кедрового стланика, молодые послепожарные и допожарные, единичны, встречаются единичные лиственницы высотой до 5 м.

Кустарниковый ярус сформирован из *Betula divaricata* (сор₁), проективное покрытие 20–25 %.

Травяно-кустарниковый ярус выражен, проективное покрытие до 70 %. Наиболее обильно встречаются *Carex* sp. (sp-сор₁), *Vaccinium uliginosum* (sp), *Cassiope ericoides*, *Vaccinium myrtillus* (sol).

Моховой покров пятнами, занимает около 40 % проективной площади. В покрове преимущественно *Aulacomnium palustre*, *Polytrichum commune* (sol). Проективное покрытие лишайникового покрова не более 5 %. В покрове присутствуют представители рода *Cladonia*.

Наличие большого количества остатков погибших кустов кедрового стланика говорит о слабой интенсивности лесного пожара, нарушившего, но не уничтожившего покров из кустарников, погибший в последующие годы. В настоящее время в кустарниковом покрове господствует

Betula divaricata, быстрее восстановившаяся после пожара. Схожая ситуация наблюдается и на приграничных нарушенных участках плато, на гарь лиственничного леса, где покров из *Betula divaricata* близок к образованию сомкнутой ерниковой ассоциации, достаточно устойчивой и долговременной. В обоих случаях мы считаем наиболее вероятной причиной такого направления сукцессионного процесса недостаточное обсеменение участков семенами лесобразующих пород на фоне высокой активности восстановления *Betula divaricata*.

Ольховник мертвопокровно-злаковый. Описанный участок расположен на вершине сопки, на высоте около 1100 м над у.м. Заметны следы старых горных работ, планировки местности, участок, по-видимому, был полностью расчищен от растительности (зарослей кедрового стланика).

Мертвый покров составляет 40–50 %, составлен из опада листьев ольховника. На участке единично встречаются *Larix gmelinii* высотой до 8 м и *Alnus hirsuta* высотой 7 м.

Кустарниковый ярус представлен *Duschekia fruticosa* высотой 2,5–5 м, с высоким обилием (сор₂–сор₃). Происходит постепенное внедрение на участок *Pinus pumila*, встречающегося достаточно обильно по краям участка (sp), менее обильно в центре (sol).

Травяно-кустарниковый ярус с разрывами, проективное покрытие 50 %. В покрове доминируют злаки – *Bromopsis pumelliana*, *Poa* sp. (sp), менее обильны *Chamaenerion angustifolium*, *Vaccinium uliginosum* (sol).

Моховой покров произрастает редкими пятнами, проективное покрытие не более 10–15 %. Встречаются *Aulacomnium palustre*, *Polytrichum commune* (sol). Лишайниковый покров не выражен.

При первоначальном нарушении растительный и почвенный покровы были повреждены работой тяжелой техники, фактическое начало сукцессионного ряда было дано с заселения минерального субстрата пионерными видами. Тем не менее, несмотря на достаточно экстремальные высокогорные условия, спустя 30 лет после нарушения участок находится на кустарниковой стадии восстановления с активным проникновением в покров *Pinus pumila*. Интересным, на наш взгляд, является формирование сукцессионной кустарниковой стадии из *Duschekia fruticosa*, тогда как в менее высокогорных условиях эту

роль чаще выполняет *Betula pendula*. Стоит упомянуть проникновение на участок *Alnus hirsuta*, достаточно обычного на припойменных кустарниковых зарослях в данной местности, однако поймы ближайших ручьев расположены от описанного места на 500 м ниже.

Кедровостланиковая редина бруснично-шикшевая. Описанный тип расположен на плоской вершине сопки, 400 м западнее предыдущего описания. Участок ровный, сухой, по-видимому, запланированный в период активных геологических работ. В настоящее время постепенно зарастает кедровым стлаником.

Кусты *Pinus pumila* расположены в 4–6 м друг от друга, высота кустов менее 2 м (sp–cop₁). Также в кустарниковом ярусе встречаются *Duschekia fruticosa* и *Betula divaricata* (sp).

Травяно-кустарничковый ярус с разрывами (щебнистые участки без растительности), проективное покрытие около 60 %. В покрове доминирует *Empetrum nigrum* (cop₁), менее обильно встречаются *Vaccinium uliginosum*, *Cassiope ericoides*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Loiseleuria procumbens*, *Ledum palustre* (sol).

Моховой покров не выражен. Лишайниковый покров пятнами, проективное покрытие не более 5 %. В покрове присутствуют представители рода *Cladonia*.

Данный тип можно рассматривать как следующий серийный тип в ряду восстановления после ольховника мертвопокровно-злакового. Постепенное увеличение проективного покрытия и обилия *Pinus pumila* приводит к вытеснению из кустарникового яруса *Duschekia fruticosa*. Появление *Betula divaricata* – вида, обычного в составе ненарушенных кедровостланиковых сообществ, также может говорить о постепенном восстановлении условий произрастания. Видовой состав подчиненных ярусов растительности также сдвигается в сторону преобладания гипарктических кустарничков.

Выводы

Кедровостланиковые сообщества района исследований образуют самостоятельный развитый подгольцовый пояс, фитоценологически и типологически близки к сообществам Алданского нагорья [3]. Однако специфичность условий, обусловленная широтным расположением района исследований, приводит к возникновению уникальных, отличных от других кедро-

востланиковых сообществ горной Якутии особенностей, как в видовом составе насаждений, так и в их распределении в пространстве. Участие черники (*Vaccinium myrtillus*) в травяно-кустарничковом ярусе подгольцовых кедровостлаников, проникновение на высокогорные участки ольхи волосистой (*Alnus hirsuta*) как раз иллюстрирует эти особенности.

Проведенные исследования позволяют прояснить некоторые моменты в восстановительном процессе на кедровостланиковых сообществах Олекмо-Чарского нагорья. При послепожарном нарушении, прохождении слабоинтенсивным лесным пожаром, на фоне дефицита семенного материала есть вероятность развития лесовосстановительного процесса по пути образования стабильных ерниковых ценозов из березы растопыренной (*Betula divaricata*). При развитии сукцессионного процесса через смену пород отмечено формирование сукцессионной кустарниковой стадии из *Duschekia fruticosa* при схожем общем направлении самого процесса с лесовосстановительными процессами у других хвойных видов. В травяно-кустарничковом покрове в первые годы после нарушения формирование растительного покрова идет по пути открытого травяного сообщества, о чем может говорить относительно высокое участие видов осок и злаков в травяно-кустарничковом покрове нарушенных серийных кедровостлаников.

Литература

1. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР. Масштаб 1: 2 500 000 / Ред. П.И. Мельников. М.: ГУГК, 1991. 2 л.
2. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. Основные особенности растительного покрова Якутской АССР. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 156 с.
3. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П. и др. Леса среднетаежной подзоны Якутии. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 140 с.
4. Миддендорф А. Путешествие на Север и Восток Сибири // Север и Восток Сибири в естественно-историческом отношении СПб., 1867. Ч. 1. 192 с.
5. Работнов Т.А. Физико-географический очерк Алданского округа ЯАССР // Материалы земельного устройства районов Крайнего Севера. Т. 6. М., 1940. 100 с.
6. Тихомиров Б.А. Кедровый стланик, его биология и использование. М.: МОИП, 1949. 106 с.
7. Уткин А.И. Кедровый стланик на северо-западной окраине ареала и история его распространения //

Тр. Ин-та леса и древесины: Вопросы лесоводства и лесоведения. Красноярск, 1961. Т. 50. С. 104–119.

8. *Старилов Г.Ф.* Леса Магаданской области. Магадан: Кн. изд-во, 1958. 224 с.

9. *Поздняков Л.К.* Леса бассейна р. Олекмы // Природа. М.: Изд-во АН СССР, 1955. С. 101–106.

10. *Пивник С.А.* К вопросу о плодоношении кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Rgl.) // Бот. журн. 1957. Т. 42, № 2. С. 745–751.

11. *Пивник С.А.* Эколого-биологические особенности кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Rgl.) в основных растительных ассоциациях северо-западной части его ареала: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Л., 1958. 16 с.

12. *Меженный А.А.* Некоторые особенности роста и формирования деревьев кедра и кустов кедрового стланика в Южной Якутии // Научные сообщения ЯФ СО АН СССР. 1958. Вып. 1. С. 96–103.

13. *Тимофеев П.А.* Леса Якутии: состав, ресурсы, использование и охрана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 194 с.

14. *Тимофеев П.А.* Деревья и кустарники Якутии. Якутск, 2003. 60 с.

15. *Щербаков И.П.* Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 344 с.

16. *Кузнецова Л.В.* Флористические находки на Олекмо-Чарском нагорье и Северо-Восточной части хребта Удокан // Ботанические исследования в Азиатской России. Т. 1. Барнаул, 2003. С. 360–362.

17. *Кузнецова Л.В.* Растительный покров Олекмо-Чарского нагорья северо-восточной части хребта Удокан // Бюллетень МОИП. Отдел биологический. 2009. Т. 114. Вып. 3. Приложение 1. Ч. 3. С. 86–90.

18. *Биоразнообразие ландшафтов Токинской котловины и хребта Токинский Становик / А.П. Чевычелов, Л.В. Кузнецова, А.П. Исаев и др.; отв. ред. Б.И. Иванов.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. 284 с.

19. *Бойченко А.М.* Некоторые аспекты плодоношения кедрового стланика в Алданском нагорье //

Ботанические исследования в криолитозоне: Сб. научных трудов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. С. 123–135.

20. *Поздняков Л.К.* Леса Якутской АССР // Леса СССР: Леса Урала, Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1969. С. 469–537.

21. *Атлас сельского хозяйства Якутской АССР.* М.: ГУГК, 1989. 115 с.

22. *Сукачев В.Н., Зонн С.В.* Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.

23. *Понятовская В.М.* Учет обилия и особенности размещения видов в естественных растительных сообществах // Полевая геоботаника. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1964. С. 209–299.

24. *Поздняков Л.К.* Древовидная форма кедрового стланика // Ботанический журнал. 1952. Т. 37. С. 688–691.

25. *Поздняков Л.К.* Крупная форма кедрового стланика // Лесное хозяйство. 1953. № 6. С. 113–114.

26. *Бобринев В.П., Пак Л.Н.* Кедровый стланик (*Pinus pumila*) древовидной формы на севере Забайкальского края // Международный журнал научных и прикладных исследований. 2014. № 8 (ч. 2). С. 9–13.

27. *Бобринев В.П., Пак Л.Н.* Возобновление горных кедровников в Забайкальском крае // Леса России в XXI веке: мат-лы X междунар. науч.-техн. интернет-конференции. СПб.: Изд-во Министерства образования и науки Российской Федерации, 2012. С. 23–26.

28. *Докучаев Н.Е., Докучаева В.Б.* Кусты-гиганты кедрового стланика в Северном Приохотье // Вестник ДВО РАН. 2015. № 1. С. 107–110.

29. *Филиппова Е.В., Бобринев В.П., Пак Л.Н.* Особенности биологии кедрового стланика (*Pinus pumila*) на севере Забайкалья // Вестник ЗабГУ, 2015. № 6 (121). С. 44–49.

Поступила в редакцию 22.05.2020

Принята к публикации 16.07.2020

Об авторе

ЧИКИДОВ Иван Иванович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, chikidov@rambler.ru.

Информация для цитирования

Чикидов И.И. Особенности произрастания кедровостланиковых сообществ на Олекмо-Чарском нагорье Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 110–116. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-10>

Features of the growth of *Pinus pumila* (Pall.) Regel communities in the Olekmo-Charsky highlands of Yakutia

I.I. Chikidov

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
chikidov@rambler.ru*

Abstract. The study area is located within Olekmo-Charskoye highland, the southern part of the Olekminskiy ulus (district) of the Republic of Sakha (Yakutia). *Pinus pumila* (Pall.) Regel plantations are considered, both indigenous and serial types, arising as a result of anthropogenic and natural disturbances. *Pinus pumila* communities in combination with rocky mountain tundra occupy slopes, peaks, flat peaks of low mountains at a height of 1100–1400 m above sea level. In the absence of catastrophic disturbances – fire events or anthropogenic impacts, *Pinus pumila* forest cover is uniform and forms an independent closed subalpine plant belt.

The generalized characteristics of the prevailing indigenous *Pinus pumila* communities are presented, geobotanical descriptions of the serial types that arose as a result of anthropogenic impact and wildfires are given. Conclusions concerning the phytocenological and typological proximity to the *Pinus pumila* communities of the Aldan Highlands are made. The participation of *Vaccinium myrtillus* in the grass-shrub layer of the *Pinus pumila* forests was detected, along with the penetration of *Alnus hirsute* into the high mountain areas. When passing through a low-intensity wildfire, against the background of the deficiency of seed material, the development of reforestation process to the formation of stable dwarf birch cenosis from *Betula divaricata* is probable. With the development of the succession process through a change of species, the formation of the succession shrub stage from *Duschekia fruticosa* was detected, with the general direction of the process similar to reforestation processes in other coniferous species. In the grass-shrubbery, in the first years after the violation, the formation of vegetation follows the path of an open grass community.

Key words: South of Yakutia, Olekmo-Charskoye highland, *Pinus pumila* (Pall.) Regel, *Pinus pumila* communities, subalpine vegetation community (belt), forests restoration.

Acknowledgements. This work was supported by project VI.52.1.8. «Fundamental and applied aspects of studying the diversity of the plant world of North and Central Yakutia», (0376-2018-0001; reg. Number AAAA-A17-117020110056-0).

References

1. Merzlotno-landshaftnaya karta Yakutskoy ASSR. Masshtab 1: 2 500 000 / Red. P.I. Mel'nikov. M.: GUGK, 1991. 2 p.
2. Andreev V.N., Galaktionova T.F., Perfil'eva V.I., Shcherbakov I.P. Osnovnye osobennosti rastitel'nogo pokrova Yakutskoy ASSR. Yakutsk: YAF SO AN SSSR, 1987. 156 p.
3. Timofeev P.A., Isaev A.P., Shcherbakov I.P. et al. Lesa srednetazhnoj podzony Yakutii. Yakutsk: YANC SO RAN, 1994. 140 p.
4. Middendorf A. Puteshestvie na Sever i Vostok Sibiri // Sever i Vostok Sibiri v estestvenno-istoricheskom otnoshenii. SPb., 1867. CH.1. 192 p.
5. Rabotnov T.A. Fiziko-geograficheskij ocherk Aldanskogo okruga YaASSR // Materialy zemel'no-vodnogo ustrojstva rajonov Krajnego Severa. Vol. 6. M., 1940. 100 p.
6. Tihomirov B.A. Kedrovyy stlanik, ego biologiya i ispol'zovanie. M.: MOIP, 1949. 106 p.
7. Utkin A.I. Kedrovyy stlanik na severo-zapadnoj okraine areala i istoriya ego rasprostraneniya // Tr. In-ta lesa i drevesiny: Voprosy lesovodstva i lesovedeniya. Krasnoyarsk, 1961. Vol. 50. P. 104–119.
8. Starikov G.F. Lesa Magadanskoj oblasti. Magadan: Kn. izd-vo, 1958. 224 p.
9. Pozdnyakov L.K. Lesa bassejna r. Olekmy // Priroda. M.: Izd-vo AN SSSR, 1955. P. 101–106.
10. Pivnik S.A. K voprosu o plodonoshenii kedrovogo stlanika (*Pinus pumila* (Pall.) Rgl.) // Bot. zhurn. 1957. Vol. 42, No 2. P. 745–751.
11. Pivnik S.A. Ekologo-biologicheskie osobennosti kedrovogo stlanika (*Pinus pumila* (Pall.) Rgl.) v osnovnyh rastitel'nyh asociacijah severo-zapadnoj chasti ego areala: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk. L., 1958. 16 p.

12. *Mezhennyy A.A.* Nekotorye osobennosti rosta i formirovaniya derev'ev kedra i kustov kedrovogo stlanika v Yuzhnoj Yakutii // Nauchnye soobshcheniya YAF SO AN SSSR. 1958. Iss. 1. P. 96–103.
13. *Timofeev P.A.* Lesa Yakutii: sostav, resursy, ispol'zovanie i ohrana. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN, 2003. 194 p.
14. *Timofeev P.A.* Derev'ya i kustarniki Yakutii. Yakutsk, 2003. 60 p.
15. *Shcherbakov I.P.* Lesnoj pokrov Severo-Vostoka SSSR. Novosibirsk: Nauka, 1975. 344 p.
16. *Kuznecova L.V.* Floristicheskie nahodki na Olekmo-Charskom nagor'e i Severo-Vostochnoj chasti hrebta Udokan // Botanicheskie issledovaniya v Aziatskoj Rossii. Vol. 1. Barnaul, 2003. P. 360–362.
17. *Kuznecova L.V.* Rastitel'nyj pokrov Olekmo-Charskogo nagor'ya severo-vostochnoj chasti hrebta Udokan // Byulleten' MOIP. Otdel biologicheskij. 2009. Vol. 114. Iss. 3. Prilozhenie 1. CH. 3. P. 86–90.
18. *Bioraznoobrazie* landshaftov Tokinskoj kotloviny i hrebta Tokinskij Stanovik / A.P. Chevychelov, L.V. Kuznecova, A.P. Isaev i dr.; otv. red. B.I. Ivanov. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2010. 284 p.
19. *Bojchenko A.M.* Nekotorye aspekty plodonosheniya kedrovogo stlanika v Aldanskom nagor'e // Botanicheskie issledovaniya v kriolitozone: Sb. nauchnyh trudov. Yakutsk: YANC SO RAN, 1992. P. 123–135.
20. *Pozdnyakov L.K.* Lesa Yakutskoj ASSR // Lesa SSSR: Lesa Urala, Sibiri i Dal'nego Vostoka. M.: Nauka, 1969. P. 469–537.
21. *Atlas sel'skogo hoz'yajstva Yakutskoj ASSR.* M.: GUGK, 1989. 115 p.
22. *Sukachev V.N., Zonn S.V.* Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu tipov lesa. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. 144 p.
23. *Ponyatovskaya V.M.* Uchet obiliya i osobennosti razmeshcheniya vidov v estestvennyh rastitel'nyh soobshchestvah // Polevaya geobotanika. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1964. P. 209–299.
24. *Pozdnyakov L.K.* Drevovidnaya forma kedrovogo stlanika // Botanicheskij zhurnal. 1952. Vol. 37. P. 688–691.
25. *Pozdnyakov L.K.* Krupnaya forma kedrovogo stlanca // Lesnoe hoz'yajstvo. 1953. No. 6. P. 113–114.
26. *Bobrinev V.P., Pak L.N.* Kedrovyy stlanik (*Pinus pumila*) drevovidnoj formy na severe Zabajkal'skogo kraja // Mezhdunarodnyj zhurnal nauchnyh i prikladnyh issledovanij. 2014. No. 8 (ch. 2). P. 9–13.
27. *Bobrinev V.P., Pak L.N.* Vozobnovlenie gornyh kedrovnikov v Zabajkal'skom krae // Lesa Rossii v XXI veke: mat-ly X mezhdunar. nauch.-tekhn. internet-konferencii. SPb.: Izd-vo Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, 2012. P. 23–26.
28. *Dokuchaev N.E., Dokuchaeva V.B.* Kusty-giganty kedrovogo stlanika v Severnom Priohot'e // Vestnik DVO RAN. 2015. No. 1. P. 107–110.
29. *Filippova E.V., Bobrinev V.P., Pak L.N.* Osobennosti biologii kedrovogo stlanika (*Pinus pumila*) na severe Zabajkal'ya // Vestnik ZabGU, 2015. No. 6 (121). P. 44–49.

About the author

CHIKIDOV Ivan Ivanovich, candidate of biological sciences, researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-8945-4505>, chikidov@rambler.ru.

Citation

Chikidov I.I. Features of the growth of *Pinus pumila* (Pall.) Regel communities in the Olekmo-Charsky highlands of Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 110–116. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-10>

Химический состав липидно-белковой фракции, выделяемой при производстве биопрепарата «Эпсорин»

С.М. Рожина, И.В. Слепцов, А.Н. Журавская

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
sahayana-rozhina@mail.ru*

Аннотация. Проведено исследование химического состава липидно-белковой фракции, выделяемой при производстве биопрепарата «Эпсорин». Препарат на основе пантов северного оленя «Эпсорин» применяется в качестве эффективного лекарственного средства в отношении астенических состояний различного происхождения, при неврастении, неврозе, в послеоперационных периодах, при слабости сердечной мышцы, при гипотонии, обладает иммуномодулирующим и радиопротекторным действием, стимулирующим и придающим силы свойствами, повышает физическую и умственную работоспособность. Выделены путем последовательной экстракции фракции липидов, водорастворимых веществ и продуктов гидролиза из липидно-белковой массы из остатков производства биопрепарата «Эпсорин». Все полученные фракции переводили в триметилсилильные (ТМС) производные. Анализировали полученные ТМС-производные методом ГХ-МС на приборе «МАЭСТРО» 7820/5975 (Россия), построенном на базе газового хроматографа Agilent 7820 (США) и масс-спектрометрического детектора Agilent 5975. Показано, что выход исследуемых веществ был выше при лиофильном высушивании относительно термической обработки. Установлено высокое содержание заменимых и незаменимых аминокислот, полиолов, органических, неорганических и жирных кислот в липидно-белковом остатке «Эпсорин», который таким образом может использоваться как биологически активная добавка в косметические средства.

Ключевые слова: панты северного оленя, липидно-белковая фракция, «Эпсорин», аминокислоты, жирные кислоты, органические кислоты, косметические средства.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР VI.62.1. «Разработка биопрепаратов из тканей растений и животных Якутии на основе изучения особенностей их биохимического состава и механизмов адаптации к условиям Севера» (№ госрегистрации - АААА-А17-117020110055-3).

Введение

Оленеводство у северных народов представляет собой основу экономики, культуры и образа жизни. Республика Саха (Якутия) является одним из крупнейших оленеводческих регионов Дальнего Востока и Арктики в целом. Олени используются северными народами в качестве основного источника питания, в качестве транспортного средства для передвижения по тундре, для изготовления одежды из шкур, в народной медицине и т. д. Северные народы, в том числе и якуты, применяют панты северного оленя как тонизирующее и укрепляющее организм средство, употребляя как в сыром, так и в отваренном виде.

Применение пантов в качестве лекарственного сырья впервые упоминается в книге «Джуд-Ши» тибетского врача Цо-Жен-Шонну около 3 тысяч лет назад. Лекарственные средства, приготовленные на основе пантов, в представлении

древних китайских врачей повышают энергию организма, способствуют омоложению, лечат болезни крови, почек, улучшают заживление ран и т. д. [1]. Биологическая активность экстракта из пантов связана главным образом с уникальным составом липидов, аминокислот, пептидов, сбалансированным набором водо- и жирорастворимых витаминов, макро- и микроэлементов, трех основных органических кислот – метаболитов цикла Кребса.

Препарат на основе пантов северного оленя «Эпсорин», разработанный в Институте биологических проблем криолитозоны (ИБПК) СО РАН, содержит в 2,2–2,8 раза больше указанных выше биоактивных веществ по сравнению с пантами пятнистого и благородного оленей [2]; применяется в качестве эффективного лекарственного средства в отношении астенических состояний различного происхождения, при неврастении, не-

врозе, в послеоперационных периодах, при слабости сердечной мышцы, при гипотонии, обладает иммуномодулирующим и радиопротекторным действием, стимулирующим и придающим силы свойствами, повышает физическую и умственную работоспособность [3].

По химическому составу «Эпсорин» представляет 50%-ю водно-этанольную смесь, содержащую в сухом остатке белок, фосфолипиды, свободные аминокислоты, эфиры ненасыщенных жирных кислот, макро- и микроэлементы, сбалансированный набор жирно- и водорастворимых витаминов и другие соединения, в том числе внутриклеточные регуляторы действия многих гормонов и пептидов, нормализующих реактивность иммунной системы [4].

В результате производства биопрепарата «Эпсорин» в ходе технологического процесса в качестве одной из фракций после низкотемпературной обработки ($-40 \div -42$ °C) первичного водно-спиртового экстракта пантов северного оленя выделяется твердофазный биоактивный липидно-белковый остаток [5], прошедший успешные испытания в качестве добавки в косметологические средства в Московском Институте красоты в целях усиления роста волос.

Целью данной работы является сравнение химического состава лиофильно и термически высушенного липидно-белкового остатка, выделяемого при производстве биопрепарата «Эпсорин».

Материалы и методы

В качестве тест-объекта использовали липидно-белковый остаток, выделяемый при производстве биопрепарата «Эпсорин». Так как данная фракция содержала воду, вначале проводили высушивание липидно-белкового остатка двумя разными способами: лиофилизацией (Л) и термической обработкой (Т). Далее работали с каждым отдельно.

Проводили последовательное экстрагирование веществ из высушенных остатков (Л) и (Т). Сначала выделяли липиды по методу Фолча [6].

Затем из оставшегося шрота получали водорастворимую фракцию путем двойной экстракции в воде без нагревания. Отделяли раствор от шрота центрифугированием в течение 5 минут при 13000 об./мин. Объединенные растворы водорастворимых фракций высушивали на лиофильной установке. Оставшийся шрот экстрагировали в воде при 100 °C в течение 4 ч. Отделяли раствор от шрота центрифугированием и прово-

дили повторную экстракцию при таких же условиях. Объединенные растворы полностью высушивали на лиофильной установке. Полученный шрот и выделенные фракции подвергали полному кислотному гидролизу 2М раствором трифторуксусной кислоты (ТФУ) в течение 5 часов при 100 °C. После кислотного гидролиза полностью выпаривали ТФУ до образования сухого остатка, получали продукты гидролиза.

Все полученные фракции растворяли в пиридине, каждую отдельно друг от друга, добавляли силирующие агенты (гексаметилдисилазан и триметилхлорсилан) для получения триметилсилильных (ТМС) производных. Силирование проводили при температуре 80 °C в течение 1 ч [7]. Анализировали полученные ТМС-производные методом ГХ-МС на приборе «МАЭ-СТРО» 7820/5975 (Россия), построенном на базе газового хроматографа Agilent 7820 (США) и масс-спектрометрического детектора Agilent 5975. Разделение проводили на колонке HP-5MS (30 м × 0,25 мм, Agilent, США) со скоростью потока газа-носителя (гелий) 1 мл/мин. Ввод образца в колонку составлял 0,5 мкл при температуре инжектора 250 °C. Анализировали в градиентном режиме: 3 минуты 100 °C, от 100→200 °C со скоростью 2 °C/мин и от 200→250 °C со скоростью 3 °C/мин. Для идентификации полученных пиков использовали базу данных NIST 11 [8].

Результаты и обсуждения

Из «отходов» производства биопрепарата «Эпсорин», которым является липидно-белковая масса, выделены липидная фракция, водорастворимые вещества и продукты гидролиза (табл. 1).

Таблица 1
Масса фракций, выделенных из 100 мг
липидно-белковых остатков
биопрепарата «Эпсорин», мг

Table 1
The mass of fractions isolated
from 100 mg of lipid-protein residues
of the biological product «Epsorin»

Фракция	Метод сушки	
	Л	Т
Липидная	17,0±0,1	18,9±0,1
Водорастворимая (20 °C)	19,0±0,1	14,7±0,1
Водорастворимая (100 °C)	9,4±0,1	8,0±0,1
Гидролиз HCl	49,7±0,2	49,0±0,2

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛИПИДНО-БЕЛКОВОЙ ФРАКЦИИ

Выход липидной фракции из липидно-белковой массы (ЛБМ) при лиофилизации составил 17 %, при термической обработке – 18,9 %. Выход водорастворимых веществ при экстракции из лиофилизованного остатка ЛБМ при 20 °С и при 100 °С выше по сравнению с термическим высушиванием на 29 и 17,5 % соответственно.

Выход веществ при кислотном гидролизе лиофильно и термически высушенных образцов составлял 49,7 % и 49,0 % соответственно.

Таким образом, общий выход веществ при лиофилизации составил 95,1 %, при термической обработке – 90,6 %. Следовательно, лиофилизация способствует немного большему выходу исследуемых веществ по сравнению с термическим высушиванием, особенно в водорастворимой фракции при 20 °С.

В липидно-белковом остатке «Эпсорина» обнаружены незаменимые аминокислоты: треонин, валин, изолейцин, лейцин, метионин и фе-

нилаланин, а также заменимые аминокислоты: глицин, аланин, серин, пролин, 5-оксипролин, глутамин, тирозин, аспарагиновая, глутаминовая и 2-аминомасляная кислота (табл. 2). Концентрация глицина, лейцина, пролина, фенилаланина, тирозина и глутаминовой кислоты при лиофильном высушивании выше по сравнению с термической обработкой в 1,5, 1,5, 2,2, 1,7, 174,6 и 167,6 раза соответственно. Таким образом, при лиофильном высушивании содержание аминокислот значительно выше, чем при термической обработке.

Изучено содержание органических и неорганических кислот в липидно-белковой массе остатков «Эпсорина» при лиофильном и термическом высушивании. При термической обработке малеиновая, адипиновая, субериновая и азелаиновая кислоты не обнаружены в полученных фракциях (табл. 3). Это может быть связано с тем, что данные кислоты в результате термиче-

Таблица 2

Аминокислотный состав липидно-белкового остатка биопрепарата «Эпсорин»

Table 2

Amino acid composition of the lipid-protein residue of the biological product «Epsorin»

Соединение	Концентрация, усл. ед/г _{эпсорина}	
	Л	Т
Глицин	92,66	62,97
Аланин	50,47	46,53
Серин	47,12	42,28
Валин	44,49	42,06
Лейцин	92,68	62,56
Пролин	77,55	35,54
Изолейцин	1,12	2,49
Треонин	48,38	41,66
Метионин	1,88	1,57
Аспарагиновая кислота	33,74	23,1
Глутамин	0,03	0,04
5-оксипролин	7,26	2,12
Фенилаланин	45,43	26,02
Тирозин	12,22	0,07
Глутаминовая кислота	28,49	0,17
2-аминомасляная кислота	0,8	0,55

Примечание. Здесь и в следующих таблицах за 1 усл. ед. принят 1 мг TMS-производных.

Note. Here and in other tables 1 c.u. – 1 mg TMS-derivatives.

Таблица 3

Содержание органических и неорганических кислот липидно-белкового остатка биопрепарата «Эпсорин»

Table 3

The content of organic and inorganic acids of the lipid-protein residue of the biological product «Epsorin»

Соединение	Концентрация, усл. ед/г _{эпсорина}	
	Л	Т
Щавелевая кислота	9,96	10,34
Молочная кислота	7,18	6,66
Уксусная кислота	1,79	1,42
Пировиноградная кислота	0,06	0,07
Бензойная кислота	0,32	0,19
Фосфорная кислота	97,93	91,79
Малеиновая кислота	0,13	–
Фумаровая кислота	0,66	0,6
Себаиновая кислота	0,09	0,39
Янтарная кислота	0,96	0,88
Яблочная кислота	0,12	0,53
Адипиновая кислота	0,07	–
Аминомалоновая кислота	0,88	1,64
Субериновая кислота	0,05	–
Азелаиновая кислота	0,13	–
Лимонная кислота	0,07	0,57

Таблица 4

Жирнокислотный состав липидно-белкового остатка биопрепарата «Эпсорин»

Table 4

The fatty acid composition of the lipid-protein residue of the biological product «Epsorin»

Соединение	Концентрация, усл. ед/г _{эпсорина}	
	Л	Т
Миристиновая кислота	0,22	—
Пентадекановая кислота	0,07	—
Пальмитолеиновая кислота	0,11	—
Пальмитиновая кислота	1,57	—
Линолевая кислота	0,53	—
Олеиновая кислота	0,27	—
Транс-13-октадеценовая кислота	0,24	—
Стеариновая кислота	0,5	—
Арахидоновая кислота	0,03	—

ской обработки разрушаются, но сохраняются при лиофильном высушивании.

При лиофильной обработке полученной липидно-белковой массы обнаруживаются ряд жирных кислот: миристиновая, пентадекановая, пальмитолеиновая, пальмитиновая, линоленовая, олеиновая, транс-13-октадеценовая, стеариновая и арахидоновая, которые не обнаруживаются при ее термической обработке, по-видимому, из-за того, что при высоких температурах они окисляются (табл. 4).

Показано, что при лиофильном высушивании, по сравнению с термической обработкой, содержание глицерина, этиленгликоля и мио-инозитола выше в 1,7, 2,1 и 1,2 раза соответственно.

Заключение

Выделены фракции липидов, водорастворимых веществ и продуктов гидролиза из липидно-белковой массы остатков «Эпсорина». Показано, что выход исследуемых веществ был несколько выше при лиофильном высушивании относительно термической обработки. Установлено, что лиофильное высушивание липидно-белковой массы способствует сохранению биологически активных веществ, таких как аминокислоты, полиолы, жирные, органические и неорганические кислоты, по сравнению с термической об-

Таблица 5

Содержание полиолов липидно-белкового остатка биопрепарата «Эпсорин»

Table 5

The content of polyols of the lipid-protein residue of the biological product «Epsorin»

Соединение	Концентрация, усл. ед/г _{эпсорина}	
	Л	Т
Глицерин	4,52	2,72
Этиленгликоль	0,23	0,11
Мио-инозитол	3,69	3,14

работкой. Отмечается высокое содержание заменимых и незаменимых аминокислот, полиолов, органических, неорганических и жирных кислот в липидно-белковом остатке «Эпсорин».

Таким образом, липидно-белковый остаток «Эпсорина» может использоваться как биологически активная добавка в косметические средства. Для сохранения биологически активных веществ липидно-белкового остатка «Эпсорина» рекомендуется применять лиофильное высушивание.

Литература

1. Варалаков М.Н. К вопросу изучения пантов // Бюллетень научн.-исслед. хим. фарм. ин-та. 1931. № 4–5. С. 124–126.
2. Алексеева С.Н. Влияние адаптогенов на иммунную и кроветворную системы в условиях радиационного и цитостатического воздействия: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Новосибирск, 1996. 16 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации Роспотребнадзора РФ №77.99.23.3.У.462.1.08 от 28.01.2008.
4. Шеина Н.Е., Шеин А.А., Кузьмина В.Ф., Веденкин В.А., Кершенгольц Б.М. Возобновляемое биосырье Якутии: состав, свойства, биотехнологические аспекты переработки (обзор). Часть 1. Разработки на основе животного сырья // Наука и образование. 2011. № 4. С. 59–64.
5. Кершенгольц Б.М., Ахременко А.К., Рогожин В.В. Способ получения экстракта из пантов оленя // Авт. свидет. РФ №1822785 от 12.10.92 (приоритет от 03.08.1990)
6. Folch J., Lees M., Stanley G. A simple method for total lipid extraction and purification // J. Biol. Chem. 1957. Vol. 226. P. 497–509.
7. York W.S., Darvill A.G., McNeil M., Stevenson T.T., Albersheim P. Isolation and characterization of plant cell walls and cell wall components // Methods in enzymo-

logy. 1986. Vol. 118. P. 3–40. DOI: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(86\)18062-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(86)18062-1)

8. Слепцов И.В., Журавская А.Н. Полисахариды в вегетативной массе *Amaranthus retroflexus*, *Agastache*

rugosa и *Thlaspi arvense* в условиях Центральной Якутии // Химия растительного сырья. 2018. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2018043809>

Поступила в редакцию 08.04.2020

Принята к публикации 18.06.2020

Об авторах

РОЖИНА Сахаяна Михайловна, лаборант, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, sahayana-rozhina@mail.ru;

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, nerohasg@mail.ru;

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, jan43@mail.ru.

Информация для цитирования

Рожина С.М., Слепцов И.В., Журавская А.Н. Химический состав липидно-белковой фракции, выделяемой при производстве биопрепарата «Эпсорин» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 117–122. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-11>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-11

Chemical composition of the lipid-protein fraction separated in the production of Epsorin biopreparation

S.M. Rozhina, I.V. Sleptsov, A.N. Zhuravskaya

Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
sahayana-rozhina@mail.ru

Abstract. The chemical composition of the lipid-protein fraction separated in the production of the biological preparation Epsorin was studied. Epsorin, the drug based on reindeer antlers, is used as an effective medicine for asthenic conditions of various origins, with neurasthenia, neurosis, in postoperative periods, with weakness of the heart muscle, with hypotension; this drug has immunomodulating and radioprotective effect, stimulating and strength-recovering properties, it increases the physical and mental performance. The fractions of lipids, water-soluble substances and hydrolysis products were isolated from the lipid-protein mass by sequential extraction from the residues of the production of Epsorin biopreparation. All fractions obtained were converted to trimethylsilyl (TMS) derivatives. The obtained TMS derivatives were analyzed by means of GC-MS using a MAESTRO 7820/5975 instrument (Russia), built on the basis of an Agilent 7820 gas chromatograph (USA) and an Agilent 5975 mass spectrometric detector. It was shown that the yield of the studied substances was higher after freeze drying than after thermal treatment. A high content of replaceable and irreplaceable amino acids, polyols, organic, inorganic and fatty acids in the «Epsorin» lipid-protein residue was established. Thus, the Epsorin lipid-protein residue can be used as a biologically active cosmetic additive..

Key words: reindeer antlers, lipid-protein fraction, Epsorin, amino acids, fatty acids, organic acids, cosmetics.

Acknowledgements. *The work was performed as part of research VI.62.1. «Development of biological products from tissues of plants and animals of Yakutia based on the study of the peculiarities of their biochemical composition and mechanisms of adaptation to the conditions of the North» (state registration number – AAAA-A17-117020110055-3).*

References

1. Varalakov M.N. K voprosu izucheniya pantov // Byulleten' nauchn. issled. him. farm. in-ta. 1931. No. 4–5. P. 124–126.
2. Alekseeva S.N. Vliyanie adaptogenov na immunitet i krovetvornuyu sistemu v usloviyakh radiatsionnogo i citostatsicheskogo vozdejstviya: Avtoref. dis. ... kand. med. nauk. Novosibirsk, 1996. 16 p.
3. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii Rospotrebnadzora RF №77.99.23.3.U.462.1.08 ot 28.01.2008.
4. Sheina N.E., Shein A.A., Kuz'mina V.F., Vedekina V.A., Kershengol's B.M. Vozobnovlyаемое biosyr'e Yakutii: sostav, svoystva, biotekhnologicheskie aspekty pererabotki (obzor). Chast' 1. Razrabotki na osnove zhivotnogo syr'ya // Nauka i obrazovanie. 2011. No. 4. P. 59–64.
5. Kershengol's B.M., Ahremenko A.K., Rogozhin V.V. Sposob polucheniya ekstrakta iz pantov olenya / Avt. svdet. RF No. 1822785 ot 12.10.92 (prioritet ot 03.08.1990)
6. Folch J., Lees M., Stanley G. A simple method for total lipid extraction and purification // J. Biol. Chem. 1957. Vol. 226. P. 497–509.
7. York W.S., Darvill A.G., McNeil M., Stevenson T.T., Albersheim P. Isolation and characterization of plant cell walls and cell wall components // Methods in enzymology. 1986. Vol. 118. P. 3–40. DOI: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(86\)18062-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(86)18062-1)
8. Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N. Polisaharidy v vegetativnoj masse *Amaranthus retroflexus*, *Agastache rugosa* i *Thlaspi arvense* v usloviyakh Central'noj YAKUTII // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2018. No. 4. P. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.2018043809>

About the authors

ROZHINA Sakhayana Mikhailovna, assistant, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, sahayana-rozhina@mail.ru;

SLEPTSOV Igor Vitalievich, candidate of biological sciences, researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 41 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, neroxasg@mail.ru;

ZHURAVSKAYA Alla Nikolaevna, doctor of biological sciences, professor, chief researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenin pr., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, jan43@mail.ru.

Citation

Rozhina S.M., Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N. Chemical composition of the lipid-protein fraction separated in the production of Epsorin biopreparation // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 117–122. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-11>

Редкая аномалия «ветвистость» *Typha grossheimii* Pobed. гидрофильного рода *Typha* L. (Typhaceae)

А.Н. Краснова^{1,*}, Т.Н. Польшина^{2,**}

¹Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

*krasa@ibiw.yaroslavl.ru

**tanja0701@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен тип аномалии «ветвистость» – разделение цветоложа пестичной части соцветия *Typha grossheimii* гидрофильного рода *Typha* (Typhaceae). На основании анализа пестичных цветков установлено, что в нарушенных местообитаниях р. Кагальник (Ростовская область, Азовский р-н) отмечается спонтанное расширение ареала *T. pontica* в связи с интенсификацией антропогенного фактора. Это представляет интересное проявление процесса трансформации, т. е. выборочного уничтожения или замещения «древних» (сарматских) видов новыми техногенными структурами.

Ключевые слова: аномалия ветвистость, *Typha grossheimii*, р. Кагальник, дельта р. Дон.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания тема № АААА-А1811801260095-4) при частичной поддержке РФФИ (проект № 22-22-22222). Тема № 0122-2015-0002. Систематика, разнообразие и филогения водных автотрофных организмов России и других регионов мира, а также в рамках проекта РФФИ № 18-05-80022 «Реконструкция и изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влиянием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона».

Район исследования представляет собой техногенный ландшафт, развивающийся на месте сравнительно однородных степных участков в дельте р. Дон, которые унаследовали сублитораль (супралитораль) Азовского (Меотического) моря. В историко-геологическом прошлом (плейстоцене) воды р. Дон неоднократно соединялись, «сливались» с морским заливом Манычем, который периодически превращался в пролив между Черным и Каспийским морями. В периоды «слияний» или водных трансгрессий гидрофильные флоры Нижнего Дона и Нижней Волги объединялись. На эти события указывает фоссильная водно-болотная растительность древнеэвксинских (черноморских) отложений. В этих отложениях были обнаружены многие реликтовые виды *Salvinia natans* (L.) All., *Najas marina* L., *N. minor* All., *Stratiotes aloides* L., *Nymphaea alba* L. и другие, населяющие Древнеэвксинское озеро-море (Черное море) и известные из верхнеплиоценовых отложений Западной Сибири, Нижней Волги, Северного Прикаспия и Воронежской, Тамбовской и Ростовской областей [5]. Вполне возможно, что в этот период

многие центрально-азиатские (среднеазиатские) рогозы были широко распространены в бассейнах рек Восточной Европы.

В голоцене ландшафт района исследования сильно изменился с появлением в этих местах человека и его хозяйственной деятельности [3]. Впоследствии с развитием этих территорий водные (гидрофильные экосистемы) находились под постоянным антропогенным прессом, в результате сброса промышленных, сельскохозяйственных сточных вод, рекреаций и других загрязнений, что отрицательно сказалось на сохранении многих прибрежно-водных растений, в том числе рогозов. Строительство водохранилищ и каналов существенно изменило однородные донские ландшафты и ускорило экспансии многих гидрофитов в природно-техногенные [6, 18], сравнительно, антропогенные по Н.Ф. Реймерсу [20] территории. На такой территории, на берегу р. Кагальник в дельте Дона, находится село Кагальник с удивительной историей пестро-этнического миграционного приречного заселения. Река Кагальник – типичная малая степная река [21]. На ее правом берегу находится современный ур-

банизированный поселок, где «транспортные узлы» являются основными загрязнителями растительности, в том числе прибрежно-водной. Близкое соседство с р. Дон (2 км) способствовало заносу многих растений, в том числе и рогозов.

С расширением экономических и туристических связей в староосвоенных регионах происходило возрастание миграционных потоков населения, а соответственно увеличение проникновения активных (заносных) видов растений, в том числе и рогозов, которые трансформировались в результате тысячелетней истории хозяйственного освоения. Прибрежно-водная растительность с «закрытием» в миоцене–плиоцене Манычского пролива обогащалась за счет средиземноморской экспансии рогозов (примером может служить *T. australis* Schum. et Thonn, который «сорничает» в прибрежьях Средиземного моря). В Причерноморье и Приазовье этот вид давно натурализовался в нарушенных местообитаниях пойм рек, где образовал гибриды с *T. angustifolia* L. Со спадом промышленности в 90-е годы происходило расширение ареала активного нижнедонского гибрида *T. × psevdontanaitica* A. Краснова [13]). В связи с увеличением туристического транспортного потока из разных регионов Российской Федерации расширились зоны рекреаций южных приморских территорий – это своеобразные пути внедрения новых видов, в том числе рогозов со сходной экологической нишей. Нарушенная околосредовая среда при потеплении климата формирует из внедрившихся видов «новых» аборигенов, участвующих в образовании антропогенных гидрофильных сообществ. Подобную картину наблюдали в 1974 г. А.И. Кузьмичев и А.Н. Краснова на евпаторийском побережье. К сожалению, повсеместное отсутствие системы мониторинга за появлением и натурализацией «вселенцев» рогозов привело к появлению аномалий.

Цель – рассмотреть аномалию «ветвистость» или разделение цветоложа соцветия *T. grossheimii* Pobed. [19].

Материал и методы

Материалом для анализа типа аномалии «ветвистость» или разделение цветоложа послужил гербарий в количестве 10 экземпляров пестичных початков (тератоморф), выявленный в популяциях рода *Typha* на нарушенных местообитаниях р. Кагальник (Ростовская область). Используются собственные многолетние исследования по

типам аномалий видов рода *Typha* на водоемах России [9–15]. Приведены аномальные структурные изменения в пестичной части *T. grossheimii* (см. рисунок). Рисунок составлен из изображений аномальной структуры *T. grossheimii*, полученных с помощью микроскопа Olympus (увеличение 30).

Результаты исследования

В 2017–2018 гг. были исследованы заросли рогозов на правом берегу р. Кагальник в окр. с. Кагальник, Азовский район, Ростовская область. В результате исследования был обнаружен сарматский вид *T. grossheimii* с редкой аномалией «ветвистость» – разделение цветоложа пестичной части соцветия. Этот тип аномалии встречается редко (см. рисунок, а). Ниже приводим описание аномальной пестичной структуры *T. grossheimii*.

Описание. Аномальная пестичная структура является «боковой» по Ал.А. Федорову [25]. Она состоит из двух частей – основной и боковой. Боковая пестичная структура в центре общего цветоложа (см. рисунок, а), короткая 10 см длиной, 1 см шириной, бледно-коричневая. Основная аномальная пестичная структура 25 см длиной, 2 см шириной, цилиндрическая, бледно-коричневая, ячеистая с поверхности. На цветоложе расположены разного рода пестичные цветки: плодущие, стерильные и деградированные. **Плодущие цветки** 6 мм длиной с длинным столбиком и линейным, коротким, обламывающимся рыльцем (см. рисунок, ж). Завязь веретеновидная с узко-ячеистым пленчатым околоплодником. Плодик вальковатый, слегка согнутый, поверхность ячеистая, с пленчатой коронкой сверху (см. рисунок, з). Волоски гинофора многочисленные, на вершине часто расширенные, равны белым, прозрачным, продолговато лопатковидным прицветничкам с карминно-красными рафидами. Много нитевидных сверху расширенных прицветничков с карминно-красными рафидами (см. рисунок, в–д). **Стерильные цветки** с длинным столбиком, переходящим в узколинейное рыльце, со стерильной завязью (см. рисунок, е). **Деградированные цветки** – с длинным столбиком; обламывающимся рыльцем; пленчатым, узко-ячеистым околоплодником и недоразвитым плодиком (см. рисунок, н). **Бесплодные пестичные цветки** (карподии) собраны в пучки по 2–3, среди них встречаются: деградированные, одиночные булавовидные с многочисленными



Аномалия «ветвистость» пестичной части соцветия *T. grossheimii*:

a — общий вид аномальной структуры; *б* — прямые пыльники недоразвитых тычинок; *в, з* — волоски гинофора; *д* — прицветничек; *е* — стерильный цветок с белыми прицветничками; *жс* — плодущий цветок; *з* — плодик; *и-м* — бесплодные цветки (карподии); *н* — деградированный цветок

The anomaly of the pestichnoj part of the branchiness inflorescences *T. grossheimii*:

a — the general appearance of the anomalous structure; *б* — direct anthers aborted stamens; *в, з* — gynophore hairs; *д* — pricvetnichki; *е* — sterile flower with white pricvetnichkami; *жс* — plodushij flower; *з* — plodik; *и-м* — the sterile flowers (karpodii); *н* — degraded flower

расширенными вверху волосками гинофора с карминно-красными рафидами (см. рисунок, *и-м*). Совершенно случайно были обнаружены две тычинки на коротких ножках с прямыми пыльниками и неразвившейся пылью (см. рисунок, *б*). Немногочисленные экземпляры *T. grossheimii* на правом берегу р. Кагальник угнетаются активно расселяющимся *T. pontica* Klok. fil et Krasnova, который в нарушенных местообитаниях образует

гибриды и аномалии со многими региональными видами [8].

Обсуждение результатов

В ранних работах [10, 12, 15] нами обсуждался тип аномалии ложная «ветвистость» в роде *Typha*, которая характерна для соцветий сложного колоса, сережки и початка. К этой аномалии относится и разделение цветоложа у *T. grosshei-*

mii [25]. Разделение цветоложа пестичной части соцветия и образование боковой структуры встречено впервые Т.Н. Польшиной в зарослях рогоза р. Кагальник. Подобные изменения были описаны в литературе у родов *Primula* L., *Lonicera* L., у видов семейства *Asteraceae* *Calendula officinalis* L., *Tagetes erecta* L., *Senecio cruentus* DC., *Echinops karatavicus* Rgl. et Schmalh. [23–26]. Аномалиям в семействе *Rosaceae* посвящены работы Е.А. Андреевой и А.А. Нотова [2]. Следует заметить, что со времен Карла Линнея известен огромный пласт работ (XVII–XXI вв.) по уродливости цветков из разных семейств. В большинстве случаев исследователей привлекали и привлекают в настоящее время внимание нетипичные цветки с нарушенной симметрией. Углубленные исследования проводились с целью получения новых сортов социально значимых культур в сельском хозяйстве.

Появление терат в *Typha*, в местах рекреаций исследуемого района, позволило впервые провести всестороннее изучение тычиночной и пестичной части соцветия, рассмотреть реверсии аномальных структур. Природные и искусственные водоемы юга европейской России, в том числе побережья р. Кагальник (Азовский район), находятся под сильным прессом человеческой деятельности. В таких районах наблюдается медленная, малоуловимая антропогенная миграция не только «флоры», но и химических элементов [7]. Загрязнение вод неуклонно способствует непрерывному увеличению популяций «техногенных» форм в семействе *Typhaceae*, что способствует возникновению совершенно новых структур. Такой прогрессивный путь эволюции, связанный с филогенезом и тератологическим видообразованием, отмечали многие ученые [1, 22, 23–26]. Эти процессы происходят постоянно и закрепляются наследственно. Механизмы приспособления к техногенной среде способствуют выживанию популяций. В результате адаптаций создаются предпосылки формирования новой техногенной флоры. Авторы отмечают и другую сторону изменений – это возникновение «вредных», нежизнеспособных структур, которые уменьшают шансы на выживание, т. е. не все аномалии бывают прогрессивными. Разделение цветоложа пестичного початка *T. grossheimii* можно интерпретировать и как деградацию соцветия и отмирание вида.

Заключение

На правом берегу р. Кагальник (Ростовская область, Азовский р-н) в нарушенных местообитаниях (под мостом с. Кагальник) в зарослях рогозов обнаружена редкая аномалия «ветвистость» или разделение цветоложа пестичной части соцветия *T. grossheimii*, сарматского по происхождению вида. Следует отметить, что вид *T. grossheimii* [19] и редкую аномалию «ветвистость» впервые приводим для водоемов Нижнего Дона. Ближайшие местонахождения *T. grossheimii* известны были из Республики Украина (Приазовье) [8, 16], Российской Федерации (Причерноморье) [7, 17], из Прикаспия (Нижняя Волга) [4]. *T. grossheimii* приводили для гидрофильной флоры Каспийского бассейна и Центральной Азии (Средней Азии). В побережья Азовского (Меотического) моря вид, по-видимому, проник во время регрессии системы морей океана Тетис. Возможно также и вторичное его расселение в исследуемом районе в связи со строительством водохранилищ и каналов в бассейне р. Дон. Немногочисленные популяции *T. grossheimii* в настоящее время угнетаются *T. pontica* и его гибридами, который спонтанно расширяет ареал.

Литература

1. Агаев М.Г. О многообразии видообразовательных процессов // Ботан. журн. 1968. Т. 53, № 1. С. 23–33.
2. Андреева Е.А., Нотов А.А. Аномальные варианты строения цветков и соцветий *Carex hirta* L. // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2008. Вып. 2, № 5 (22). С. 143–146.
3. Величко А.А. Эволюционная география: проблемы и решения. М.: ГЕОС, 2012. 563 с.
4. Голуб В.Б., Лактионов А.П., Бармин А.Н., Пилипенко В.Н. Конспект флоры сосудистых растений долины Нижней Волги. Тольятти: Российская академия наук, Ин-т экологии Волжского бассейна: Астраханский госпед. ун-т, 2002. 50 с.
5. Горецкий Г.И. Аллювиальная летопись Велико-го Пра-Днепра. М.: Наука, 1970. 492 с.
6. Дзержинская И.С. Современные представления о техногенных экосистемах // Проблемы и перспективы реабилитации техногенных экосистем: Материалы Международной научно-практической конференции. Астрахань 20–24 сентября 2004 г. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2005. С. 6–12.
7. Зернов А.С. Иллюстративная флора юга Российского Причерноморья. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 588 с. (*Typhaceae*, С. 86–87)

8. Клоков В.М., Краснова А.Н. Заметка об украинских рогозах (*Typha* L.) // Укр. ботан. журн. 1972. Т. 29, № 6. С. 687–695.
9. Краснова А.Н., Кузьмичев А.И. Тераты (морфологические аномалии) в роде рогоз – *Typha* L. // Биология внутренних вод. 2005, № 2. С. 7–11.
10. Краснова А.Н. Аномалии рогозов (*Typha*, *Typhaceae*) в малом антропогенном водоеме бассейна Верхней Волги // Биология внутренних вод, 2014. № 3. С. 73–78. DOI: 10.1134/S199508291603013
11. Краснова А.Н. Эволюция и тератогенез в роде *Typha* L. Відновлення порушених природних екосистем: Матеріали Третьої міжнародної наукової конференції (м. Донецьк, 7–9 жовтня 2008 р.). Донецьк, 2008. С. 288–292.
12. Краснова А.Н. Аномалии у рогозов Дальнего Востока России и Вьетнама // Наука и образование. 2015. № 5. С. 105–108.
13. Краснова А.Н., Польшина Т.Н. Гибриды и аномалии рогозов (*Typha* L., *Typhaceae*) юга Европейской России // Наука и образование, 2016. № 2. С. 118–122.
14. Краснова А.Н., Польшина Т.Н. Аномалия пролификация у видов рода *Typha* L. крайнего юга Европейской России // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. Тольятти, 2017. Т. 26, № 2. С. 95–100.
15. Краснова А.Н., Ефремов А.Н., Польшина Т.Н. Аномалии в соцветии семейства рогозовые *Typhaceae* Juss. // «Экологические проблемы бассейнов крупных рек – 6». Материалы международной конференции приуроченной к 35-летию Института экологии Волжского бассейна РАН и 65-летию Куйбышевской биостанции. 15–19 октября 2018, Тольятти, Россия. Тольятти: Анна, 2018. С. 151–153. DOI: 10.24411/9999-002A-2018-10062.
16. Коломийчук В.П. Конспект флоры береговых экосистем Азовского моря / Под. ред. Т.Л. Андриенко. Киев: Альтерпресс, 2012. 300 с.
17. Леонова Т.Г. Порядок Рогозовые (*Typhales*) / Жизнь растений. М.: Просвещение, 1982. Т. 6. С. 461–466.
18. Моторина Л.В. Ландшафтно-экологический подход к оптимизации природно-техногенных комплексов. Новосибирск: Наука, 1985. С. 12–23.
19. Победимова Е.Г. О новых видах рода *Typha* L. // Ботанич. матер. Герб. БИН АН СССР. М., Л.: АН СССР, 1949. Т. 11. С. 3–17.
20. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь. М.: Мысль, 1990. 637 с.
21. Социально-исторический портрет села Приазовья: Кагальник / Г.Г. Матишов, Е.Ф. Кринко, Н.А. Власкина, Е.А. Бритвина. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 208 с.
22. Тахтаджян А.Л. Грани эволюции. СПб.: Наука, 2007. 326 с.
23. Федоров А.А. Аномалии у некоторых сложноцветных и их значение для понимания путей формирования соцветия сем. *Compositae* // Ботан. журн. 1950. Т. 35, № 2. С. 148–161.
24. Федоров А.А. Прогрессивный характер аномалий в строении цветка *Lonicera Alberti* Rgl. // Ботан. журн. 1951. Т. 36, № 2. С. 183–185.
25. Федоров А.А. Тератология и формообразование у растений. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 28 с.
26. Федоров А.А. Тератогенез и его значение для формо- и видообразования у растений // Проблема вида в ботанике. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 212–222.

Поступила в редакцию 05.03.2020
Принята к публикации 21.05.2020

Об авторах

КРАСНОВА Алла Николаевна, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-3705-1042>, krasa@ibiw.yaroslavl.ru;

ПОЛЬШИНА Татьяна Николаевна, младший научный сотрудник, Южный научный центр РАН, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, Россия, tanja0701@mail.ru.

Информация для цитирования

Краснова А.Н., Польшина Т.Н. Редкая аномалия «ветвистость» *Typha grossheimii* Pobed. гидрофильного рода *Typha* L. (*Typhaceae*) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 3. С. 123–129. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-12>

A rare branching anomaly of *Typha grossheimii* Pobed. of the hydrophilic genus *Typha* L. (Typhaceae)

A.N. Krasnova^{1,*}, T.N. Polshina^{2,**}

¹Papanin Institute of Biology of Inland Waters, RAS, 152742 Borok, Yaroslavl Region, Nekouz District, Russia

²Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, Russia

*krasa@ibiw.yaroslavl.ru

**tanja0701@mail.ru

Abstract. The anomaly of branchiness type is considered, which is a separation of floral receptacle in the pistillate part of the inflorescences of *Typha grossheimii* of hydrophilic genus *Typha* (Typhaceae). It was established on the basis of the analysis of pistillate flowers that spontaneous expansion of the range of *T. pontica* is detected in the disturbed habitat of the Kagalnik river (Rostov Region), in connection with intensification of the anthropogenic factor. This fact may be a sign of technogenesis, resulting in the phenomena of this kind. At the same time, this is an interesting attribute of transformation process, i.e. selective destruction or substitution of so-called ancient (Sarmatian) species by new technogenic structures.

Key words: branchiness anomaly, *Typha grossheimii*, the Kagalnik river, the delta of the Don river.

Acknowledgements. This work was carried out within the limits of the state task FANO Russia (a theme № 1111-1111-1111) with particulate support of the Russian Federal Property Fund (The project No - 22-22-22222). Theme № 0122-2015-0002 «Systematik, A diversity and filogenia water avtotrophnich organisms Russia and other regions of the world», as well as in the framework of the RFBR No-18-05-80022 «Reconstruction and change of paleolandscapes in the Holocene epoch under the influence of natural and anthropogenic processes on the example of the water area of the Taganrog Bay and the adjacent part of the Don Delta».

References

1. Agayev M.G. Diversity processes // Botan. Journ. 1968. Vol. 53, No. 1. P. 23–33.
2. Andreeva E.A., Notov A.A. Anomaly variants of the structure of flowers and inflorescence of *Carex hirta* L. // Vestn. TvGU. Ser. Biology and Ecology. 2008. Vol. 2, No. 5 (22) P. 143–146.
3. Velichko A.A. Evolutionary geography: problems and solutions. M.: GEOS, 2012. 563 p.
4. Golub V.B., Laktionov A.P., Barmin A.N., Pilipenko V.N. Abstract vascular plant flora of the lower Volga Valley. Toliatti: Russian Academy of Sciences, Institute of ecology of the Volga basin, the Astrakhan gosped. Un-t, 2002. 50 p.
5. Gorezki G.I. Alluvial Chronicle Great Gov-Dnieper. M.: Nauka, 1970. 492 p.
6. Dzerzhinskaya I.S. Modern conceptions of man-made ecosystems // Problems and prospects for rehabilitation of the man-made ecosystems: the materials of the international scientifically-practical conference. Astrakhan 20–24, september 2004. Astrakhan: Izd-vo AGTUP, 2005. P. 6–12.
7. Zernov A.S. Illustrative flora of Southern Russian Black Sea coast. M.: Association of scientific publications KMK, 2013. 588 p. (Typhaceae. P. 86–87)
8. Klovov V.M., Krasnova A.N. Note about Ukrainian cattail (*Typha* L.) // Botan. journ. V. 29, No. 6. P. 687–695.
9. Krasnova A.N., Kuzmichev A.I. Teraty (morphological anomalies) in the genus *Typha* L. // Biology of inland waters. 2005. No. 2. P. 7–11.
10. Krasnova A.N. Anomalies rogozov (*Typha*, Typhaceae) in a small man-made pond basin Upper Volga // Biology of inland waters. 2014. No. 3. P. 73–78. DOI: 10.1134/S1995082916030135.
11. Krasnova A.N. Evolution and teratogenesis in the genus *Typha* L. Vidnovlennja porushenih prirodnih bioecosystem: Tretoï Materiali mizhnarodnoï naukovoï konferencii (m. Donetsk, 7-9 zhovtnja 2008) Donetsk, 2008. P. 288–292.
12. Krasnova A.N. Rogozov have anomalies of the far east of Russia and Vietnam // Nauka i obrazovanie. 2015. No. 5. P. 118–122.
13. Krasnov A.N., Pol'shina T.N. Hybrids and anomalies rogozov (*Typha*, Typhaceae) South of European Russia. Yakutia // Science and Education, 2016, №. 2 (82). P. 118–122.
14. Krasnova A.N., Pol'shina T.N. Prolifikazija anomaly from species of the genus *Typha* L. the extreme south of European Russia/Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. Toliatti, 2017. V. 26, No. 2. P. 95–100.

15. Krasnova A.N., Efremov A.N., Pol'shina T.N. Abnormal stalk rogozovye family Typhaceae Juss. // Ecological problems of major river basins-6. Proceedings of the international conference dedicated to the 35 anniversary of the Institute of ecology of the Volga basin wounds and 65-year anniversary of the Kuibyshev station. 15–19 October 2018, Tolyatti, Russia. Anna Tolyatti. 2018. P. 151–153. DOI: 10.24411/9999-002A-2018-10062.
16. Kolomiychuk V. P. Abstract flora of the coastal ecosystems of the sea of Azov/under / Ed. T.L. Andrienko. Kiev: Alterpress, 2012. 300 p.
17. Leonova T.G. Order Rogozovye (Typhales) // Plant Life. 1982. V. 6. P. 461–466.
18. Motorina L.V. Landscape-ecological approach to optimize natural-technogenous systems. Novosibirsk: Nauka, 1985. P. 12–23.
19. Pobedimova E.G. New types of genus *Typha* L. // Botanich. mater. The coat of arms. BIN of the USSR Academy of Sciences. M., L. 1949. V. 11. P. 3–17.
20. Reimers N.F. Natural Resources: Glossary. M.: Mysl, 1990. 637 p.
21. Socio-historical portrait of the village: Kagalnik / G.G. Matishov, E.F. Krinko, N.A. Vlaskina, E.A. Britvina. Rostov-on-Don: Izd-vo JuNC RAS, 2009. 208 p.
22. Tahtadzhjan A. L. Brink of evolution. SPb.: Science, 2007. 326 p.
23. Fedorov A.A. Anomalies in some Asteraceae and their significance for understanding the ways of formation of inflorescences. Compositae // Botan. Journ. 1950. V. 35, No. 2. P. 148–161.
24. Fedorov A.A. Progressive nature of anomalies in anatomy of the flower of *Lonicera Alberti* Rgl. // Botan. Journ. 1951 V. 36, No. 2. P. 183–185.
25. Fedorov A.A. Teratology and forming plants. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1958. 28 p.
26. Fedorov A. A. Teratogenez and its value for fo and speciation in plants // Problem types in Botany. M.; L.: Izd-vo an SSSR, 1958. P. 212–222.

About the authors

KRASNOVA Alla Nikolaevna, doctor of biological sciences, senior researcher, Institute for Biology of Inland Waters RAS, Borok, Yaroslavl Region, 152742, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3705-1042>, krasa@ibiw.yaroslavl.ru;

POLSHINA Tatyana Nikolaevna, junior researcher, the Southern Scientific Centre RAS, Rostov-on-Don 344006, 41 Chekhov ave., Russia, tanja0701@mail.ru.

Citation

Krasnova A.N., Pol'shina T.N. A rare branching anomaly of *Typha grossheimii* Pobed. of the hydrophilic genus *Typha* L. (Typhaceae) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 3. P. 123–129. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-12>

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 691.175.2

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-X

Разработка износостойких полимер-полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ

С.Н. Данилова^{1*}, С.Б. Ярусова^{2,3**}, А.А. Охлопкова¹, П.С. Гордиенко², С.А. Слепцова¹,
И.Ю. Буравлев^{2,4}, Ванг Лянсай⁵, Цзяо Ян⁵

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

²Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

³Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия

⁴Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

⁵Пекинский исследовательский центр радиационной модификации материалов, Пекин, КНР

*dsn.sakhayana@mail.ru, **yarusova_10@mail.ru

Аннотация. В работе представлены исследования свойств и структуры полимер-полимерных композитов (ППК) на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (н-СВМПЭ), наполненного радиационно-модифицированным сверхвысокомолекулярным полиэтиленом (х-СВМПЭ). Для обеспечения радиационной сшивки макромолекул полиэтилена использовали γ -излучение (источник ^{60}Co). Смеси получали по стандартной технологии переработки СВМПЭ. Были исследованы физико-механические и трибологические характеристики полученных полимер-полимерных композитов, установлено снижение скорости изнашивания в 12 раз относительно ненаполненного н-СВМПЭ. При этом деформационно-прочностные показатели полимер-полимерного композита, при содержании до 20 масс.% х-СВМПЭ, существенно не изменяются и остаются на уровне исходной полимерной матрицы. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что х-СВМПЭ распределен в объеме исходного полимера неравномерно. Поскольку порошок х-СВМПЭ не плавится при температуре переработки н-СВМПЭ, он находится в объеме матрицы в виде несвязанных отдельных частиц, что приводит к «структурной фрагментации» композиционного материала. Методом ИК-спектроскопии зарегистрировано наличие полос поглощения, относящихся к валентным колебаниям кислородных групп (C-O и C=O), что свидетельствует о протекании окислительных процессов в х-СВМПЭ при переработке. Для повышения физико-механических свойств ППК использовали армирующий волокнистый наполнитель (воластонит), что обеспечивает повышение прочности при растяжении на 15 % и модуля упругости на 50 % ППК.

Ключевые слова: Полимер-полимерный композит, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, радиационно-модифицированный сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полимерный композиционный материал (ПКМ), воластонит.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР № FSRG-2020-0017 и РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-50017 (синтез и исследования по влиянию воластонита на физико-механические и триботехнические свойства ППК). В исследовании было использовано оборудование ЦКП «Дальневосточный центр структурных исследований» (Институт химии ДВО РАН, Владивосток) и комплекс испытательного оборудования Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Введение

В связи с интенсивным развитием Арктики необходимость создания новых материалов, обеспечивающих надежную эксплуатацию технических средств в экстремальных климатических усло-

виях, становится актуальной задачей [1]. Замена традиционных деталей узлов трения и уплотнительных элементов горно-добывающей техники и транспортных средств на полимерные композиционные материалы (ПКМ) обусловлено их

высокой износо-, агрессивно-, морозостойкостью в сочетании с эластичностью и прочностью, не уступающим по эксплуатационным характеристикам даже некоторым сплавам и металлам. Одной из морозо- и износостойких полимерных матриц для изготовления высокопрочных композиционных материалов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Уникальное сочетание свойств СВМПЭ, таких как низкий коэффициент трения, низкая температура хрупкости, ударостойкость, химическая инертность, стойкость к растрескиванию и истиранию способствует его эффективному применению для изготовления конструкционных материалов, эксплуатируемых в экстремальных условиях [2, 3].

В последние годы в материаловедении возрастает интерес к разработке полимер-полимерных композиционных (ППК) материалов, в которых в качестве матрицы и наполнителя выступают термопластичные полимеры [4]. В качестве такой системы в данной работе исследован ППК на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (н-СВМПЭ), наполненного радиационно-сшитым сверхвысокомолекулярным полиэтиленом (х-СВМПЭ). Известно [5], что радиационную сшивку СВМПЭ проводят в целях повышения твердости и улучшения износостойкости изделий на его основе. В работе [6] установлено, что введение в исходный СВМПЭ 25 масс.% х-СВМПЭ, сшитого с применением γ -излучения (доза 150 кГр в атмосфере азота), приводит к повышению износостойкости на 130 %. Таким образом, при создании триботехнических материалов перспектива использования х-СВМПЭ в качестве наполнителя для улучшения трибологических параметров исходного СВМПЭ представляет научный и практический интерес. Однако основным недостатком использования в целом радиационно-сшитого СВМПЭ в качестве матрицы является снижение значений относительного удлинения, прочности при растяжении и сопротивления к образованию трещин [7, 8]. В целях улучшения деформационно-прочностных характеристик в полимерную матрицу вводят минеральные волокна, например, волластонит [9]. Благодаря физико-химическим свойствам и игольчатой форме частиц с высоким фактором анизотропии, волластонит обеспечивает лучшую передачу напряжения от полимера к наполнителю при воздействии внешней нагрузки, что приводит к повышению механических свойств ПКМ.

Преимущество использования комбинированных наполнителей для улучшения свойств ПКМ

состоит в том, что каждый из вводимых наполнителей оказывает различное влияние на полимерную матрицу. Так в работе [10] было показано, что комбинированный наполнитель в виде углеродного волокна и вермикулита значительно повышает механические свойства и улучшает износостойкость ПКМ на основе политетрафторэтилена. Таким образом, совместное использование наполнителей различной природы позволяет добиться необходимого уровня эксплуатационных свойств ПКМ.

Целью данной работы является исследование влияния х-СВМПЭ и волластонита на физико-механические и триботехнические свойства ПКМ на основе СВМПЭ.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран н-СВМПЭ марки Celanese GUR-4022 (Китай) с молекулярной массой $5,3 \times 10^6$ г/моль. Радиационно-модифицированный х-СВМПЭ (M = от $5,5 \times 10^6$ до $6,0 \times 10^6$ г/моль) был предоставлен Пекинским исследовательским центром радиационной модификации материалов и модифицирован γ -излучением от источника ^{60}Co ($3,7 \cdot 10^{16}$ Бк) в атмосфере азота при комнатной температуре.

В качестве армирующего наполнителя использовали волластонит триклинной модификации с удельной поверхностью $26,4 \text{ м}^2/\text{г}$, полученный методом автоклавного синтеза при температуре 220°C в многокомпонентной системе $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} - \text{KOH} - \text{H}_2\text{O}$ [11, 12].

Полимер и наполнители смешивали в лопастном смесителе в сухом виде при скорости вращения ротора 1200 об./мин. Далее композиционную смесь перерабатывали в готовые образцы методом горячего прессования при температуре 175°C , удельном давлении 10 МПа, выдержкой в течение 20 мин с последующим охлаждением под прессом до комнатной температуры. Состав ПКМ и массовая доля содержания в них наполнителей приведены в табл. 1.

Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве композитов исследовали на разрывной машине Shimadzu AGS-J (Япония) по ГОСТ 11262 при скорости движения подвижных захватов 50 мм/мин. Модуль упругости при растяжении определяли согласно ГОСТ 9550 при скорости движения подвижных захватов 0,5 мм/мин. Все исследования проводили при комнатной температуре.

Триботехнические параметры определяли на трибометре UMT-3 фирмы CETR (США) по схе-

Таблица 1

Состав ПКМ
и содержание в них наполнителей, масс. %

Table 1

The composition of the PCM
and the content of fillers in them, mass. %

Композит	СВМПЭ	х-СВМПЭ	Волластонит
1	100	—	—
2	90	10	—
3	80	20	—
4	70	30	—
5	60	40	—
6	50	50	—
7	89,5	10	0,5
8	89	10	1
9	88	10	2
10	85	10	5
11	79,5	20	0,5
12	79	20	1
13	78	20	2
14	75	20	5

ме трения «палец–диск» согласно ГОСТ 11629. Испытания проводили при удельной нагрузке 1,9 МПа и линейной скорости скольжения 0,5 м/с по схеме трения «палец–диск» в течение 3 ч.

Структурные исследования образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-7800F фирмы JEOL (Япония). ИК-спектры образцов снимали на ИК-спектрометре Varian 7000 FT-IR (США) с помощью приставки НПВО в диапазоне 400–4000 см⁻¹.

Обсуждение результатов

Структурные исследования ППК. На ИК-спектрах полимеров (рис. 1) зарегистрированы пики в области 2915 см⁻¹, 2848 см⁻¹ и 1465 см⁻¹, которые относятся к валентным и деформационным колебаниям –CH₂ группы, и пик при 718 см⁻¹, соответствующий маятниковым колебаниям ПЭ [13].

В ИК-спектре ПКМ с добавкой х-СВМПЭ наблюдается наличие пика при 1730 см⁻¹, относящегося к валентным колебаниям С=О карбонильных соединений (кетоны, альдегиды, карбоновые кислоты). Кроме того, обнаружена полоса поглощения в области 1200–1000 см⁻¹, связанная с участием полярной С–О-связи в скелетных колебаниях [14]. Как известно из работы [15], при радиационной модификации СВМПЭ образуются свободные радикалы, и при дальнейшей сшивке макромолекул не все радикалы реагируют друг с другом, остаются так называемые остаточные свободные радикалы. Эти свободные радикалы при переработке ППК инициируют окислительные процессы, что объясняет появление пиков, относящихся к кислородсодержащим группам.

При радиационной модификации СВМПЭ протекают реакции сшивки макромолекул [16, 17], что предполагает образование транс-виниловых групп (пик при 967 см⁻¹). Поэтому в ИК-спектре х-СВМПЭ наблюдается наличие небольших по интенсивности пиков в области 800–1000 см⁻¹, соответствующих колебаниям ненасыщенных групп С=C.

На рис. 2 представлены электронно-микроскопические исследования надмолекулярной струк-

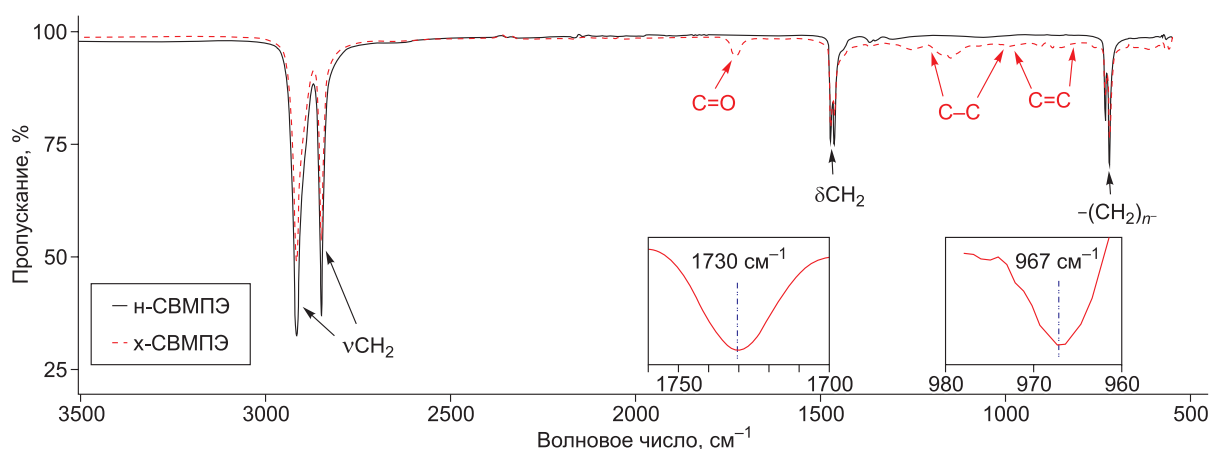


Рис. 1. ИК-спектры композитов на основе исходных полимеров.

Fig. 1. IR spectra of composites based on initial polymers.

туры ППК. Зарегистрировано (рис. 2, а), что структура исходного н-СВМПЭ характеризуется ламеллярным строением. Установлено, что частицы х-СВМПЭ распределены в матрице неравномерно со слабым межмолекулярным взаимодействием между компонентами ППК. Данный факт объясняется различием в температурах плавления х-СВМПЭ и н-СВМПЭ, в работе [6] автор утверждает, что после радиационной сшивки снижается обрабатываемость порошков х-СВМПЭ. Этот факт подтверждается образованием трехмерной сшитой сетки, которая ограничивает подвижность молекулярной цепи, но способствует упрочнению конечных изделий [6]. Поэтому доза радиационной модификации порошка исходного СВМПЭ не должна превышать 100 кГр, так как при дальнейшем увеличении дозы облучения х-СВМПЭ не перерабатывается стандартными методами.

В полимер-полимерных композитах образуется переходный слой (δ_c) между двумя компонентами вследствие взаимной диффузии на границе раздела фаз [18], при этом такой слой отличается по свойствам от исходных полимеров. На микрофотографии ППК, содержащего 20 масс.% х-СВМПЭ, обнаружено наличие такого переходного слоя (рис. 3, а).

Согласно работе Ю.В. Липатова [18], взаимная диффузия полимеров протекает на небольшую глубину и на границе раздела двух фаз снижается поверхностное натяжение. При формировании ППК адсорбционное взаимодействие отдельных компонентов приводит к подавлению структурообразования, что можно объяснить разрыхлением надмолекулярной структуры композита с увеличением содержания х-СВМПЭ (см. рис. 2). В исследуемой системе н-СВМПЭ/х-СВМПЭ наблюдается образование переходного слоя (δ_c), ограниченного с двух сторон, без внедрения структурных элементов друг в друга (т. е. без образования квазипереходного слоя (δ_k), рис. 3, б).

Физико-механические и триботехнические свойства ППК. В таблице 2 приведены результаты исследований физико-механических и триботехнических свойств н-СВМПЭ и ППК, наполненных х-СВМПЭ.

На основании проведенных исследований установлено, что оптимальная концентрация х-СВМПЭ в полимерной матрице составляет 20 масс.%. В этом случае отмечено снижение скорости изнашивания в 12 раз и линейного износа в 2 раза по сравнению с ненаполненным СВМПЭ. Также выявлено повышение модуля упругости на 57 %, при этом значения прочности

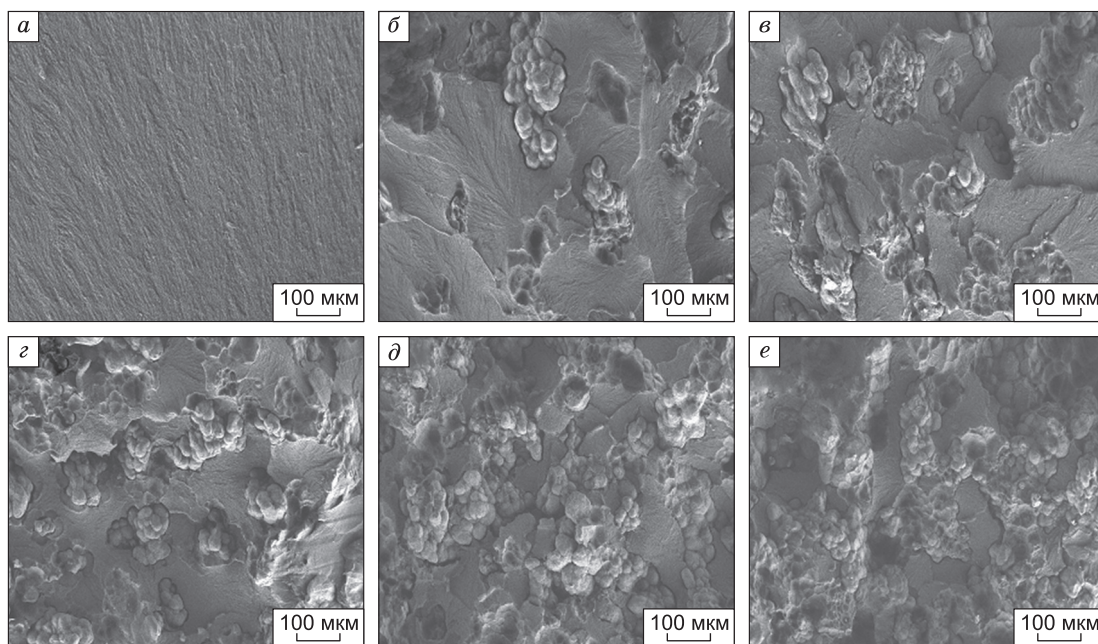


Рис. 2. Надмолекулярная структура ППК в зависимости от содержания х-СВМПЭ: а – исходный н-СВМПЭ; б – 10 масс. %; в – 20 масс. %; г – 30 масс. %; д – 40 масс. %; е – 50 масс. %.

Fig. 2. The supramolecular structure of the PPC based on UHMWPE filled by x-UHMWPE: а – the initial n-UHMWPE; б – 10 mass. %; в – 20 mass. %; г – 30 mass. %; д – 40 mass. %; е – 50 mass. %.

Физико-механические и трибологические свойства н-СВМПЭ и ППК, наполненных х-СВМПЭ

Table 2

Mechanical and tribological properties of n-UHMWPE and PPC filled by x-UHMWPE

Композит	ε_p , %	σ_p , МПа	E_p , МПа	f	L , мм	I , мг/ч
1	311±18	34±2	420±25	0,38±0,01	0,31±0,02	0,12±0,01
2	316±18	36±1	658±39	0,45±0,01	0,12±0,01	0,09±0,01
3	289±13	34±1	542±22	0,43±0,02	0,15±0,02	0,01±0,01
4	249±5	31±1	552±33	0,40±0,02	0,12±0,01	0,08±0,01
5	225±23	29±1	610±27	0,39±0,01	0,14±0,02	0,09±0,02
6	199±17	28±2	619±26	0,37±0,01	0,11±0,01	0,15±0,02

Примечание. ε_p – относительное удлинение при разрыве; σ_p – прочность при растяжении; E_p – модуль упругости при растяжении; f – коэффициент трения; L – линейный износ; I – скорость массового изнашивания.

Note. ε_p – elongation at break; σ_p – tensile strength; E_p – elastic modulus; f – coefficient of friction; I – mass wear rate; L – linear wear.

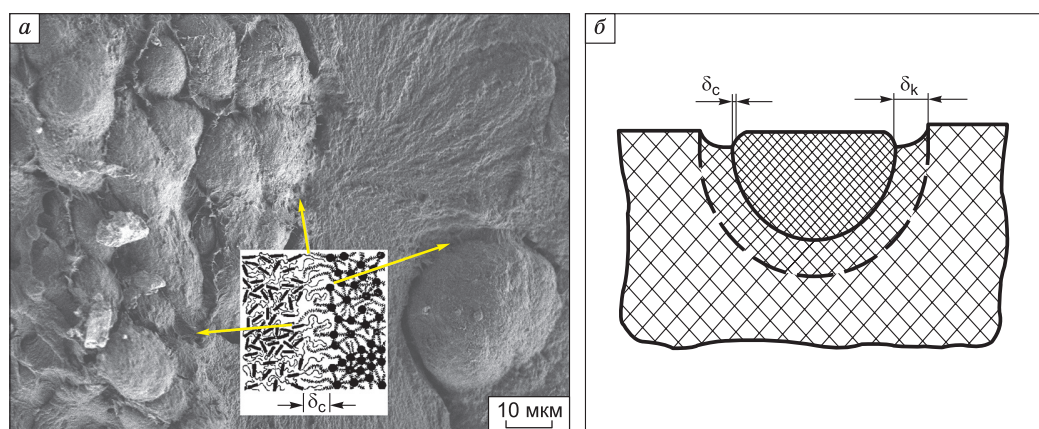


Рис. 3. Образование переходного слоя в системе:

a – микрофотография ППК, наполненного 20 масс.% х-СВМПЭ (х-1000); b – схема формирования переходного слоя ППК.

Fig. 3. The formation of the transition layer in the system:

a – micrograph of the PPC filled by 20 mass.% x-UHMWPE (x-1000); b – scheme for the formation of the transition layer of the PPC.

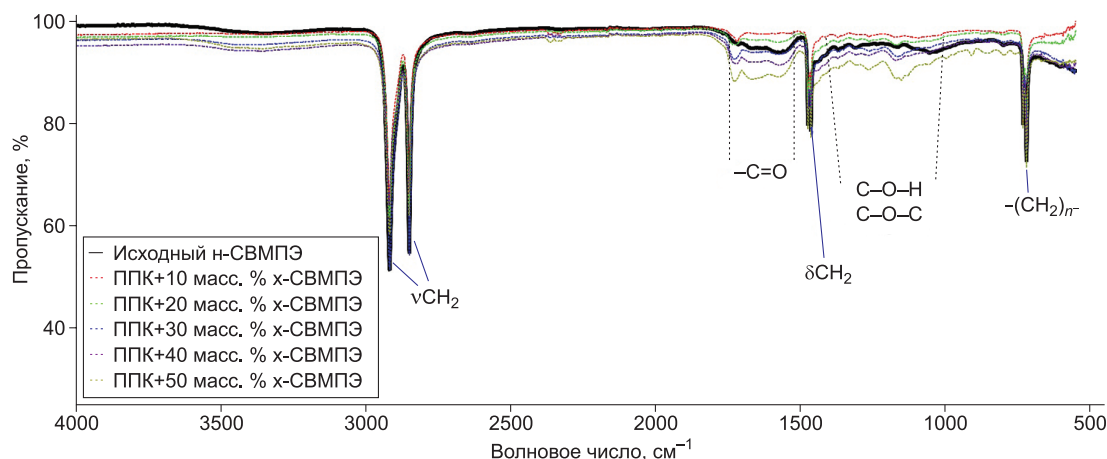


Рис. 4. ИК-спектры поверхности трения н-СВМПЭ и ППК.

Fig. 4. IR spectra of the friction surface of n-UHMWPE and PPC.

и эластичности остаются в пределах ошибки измерения. Улучшение свойств ППК можно объяснить образованием переходного слоя (рис. 3, *a*), который облегчает протекание релаксационных процессов в композитах. Дальнейшее увеличение содержания х-СВМПЭ в ППК приводит к некоторому снижению физико-механических и трибо-технических характеристик. Возможно, это связано с повышением жесткости ППК при превышении критической концентрации сшитого х-СВМПЭ. В этом случае зона пластичности в композите ограничена размерами и характером распределения порошка х-СВМПЭ в непрерывной фазе полимера. Более того, полимер-полимерные системы характеризуются низкими значениями поверхностной энергии, так что смачивание поверхности наполнителя полимерным связующим может быть недостаточным [19]. В этом случае увеличивается доля микроскопических дефектов в межфазной зоне, являющихся концентраторами напряжения.

Повышение износостойкости ППК обусловлено изменением механизма изнашивания. Согласно адгезионному механизму, при трении подповерхностная часть композита переносится на стальную поверхность контртела с образованием тонкой пленки, что снижает износ материала [20].

Были проведены исследования структуры поверхности трения СВМПЭ и ППК методом ИК-спектроскопии (рис. 4). На ИК-спектрах поверхности трения исходного СВМПЭ наблюдается появление новых пиков по сравнению с его ИК-спектром до трения, что свидетельствует о протекании трибоокислительных процессов в процессе изнашивания. Зарегистрированные пики относятся к колебаниям карбонильных групп ($1740\text{--}1520\text{ см}^{-1}$) и полярных связей С-О ($1400\text{--}1000\text{ см}^{-1}$), соответствующих карбоксильным и эпоксидным группам [13, 14].

Показано, что введение 10 масс.% и 20 масс.% х-СВМПЭ приводит к некоторому снижению интенсивности пиков колебания кислородсодержащих групп, что может свидетельствовать об ингибировании окислительных реакций, протекающих в процессе трения. Возможно, сформированный переходный слой (δ_c , рис. 3, *a*) в системе н-СВМПЭ/х-СВМПЭ способствует образованию сильных молекулярных связей с дополнительным упрочнением системы. С увеличением содержания х-СВМПЭ в ИК-спектрах зафиксированы смещение и рост интенсивности полосы поглощения карбонильных и эпоксидных групп, что пред-

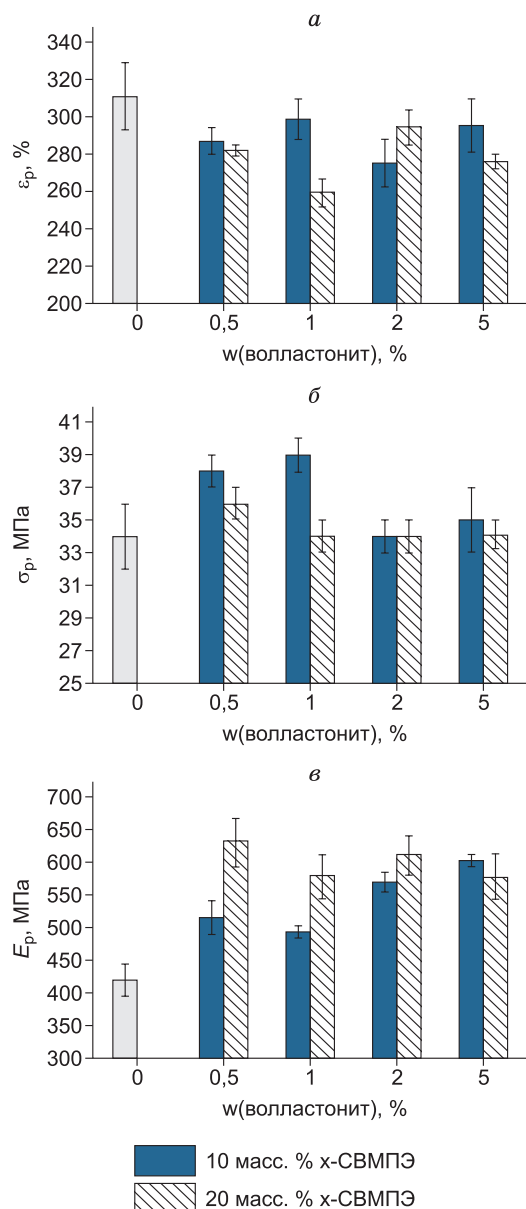


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения при разрыве (*a*), прочности при растяжении (*б*) и модуля упругости при растяжении (*в*) ППК от содержания волластонита.

Fig. 5. Dependence elongation at break (*a*), tensile strength (*б*); elastic modulus (*в*) of PPC on the content of wollastonite.

полагает активное участие свободных радикалов в процессе трибоокисления.

На основании проведенных исследований установлено, что оптимальная концентрация х-СВМПЭ в ППК составляет 10 и 20 масс.%. Новая рецептура полимер-полимерного композита отличается повышенной износостойкостью, но не достигается повышение физико-механических характеристик.

Исследование влияния волластонита на физико-механические и триботехнические свойства ППК. В обзоре [21] по влиянию волластонита на механические свойства термопластов авторы отмечают перспективный путь использования синтетического волластонита в производстве ППК, так как при его синтезе можно варьировать размерами, формой частиц и соотношением длины и диаметра микроволокон, чтобы получить полимерные композиты с желаемыми свойствами. Кроме того, авторами обнаружено, что при введении немодифицированного волластонита в СВМПЭ значительно повышаются предел текучести, модуль упругости и предел прочности при растяжении исходного СВМПЭ. Таким образом, волластонит является универсальным армирующим наполнителем для термопластичных полимеров [22–25].

На рис. 5 представлены результаты исследований физико-механических характеристик ППК в зависимости от содержания наполнителя. Установлено, что ППК на основе н-СВМПЭ и 10 масс.% х-СВМПЭ, содержащий 1 масс.% волластонита, характеризуется повышением прочности при растяжении на 15 % по сравнению с исходным н-СВМПЭ. Также обнаружено, что введение наполнителей в соотношении 20 масс.% х-СВМПЭ и 0,5 масс.% волластонита в полимерное связующее приводит к значительному увеличению значения модуля упругости на 50 % относительно н-СВМПЭ, а по сравнению с аналогичным ППК без волластонита – на 16 %.

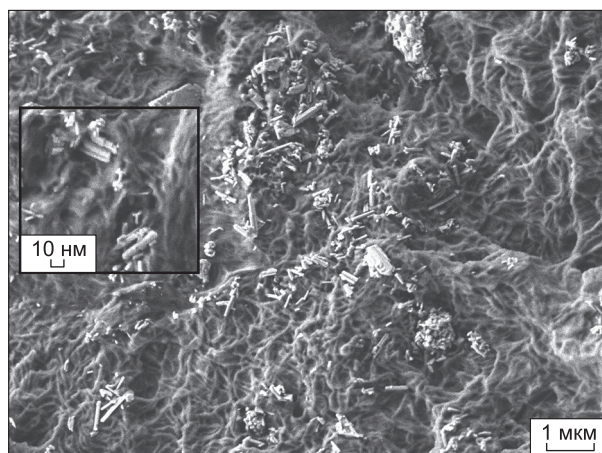


Рис. 6. Микрофотография ППК на основе СВМПЭ, наполненного 0,5 масс.% волластонита ($\times 10000$).

Fig. 6. Microphotographs of PCM based on UHMWPE filled by 0.5 mass.% wollastonite ($\times 10000$).

На рис. 6 представлена микрофотография ППК, содержащего 0,5 масс.% волластонита. Исследования распределения частиц волластонита в н-СВМПЭ с помощью СЭМ показали, что волластонит характеризуется игольчатой формой с наноразмерным диаметром меньше 100 нм

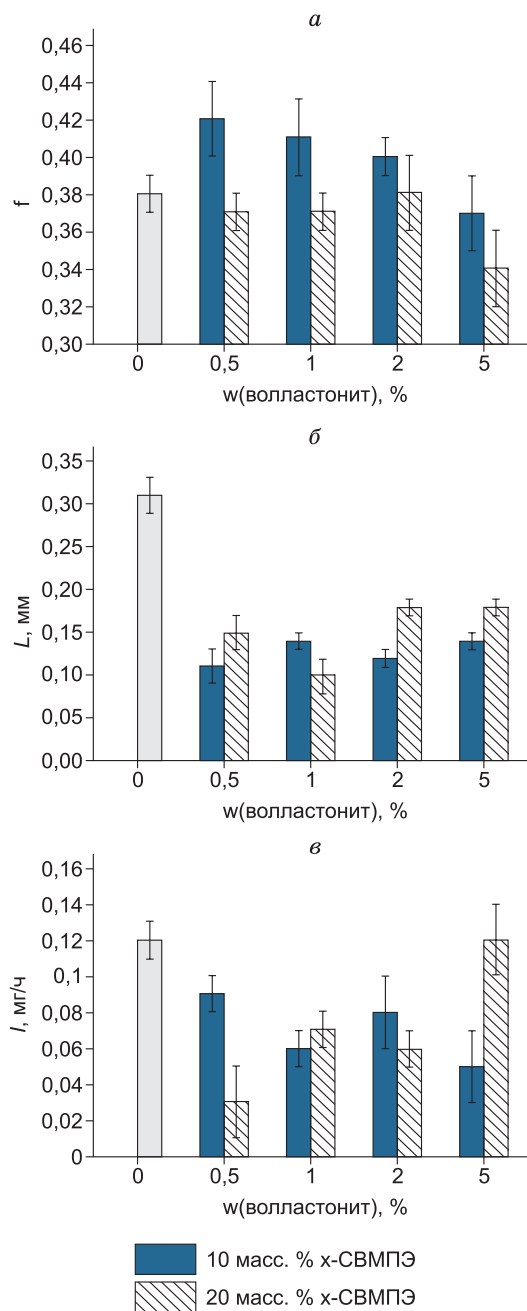


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения (а), скорости массового изнашивания (б) и линейного износа (в) от содержания волластонита.

Fig. 7. Dependence of the coefficient of friction (a), mass wear rate (b) and linear wear (c) on the content of wollastonite.

и длиной ~1 мкм, т. е. соотношение длины к диаметру составляет около 10. Учитывая данный параметр, можно говорить о том, что при растяжении матрица перераспределяет напряжение между армирующими элементами, а это придает ПКМ прочность и жесткость по направлению ориентации волокон [26]. Следует отметить, что в данной системе ПКМ межфазное взаимодействие между матрицей и волокном обеспечивается за счет механической адгезии. Это возможно лишь благодаря уникальной игольчатой структуре синтезированного волокна [27].

Результаты трибологических испытаний показали, что композиция, содержащая 20 масс.% х-СВМПЭ и 0,5 масс.% волластонита, характеризуется снижением скорости массового изнашивания в 4 раза и линейного износа в 3 раза по сравнению с исходным полимером. Видно, что в серии композиции (н-СВМПЭ)/(20 масс.% х-СВМПЭ) с увеличением содержания волластонита наблюдается постепенное снижение коэффициента трения.

Таким образом, наполнение СВМПЭ радиационно-сшитым СВМПЭ в сочетании с волластонитом обеспечивает ППК необходимым комплексом триботехнических и деформационно-прочностных свойств, необходимых для герметизирующих и уплотнительных материалов.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана новая рецептура полимер-полимерного композита, отличающегося повышенной износостойкостью (в 12 раз по сравнению с ненаполненным полимером), при этом физико-механические параметры остаются на уровне исходного н-СВМПЭ. Методом СЭМ показано, что подобное изменение свойств материала связано с образованием переходного слоя, образующегося между матрицей и поверхностью полимерного наполнителя. Исследование поверхности трения ППК методом ИК-спектроскопии свидетельствует, что изнашивание композитов сопровождается протеканием трибоокислительной деструкции в процессе фрикционного воздействия. Установлено, что введение 10 и 20 масс.% х-СВМПЭ приводит к снижению интенсивности пиков кислородсодержащих групп, соответствующих продуктам трибодеструкции. Предполагается, что полимерный наполнитель за счет невысокой твердости снижает абразивное воздействие на поверхность стального контртела, обеспечивая легкое скольжение при трении.

Установлено, что состав бинарно-наполненного ПКМ «н-СВМПЭ+10 масс.% х-СВМПЭ+1 масс.% волластонит» характеризуется повышением прочности на 15 % и модуля упругости на 50 %, что обусловлено армирующим действием волокон на полимерную матрицу.

Литература

1. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Арктическое материаловедение. Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. Вып. 3. 44 с.
2. Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Гаврильева А.А., Охлопкова Т.А., Борисова Р.В., Дьяконов А.А. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «Полимер-волокно» // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 2016. № 5 (55). С. 80–92.
3. Baena J. C., Wu J., Peng Z. Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review // Lubricants. 2015. Vol. 3, No. 2. P. 413–436. DOI:10.3390/lubricants3020413.
4. Севастьянов Д.В., Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю. Самоармированные полимерные композиты – классификация, получение, механические свойства и применение (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 4 (52). С. 104–118.
5. Hussain M., Naqvi R.A., Abbas N., Khan S.M., Nawaz S., Hussain A., Zahra N., Khalid M.W. Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a promising polymer material for biomedical applications: A concise review // Polymers. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 323. DOI: 10.3390/polym12020323.
6. Wang H., Xu L., Zhang M., Li R., Xing Z., Hu J., Wang M., Wu G. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the addition of radiation crosslinked UHMWPE powder // Journal of Applied Polymer Science. 2017. Vol. 134, No. 13. P. 44643–44643. DOI:10.1002/app.44643.
7. Bellare A., D'angelo F., Ngo H.D., Thornhill T.S. Oxidation resistance and abrasive wear resistance of vitamin E stabilized radiation crosslinked ultra-high molecular weight polyethylene // Journal of Applied Polymer Science. 2016. Vol. 133, No. 43. P. 44125. DOI: 10.1002/app.44125.
8. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene // Biomaterials. 2001. Vol. 22, No. 4. P. 371–401. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00195-2.
9. Tong J., Ma Y., Jiang M. Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites // Wear. 2003. Vol. 255, No. 1–6. P. 734–741. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00221-7.
10. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Nikiforov L.A., Okhlopova A.A., Grakovich P.N., Shim E.L., Cho J.H. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers // Molecules. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224.

11. Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Охлопкова А.А., Данилова С.Н., Силантьев В.Е., Буравлев И.Ю., Жевтун И.Г., Достовалов Д.В., Пашина Е.В. Влияние условий синтеза на особенности формирования силикатов кальция в различных многокомпонентных системах // *Химическая технология*. 2019. Т. 20, № 14. С. 661–666.
12. Охлопкова А.А., Гордиенко П.С., Ярусова С.Б., Данилова С.Н., Жевтун И.Г., Буравлев И.Ю., Игнатова Е.Г., Силантьев В.Е. Влияние синтетического wollastonite на функциональные свойства полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // *Сборник материалов VI Международной конференции по химии и химической технологии*, Республика Армения, г. Ереван, 23–27 сентября 2019 г. Ереван: ИОНХ НАН РА, 2019. С. 25–27.
13. Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. М.: Справочные материалы, 2012. 55 с.
14. Казыцына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК-, ЯМР- и масс-спектро스코пии в органической химии: Учебное пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 240 с.
15. Doshi B., Ward J.S., Oral E., Muratoglu O.K. Fatigue toughness of irradiated vitamin E/UHMWPE blends // *Journal of Orthopaedic Research*. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 1514–1520. DOI: 10.1002/jor.23168.
16. Affatato S., Ruggiero A., Jaber S.A., Merola M., Bracco P. Wear behaviours and oxidation effects on different UHMWPE acetabular cups using a hip joint simulator // *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 3. P. 433. DOI: 10.3390/ma11030433.
17. Rocha M., Mansur A., Mansur H. Characterization and accelerated ageing of UHMWPE used in orthopedic prosthesis by peroxide // *Materials*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 562–576. DOI: 10.3390/ma2020562.
18. Лунатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с.
19. Лунатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров. М.: Химия, 1991. 260 с.
20. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
21. Chan J. X., Wong J. F., Hassan A., Mohamad Z., Othman N. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. P. 395–429. DOI: 10.1002/pc.25403.
22. Salas-Papayanopolos H., Morales A.B., Lozano T., Barbosa A., Diaz N., Lafleur P.G., Laria J., Sanchez S., Rodriguez F., Martinez G., Cerino F. Improved toughness of polypropylene/wollastonite composites // *Soc. Plast. Eng. Eng.* 2014. P. 2–4. DOI: 10.2417/spepro.005309.
23. Panin S.V., Alexenko V.O., Buslovich D.G., Anh N.D., Qitao H. Solid-lubricant, polymer-polymeric and functionalized fiber-and powder reinforced composites of ultra-high molecular weight polyethylene // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2018. Vol. 115. No. 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/115/1/012010.
24. Hadal R., Dasari A., Rohrmann J., Misra R.D.K. Susceptibility to scratch surface damage of wollastonite-and talc-containing polypropylene micrometric composites // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 380, No. 1-2. P. 326–339. DOI: 10.1016/j.msea.2004.03.058.
25. Švab I., Musil V., Pustak A., Šmit I. Wollastonite-reinforced polypropylene composites modified with novel metallocene EPR copolymers. II. Mechanical properties and adhesion // *Polymer composites*. 2009. Vol. 30, No. 8. P. 1091–1097. DOI: 10.1002/pc.20660.
26. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. 80 с.
27. Алексенко В.О. Износостойкие композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с армирующими волокнами для полимер-металлических трибосопряжений в машиностроении: Автореф. дис. канд. тех. наук.: 05.16.09 Томск, 2019. 18 с.

Поступила в редакцию 05.06.2020
Принята к публикации 28.07.2020

Об авторах

ДАНИЛОВА Сахаяна Николаевна, аспирант, Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387> dsn.sakhayana@mail.ru;

ЯРУСОВА Софья Борисовна, кандидат химических наук, с.н.с., Институт химии ДВО РАН; зав. кафедрой, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690022, Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159Д, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1500-1319> yarusova_10@mail.ru;

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Белинского 58, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066> okhlopkova@yandex.ru;

ГОРДИЕНКО Павел Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Институт химии ДВО РАН, 690022, Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159Д, Россия, pavel.gordienko@mail.ru;

СЛЕПЦОВА Сардана Афанасьевна, кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск., ул. Кулаковского 46, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2396-3267>, ssard@yandex.ru;

БУРАВЛЕВ Игорь Юрьевич, кандидат химических наук, научный сотрудник, Инженерно-технологический центр Института химии ДВО РАН; доцент, Инженерная школа ДВФУ, 690022, Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3944-3629>, buravlev.i@gmail.com;

ВАНГ Лянсай, PhD, профессор, Пекинский исследовательский центр радиационной модификации материалов, 100015, Пекин, КНР, No.10, Jiuxianqiao North Road, Chaoyang District, Beijing, China, 13910127876@139.com;

ЦЯО Янг, PhD, научный сотрудник, Пекинский исследовательский центр радиационной модификации материалов, 100015, г. Пекин, КНР, No.10, Jiuxianqiao North Road, Chaoyang District, Beijing, China, jiaoyang7171@sina.com.

Информация для цитирования

Данилова С.Н., Ярусова С.Б., Охлопкова А.А., Гордиенко П.С., Слепцова С.А., Буравлев И.Ю., Ванг Лянсай, Цяо Ян. Разработка износостойких полимер-полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 130–142. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-13>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-13

The development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE

S.N. Danilova^{1*}, S.B. Yarusova^{2,3**}, A.A. Okhlopko¹, P.S. Gordienko², S.A. Sleptsova¹, I.Yu. Buravlev^{2,4}, Wang Liansai⁵, Jiao Yang⁵

¹M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

²Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, Russia

³Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia

⁴Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

⁵Beijing Key Laboratory of Radiation Advanced Materials, Beijing Research Center for Radiation Application, Beijing China

*dsn.sakhayana@mail.ru, **yarusova_10@mail.ru

Abstract. The paper presents studies of properties and structure of polymer-polymer composites (PPC) based on ultra-high-molecular polyethylene (n-UHMWPE) filled with radiation-modified ultra-high-molecular polyethylene (x-UHMWPE). To ensure radiation cross-linking of polyethylene macromolecules, γ -radiation (^{60}Co source) was used. Mixtures were obtained using standard technology of UHMWPE processing. Mechanical and tribological characteristics of the obtained PPC were studied. It was found that the wear rate decreases of by 12 times in relation to the unfilled n-UHMWPE. Therefore, adding 20 wt % x-UHMWPE does not change elongation at break and tensile strength of the PPC and remain at the level of the original polymer matrix significantly. The supramolecular structures of PPC were investigated using

scanning electron microscopy (SEM). It was shown that x-UHMWPE powder is not homogeneously distributed in the polymer matrix. The filler particles are in the volume of the polymer matrix as unbound separate particles because the x-UHMWPE powders do not melt at the processing temperature of the initial UHMWPE. This leads to "structural fragmentation" of the composite material. The method of IR spectroscopy revealed occurring oxidative processes take place in x-UHMWPE during processing, with the formation of oxygen containing groups (C-O and C=O). The reinforcing fibrous filler (wollastonite) are used to enhance the mechanical properties of PPC and to impart entirely new effects. Using wollastonite improved tensile strength by 15 % and elastic modulus by 50 %.

Key words: polymer-polymer composite, ultra-high-molecular-weight polyethylene, radiation-modified ultra-high-molecular-weight polyethylene, polymer composite material, wollastonite.

Acknowledgements. The work was carried out with support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation Scientific Research Work № FSRG-2020-0017 and the RFBR in the framework of the research project No. 19-33-50017 (synthesis and research of the influence of wollastonite on mechanical and tribotechnical properties of PCM).

References

1. Buznik V.M., Kablov E.N. *Arkticheskoe materialovedenie*. Tomsk: Tomskij gos. un-t Publ., 2018. Vyp. 3. 44 p.
2. Danilova S.N., Okhlopkova A.A., Gavrilieva A.A., Okhlopkova T.A., Borisova R.V., Dyakonov A.A. Iznosostojkie polimernye kompozicionnye materialy s uluchshennym mezh-fazovym vzaimodejstviem v sisteme "Polimer-volokno" // *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*. 2016. Vol. 55, No. 5, P. 80–92.
3. Baena J.C., Wu J., Peng Z. Wear performance of UHMWPE and reinforced UHMWPE composites in arthroplasty applications: a review // *Lubricants*. 2015. Vol. 3, No. 2. P. 413–436. DOI:10.3390/lubricants3020413.
4. Sevast'yanov D.V., Doriomedov M.S., Daskovskij M.I., Skripachev S.Yu. Samoarmirovannye polimernye kompozity – klassifikaciya, poluchenie, mekhanicheskie svoystva i primeneniye (obzor) // *Trudy VIAM*. 2017. Vol. 4 (52). P. 104–118.
5. Hussain M., Naqvi R.A., Abbas N., Khan S.M., Nawaz S., Hussain A., Zahra N., Khalid M.W. Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a promising polymer material for biomedical applications: A concise review // *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 2. P. 323. DOI: 10.3390/polym12020323.
6. Wang H., Xu L., Zhang M., Li R., Xing Z., Hu J., Wang M., Wu G. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the addition of radiation crosslinked UHMWPE powder // *Journal of Applied Polymer Science*. 2017. Vol. 134, No. 13. P. 44643–44643. DOI:10.1002/app.44643.
7. Bellare A., D'angelo F., Ngo H.D., Thornhill T.S. Oxidation resistance and abrasive wear resistance of vitamin E stabilized radiation crosslinked ultra-high molecular weight polyethylene // *Journal of Applied Polymer Science*. 2016. Vol. 133, No. 43. P. 44125. DOI: 10.1002/app.44125.
8. Lewis G. Properties of crosslinked ultra-high-molecular-weight polyethylene // *Biomaterials*. 2001. Vol. 22. No. 4. P. 371–401. DOI: 10.1016/S0142-9612(00)00195-2.
9. Tong J., Ma Y., Jiang M. Effects of the wollastonite fiber modification on the sliding wear behavior of the UHMWPE composites // *Wear*. 2003. Vol. 255, No. 1–6. P. 734–741. DOI: 10.1016/S0043-1648(03)00221-7.
10. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Grakovich P.N., Shim E.L., Cho J.H. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers // *Molecules*. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224.
11. Yarusova S.B., Gordienko P.S., Ohlopkova A.A., Danilova S.N., Silant'ev V.E., Buravlev I.Yu., Zhevtun I.G., Dostovalov D.V., Pashnina E.V. Vliyanie uslovij sinteza na osobennosti formirovaniya silikatov kal'ciya v razlichnyh mnogokomponentnyh sistemah // *Himicheskaya tekhnologiya*. 2019. Vol. 20. No. 14. P. 661–666.
12. Ohlopkova A.A., Gordienko P.S., Yarusova S.B., Danilova S.N., Zhevtun I.G., Buravlev I.Yu., Ignat'eva E.G., Silant'ev V.E. Vliyanie sinteticheskogo wollastonita na funkcionallye svoystva polimernykh kompozicionnykh materialov na osnove sverhvisokomolekulyarnogo polietilena // *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj konferencii po himii i himicheskoy tekhnologii, Respublika Armeniya, Erevan, 23–27 sent. 2019*. Erevan: IONH NAN RA, 2019. P. 25–27.
13. Tarasevich B.N. *IK-spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedinenii*. Moscow: Izd-vo MGU, 2012. 54 p.
14. Kazicyna L.A., Kupletskaya N.B. *Primeneniye UF-, IK- i YaMR-spektroskopii v organicheskoy khimii*. M.: Vysshaya shkola, 1971. 264 p.
15. Doshi B., Ward J.S., Oral E., Muratoglu O.K. Fatigue toughness of irradiated vitamin E/UHMWPE blends // *Journal of Orthopaedic Research*. 2016. Vol. 34, No. 9. P. 1514–1520. DOI: 10.1002/jor.23168.
16. Affatato S., Ruggiero A., Jaber S.A., Merola M., Bracco P. Wear behaviours and oxidation effects on different UHMWPE acetabular cups using a hip joint simu-

lator // *Materials*. 2018. Vol. 11, No. 3. P. 433. DOI: 10.3390/ma11030433.

17. Rocha M., Mansur A., Mansur H. Characterization and accelerated ageing of UHMWPE used in orthopedic prosthesis by peroxide // *Materials*. 2009. Vol. 2, No. 2. P. 562–576. DOI: 10.3390/ma2020562.

18. Lipatov YU.S. Fizicheskaya himiya napolnennykh polimerov. Moscow: Himiya, 1977. 304 p.

19. Lipatov YU.S. Fiziko-himicheskie osnovy napolneniya polimerov. Moscow: Himiya, 1991. 260 p.

20. Pronikov A.S. Machinery Reliability. M.: Mechanical Engineering Publ., 1978. 592 p.

21. Chan J.X., Wong J.F., Hassan A., Mohamad Z., Othman N. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review // *Polymer Composites*. 2020. Vol. 41. P. 395–429. DOI: 10.1002/pc.25403.

22. Salas-Papayanopolos H., Morales A.B., Lozano T., Barbosa A., Diaz N., Lafleur P.G., Laria J., Sanchez S., Rodriquez F., Martinez G., Cerino F. Improved toughness of polypropylene/wollastonite composites // *Soc. Plast. Eng. Eng.* 2014. P. 2–4. DOI: 10.2417/spepro.005309.

23. Panin S.V., Alexenko V.O., Buslovich D.G., Anh N.D., Qitao H. Solid-lubricant, polymer-polymeric and func-

tionalized fiber-and powder reinforced composites of ultra-high molecular weight polyethylene // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2018. Vol. 115. No. 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/115/1/012010.

24. Hadal R., Dasari A., Rohrmann J., Misra R.D.K. Susceptibility to scratch surface damage of wollastonite-and talc-containing polypropylene micrometric composites // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 380, No. 1-2. P. 326–339. DOI: 10.1016/j.msea.2004.03.058.

25. Švab I., Musil V., Pustak A., Šmit I. Wollastonite-reinforced polypropylene composites modified with novel metallocene EPR copolymers. II. Mechanical properties and adhesion // *Polymer composites*. 2009. Vol. 30, No. 8. P. 1091–1097. DOI: 10.1002/pc.20660.

26. Tyalina L.N., Minayev A.M., Pruchkin V.A. Novyye kompozitsionnyye materialy: uchebnoye posobiye. Tambov: TGTU, 2011. 80 p.

27. Aleksenko V.O. Iznosostojkie kompozity na osnove sverhvyssokomolekulyarnogo polietilena s armiruyushchimi voloknami dlya polimer-metallicheskih tribosopryazhenij v mashinostroenii: Extended Abstract of cand. tech. sci. diss. Tomsk, 2019. 18 p.

About the authors

DANILOVA Sakhayana Nikolaevna, graduate student, Chemical Department, Institute of Natural Science, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo str., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, dsn.sakhayana@mail.ru;

YARUSOVA Sofya Borisovna, candidate of chemical sciences, Institute of Chemistry FEB RAS; head of the department, Vladivostok State University of Economics and Service, 159D Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok 690022, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1500-1319>, yarusova_10@mail.ru

GORDIENKO Pavel Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, Institute of Chemistry FEB RAS, 159D Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok 690022, Russia, pavel.gordienko@mail.ru;

OKHLOPKOVA Aitalina Alexeevna, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo str., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, okhlopkova@yandex.ru

SLEPTSOVA Sardana Afanasyevna, candidate of technical sciences, associate Professor, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 46 Kulakovskogo str., Yakutsk 677000, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2396-3267>, ssard@yandex.ru;

BURAVLEV Igor Yurievich, candidate of chemical sciences, researcher, of the Engineering and Technological Center of the Institute of Chemistry FEB RAS, associate professor, School of Engineering Far Eastern Federal University, 159D Prospect 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok 690022, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3944-3629>, buravlev.i@gmail.com,

Wang Liansai, PhD, professor, Head of the Beijing Key Laboratory of Radiation Advanced Materials, Beijing Research Center for Radiation Application, 100015, No.10, Jiuxianqiao North Road, Chaoyang District, Beijing, China, 13910127876@139.com;

Jiao Yang, PhD, Researcher of the Beijing Key Laboratory of Radiation Advanced Materials, Beijing Research Center for Radiation Application, 100015, No.10, Jiuxianqiao North Road, Chaoyang District, Beijing, China,
jiaoyang7171@sina.com.

Citation

Danilova S.N., Yarusova S.B., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Sleptsova S.A., Buravlev I.Yu., Wang Liansai, Jiao Yang. The development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 130–142. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-13>

Анализ разрушения материала трубы поддува котельной, эксплуатируемой в экстремальных условиях Арктики

В.В. Лепов, В.С. Ачикасова, С.Н. Махарова, В.Е. Захаров, Н.В. Павлов

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия
wisecold@mail.ru*

Аннотация. В работе произведен анализ режима работы трубы поддува угольного котла КВм-2.5ЛБ котельной, эксплуатируемой в одном из арктических поселков Республики Саха (Якутия), а также методами оптической и электронной растровой микроскопии исследованы образцы разрушенного участка трубы. Определен состав металла, с помощью метода измерения микротвердости оценены его механические характеристики. Хотя вначале микроструктурный анализ указывал на то, что материал трубы подвергнут сильному перегреву, однако более чем двукратное утонение стенки трубы и наличие свищей, которые в дальнейшем неоднократно заваривались, доказывало коррозионный характер разрушения. Расчет показал гарантированное достижение точки росы и конденсацию влаги на трубе вследствие специфического низкотемпературного режима в большом диапазоне влажности воздуха при эксплуатации котла. Конструкция котла, или материал труб, таким образом, должны быть изменены вследствие того, что не удовлетворяют экстремальным условиям эксплуатации, поскольку низкие температуры окружающей среды вызывают интенсификацию теплообмена, понижение температуры выходных газов, конденсацию влаги и коррозию металла трубы.

Ключевые слова: трубная сталь, перегрев, микроструктура, электронная микроскопия, микротвердость, элементный анализ, коррозия, точка росы, разрушение.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-48-140015) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Введение

Основная доля тепловой энергии в Республике Саха (Якутия) производится многочисленными котельными (около 68 % в 2019 г), работающими на угле, сырой нефти, газоконденсате, дровах и природном газе [1]. Эксплуатация в сложных климатических условиях и значительная рассредоточенность данных объектов теплоснабжения создает ряд ограничений для надежного и качественного обеспечения производственных и жилых зданий тепловой энергией. В данных условиях аварийная остановка котельных на протяжении всего отопительного периода приводит к тяжелым последствиям, вплоть до эвакуации населения.

Чаще всего аварийные остановки котлов вызываются повреждениями труб поверхностей нагрева, источниками которых могут быть, во-первых, технологические дефекты, свищи в сварных соединениях и разрывы труб, а также недостатки отдельных конструктивных решений и условий

эксплуатации, недостаточная изученность рабочих процессов, протекающих в котлах. Во-вторых, повреждения вызываются точечной коррозией, коррозией под напряжением, ползучестью металла, механической и термической усталостью, перегревом труб и др. [2–9].

Каждый год по всему миру фиксируется большое число аварий, вызванных повреждениями котловых труб [10, 11], несмотря на то что изготавливаться они могут из различных по качеству и физико-механическим свойствам материалов – низкоуглеродистых свариваемых сталей, чугуна, нержавеющей жаропрочных сталей и высокотемпературных сплавов. Поэтому актуальность исследования причин разрушения труб в каждом конкретном случае представляется немаловажной как с точки зрения предотвращения таких аварий для конкретного оборудования и условий эксплуатации, так и для внесения необходимых конструктивных изменений, обеспечивающих в дальнейшем целостность всей системы тепло-

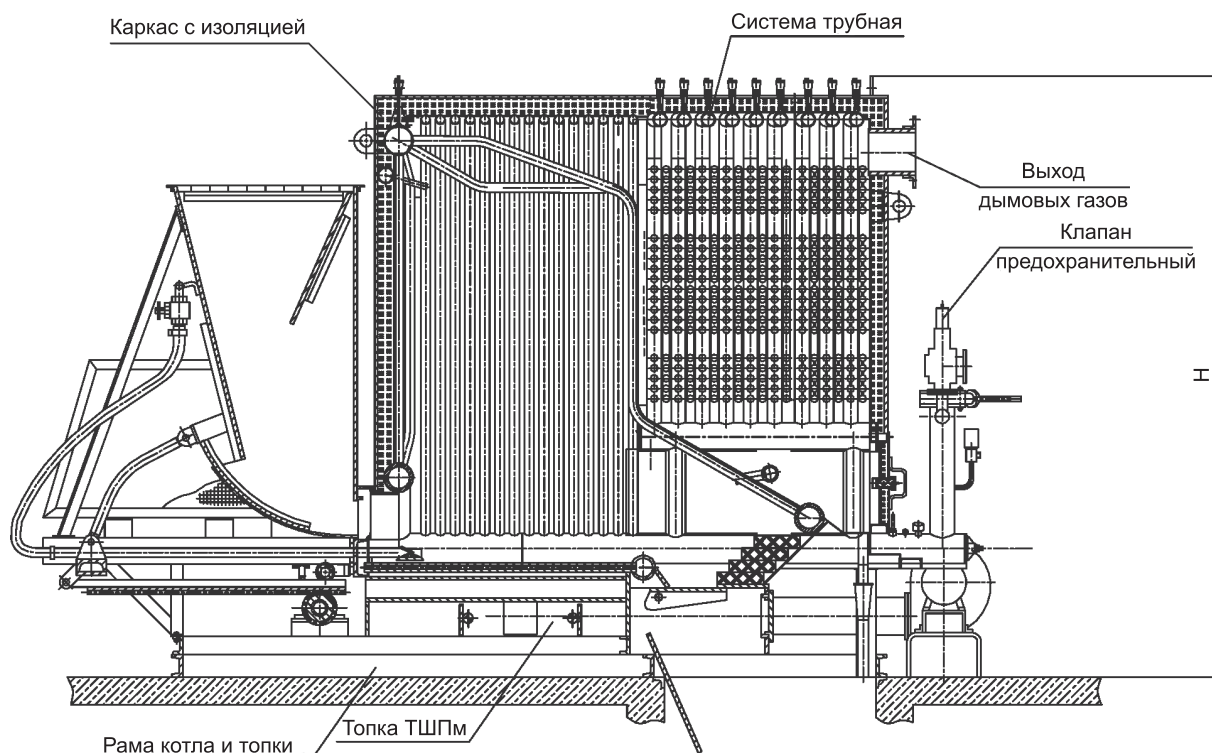


Рис. 1. Схема водогрейного угольного котла КВм-2.5КБ с механической топкой ТШП-2.5.

Fig. 1. The water boiler with coal furnace KVM-2.5KB with the mechanical stoker TShP-2.5.

снабжения. В институте имеется достаточный опыт исследования разрушения конструкций самыми современными методами [12–14].

Рассматриваемое разрушение трубы $\varnothing 159$ мм произошло в задней части топки котла КВм-2.5 с механической топкой ТШП-2.5 тепловой мощностью 2,5 МВт (рис. 1), изготовленного на заводе ООО «КотлоМаш», г. Барнаул, в 2016 г. До того как в трубе образовались трещины, котел заводского изготовления эксплуатировался всего год. Никаких изменений в конструкцию не вносили. Подвод воздуха к топке осуществляется принудительно при помощи дутьевого вентилятора, регулирование расхода воздуха проводится шибером.

Материалы, оборудование и методы исследования

Анализ разрушения трубы поддува котельной, эксплуатирующейся в арктическом районе Республики Саха (Якутия), проведен методами оптической и растровой электронной микроскопии, с применением портативного растрового микроскопа Hitachi TM-3030 (Япония), в режиме низкого вакуума с напряжением 15 кВ, а также для элементного анализа области вблизи дефекта использован встроенный энергодисперсионный микроанализатор Bruker XFlash MIN SVE. Химический состав металла трубы определен с помощью спектрометра Foundry-master UVR (см. таблицу).

Химический состав стали трубы поддува

Chemical content of the air-pipe steel

Номер образца	Содержание химических элементов, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Cu	Fe
1	0,09	0,25	0,40	0,02	0,02	–	–	0,03	ост
2	0,08	0,25	0,40	0,02	0,02	–	–	0,03	ост

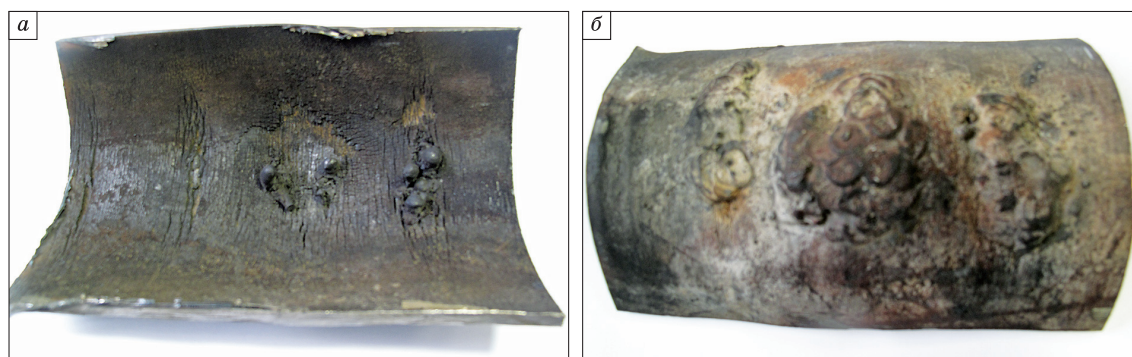


Рис. 2. Внешний вид образца трубы поддува после ремонтной сварки:
a – внутренняя сторона, *б* – внешняя сторона.

Fig. 2. External view of the faulty air-pipe sample with the repair welding spots:
a – inner wall, *б* – outer wall.

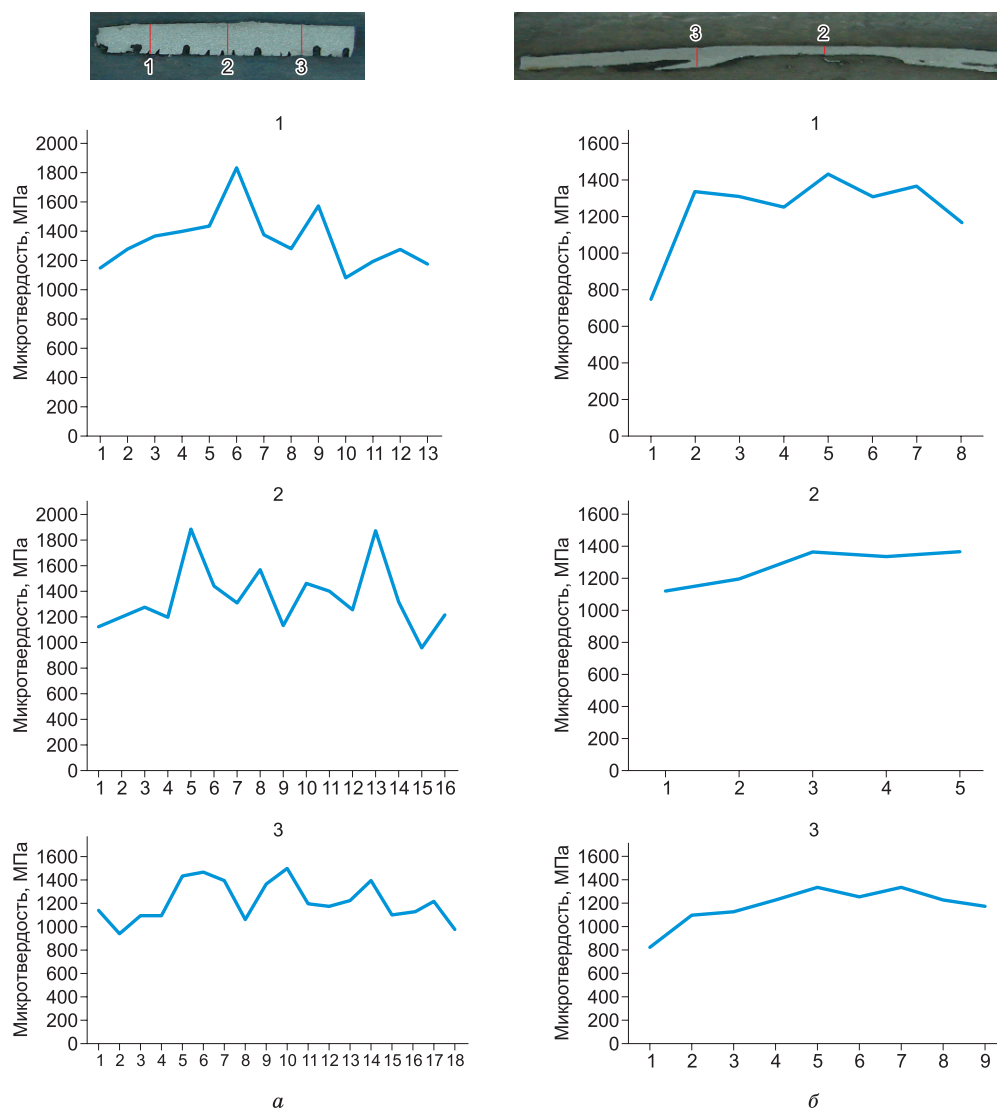


Рис. 3. Микротвердость участка трубы в продольном (*a*) и поперечном (*б*) сечениях (в направлении изнутри наружу).

Fig. 3. Microhardness of the pipe steel sample *a*) endwise and *б*) crosswise.

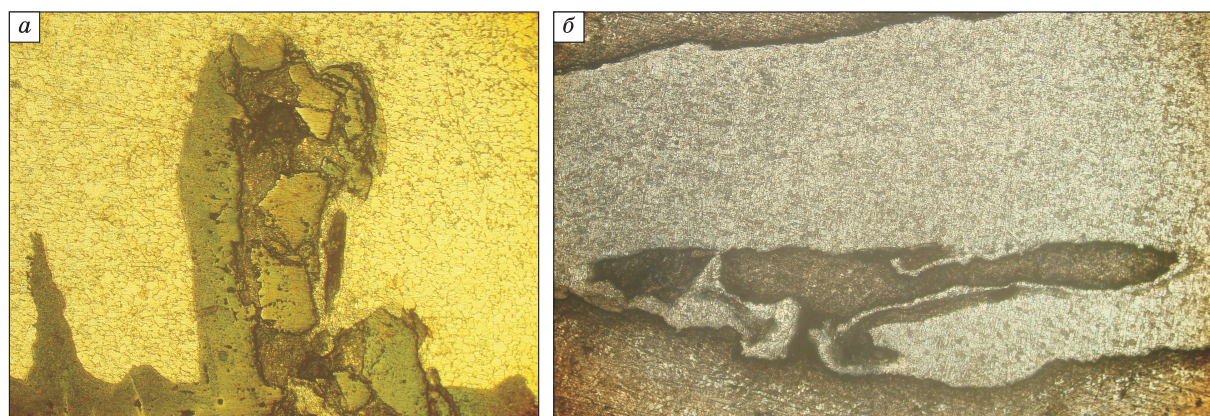


Рис. 4. Микроструктура корродированной зоны продольного (а) и поперечного (б) сечений участка трубы поддува.

Fig. 4. Microstructure of the pitting corrosion area of the endwise (a) and crosswise (b) of air-pipe steel sample.

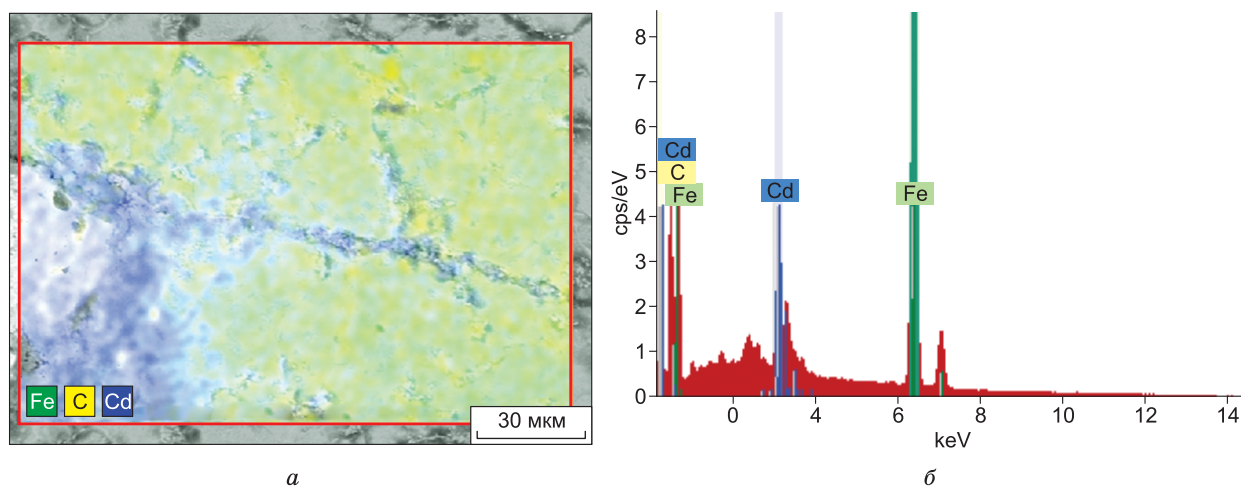


Рис. 5. Элементный состав участка поперечного сечения трубы вблизи корродированной зоны:

а – карта распределения элементов и б – энергетический спектр элементного состава.

Fig. 5. Elemental composition in air-pipe crosswise near the corrosion area:

а – elemental map and б – energy-dispersion spectrum.

На рис. 2 показан общий вид представленного образца трубы поддува. Сравнение данных химического анализа материала двух образцов данной трубы (см. таблицу) с составом по ГОСТ 380-2005 показало, что марка исследованных образцов соответствует марке стали Ст1сп.

На стандартном твердомере ПМТ-3 путем вдавливания алмазной пирамидки для участка трубы проведены измерения микротвердости в продольном (рис. 3, а) и поперечном (рис. 3, б) направлении. На подвергшихся коррозии участках твердость опускалась до 800 МПа и ниже, отличаясь пониженными значениями и около поверхности. Это также указывает на коррозионную природу повреждений.

Микроструктура поперечного и продольного срезов образцов из трубы поддува котельной исследована с помощью оптического микроскопа Neofot-32 (рис. 4). Подтверждается гипотеза о точечной коррозии (pitting corrosion), имеющей место при постоянном или периодическом контакте поверхности металла с водой или агрессивными углеводородами [3, 5, 9, 10].

На рис. 5 представлен результат количественного элементного анализа поврежденной зоны на внутренней поверхности поперечного сечения трубы. Обнаружение значительного содержания кадмия свидетельствует о конденсации влаги из загрязненного воздуха внутри трубы.

Результаты и обсуждение

Судя по схеме, труба поддува, содержащая нагретый выходящими газами воздух, обеспечивает процесс горения угля и нагрев в водогрейных трубах. Согласно характеристикам котельной, температура воды на входе в котел должна составлять не менее 50 °С, а допустимая температура уходящих газов – 180–200 °С. Однако эти условия могут не соблюдаться, особенно учитывая низкие наружные температуры воздуха.

Конденсация влаги на трубе происходит при достижении точки росы, которая определяется температурой и относительной влажностью воздуха. Для влажности 100 % точка росы совпадает с фактической температурой воздуха, однако чем она ниже, тем при более низкой температуре будет происходить конденсация влаги. Для того чтобы избежать коррозии поверхности, рекомендуют ограничивать температуру уходящих газов снизу, хотя это увеличивает потери теплоты и снижает эффективность котельного агрегата, поскольку в тепловом балансе котельного агрегата наибольшей является потеря теплоты с уходящими газами, составляющая 4–8 %. При росте температуры уходящих газов на 12–16° потери повышаются на 1 %. Однако увеличивается вероятность конденсации влаги на внутренней поверхности воздуховода.

Известна формула для приблизительного расчета точки росы T_d в градусах Цельсия (только для положительных температур) [15]:

$$T_d = \frac{b\gamma(T, R_h)}{a - \gamma(T, R_h)}, \quad (1)$$

где

$$\gamma(T, R_h) = \frac{aT}{b + T} + \ln T, \quad a = 17,27, \quad b = 237,7^\circ\text{C}.$$

Здесь T — температура, °С, R_h — относительная влажность, об. доли. Формула обладает погрешностью $\pm 0,4^\circ\text{C}$ в диапазоне значений: $0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$, $0,01 < R_h < 1,00$, $0^\circ\text{C} < T_d < 50^\circ\text{C}$.

Для предотвращения коррозии металла (без специальных мер защиты), температура поверхности трубы, согласно рекомендациям, должна быть примерно на 10 °С выше температуры точки росы. С условием, что воздух в трубе будет прогреваться до температуры, по крайней мере еще на 10 °С ниже уходящих газов, — график зависимости температуры точки росы от влажности согласно (1) представлен на рис. 6 (кривые 1

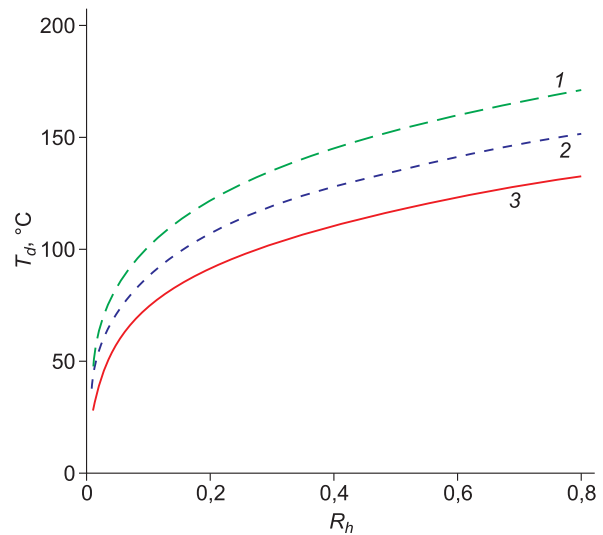


Рис. 6. Температура точки росы T_d в зависимости от относительной влажности воздуха R_h в трубе поддува котельной, при температуре уходящих газов, °С: 1 – 200, 2 – 180, 3 – 150.

Fig. 6. Dew point temperature T_d versus atmospheric moisture capacity R_h in the air-pipe of coal boiler at the stack effluent temperature, °С: 1 – 200, 2 – 180, 3 – 150.

и 2 соответствуют допустимым температурам уходящего газа 200 °С и 180 °С соответственно). Таким образом, точка росы будет достигаться на поверхности трубы уже в штатном режиме. Однако, предполагая, что в условиях эксплуатации при низких температурах, когда минимальные температуры в арктическом регионе на 30 °С ниже среднероссийских, точка росы может достигать 130 °С при влажности 80 % (см. рис. 6, кривая 3), что будет приводить к постоянной конденсации значительного количества влаги на внутренней поверхности трубы.

Выводы и заключение

Исследования поврежденных коррозией зон методами электронной сканирующей микроскопии с применением энергодисперсионного элементного анализа показали, кроме характерных для точечной коррозии дефектов, наличие не типичных для стали примесей кобальта в существенных концентрациях (см. рис. 5). Соединения кобальта содержатся в значительном количестве в угольной пыли и попадают в выходящие газы при сжигании бурых углей, при этом, кроме загрязнения окружающей среды, попадают также в воздухозаборную систему котельной. При кон-

денсации влаги на внутренних стенках трубы поддува в результате достижения температуры точки росы происходит концентрация этих примесей в областях активной коррозии.

Толщина стенок материала трубы на поврежденных участках оказалась утонена более чем в два раза – с 4 до 2–1,5 мм. Это не может быть объяснено перегревом или воздействием горячего воздуха. Структуры пережога, образовавшиеся на внешних стенках трубы поддува, вызваны многократным завариванием дефектов в виде трещин и свищей (см. рис. 2). Исследования микротвердости представленных образцов в поперечном и продольном направлениях (см. рис. 3, б) позволяют говорить о падении механических характеристик у поверхности, особенно значительном около поврежденных участков вблизи внутренней стенки трубы поддува.

Таким образом, в результате тщательного исследования режима функционирования трубы поддува, микроструктуры, механических свойств и элементного состава установлены предполагаемые причины аварии, что позволяет разработать рекомендации по предотвращению подобных случаев в дальнейшем. Коррозия обусловлена нарушением теплового режима эксплуатации воздухообменника, не рассчитанного на низкую температуру и высокую влажность наружного воздуха, а также трудностями, связанными с поддержанием высокой температуры выходящих газов.

Наличие как на внешней, так и на внутренней поверхности материала дефектов в виде многочисленных нарушений сплошности, вспученности материала, рванин, множественных надрывов, расслоения и трещин свидетельствует в первую очередь о термическом пережоге металла, возникшем из-за длительного нагревания до высоких температур, что может быть связано с неправильным выбором режима сварки, в том числе в условиях низких температур окружающего воздуха. Однако первичное повреждение металла трубы, ее утонение и образование свищей вызвано особенностями ее эксплуатации, в частности, коррозией из-за конденсации влаги на внутренней поверхности трубы.

Изготовителю рекомендуется пересмотреть режим работы котла, для сохранения его высокой эффективности при высокой температуре выходящих газов и низкой температуре наружного

воздуха, а также конструкцию трубы поддува, которая должна предусматривать снижение конденсации влаги, наличие коррозионно-защитного покрытия или использование нержавеющих материалов. Потребителям представляется целесообразным поддерживать крайне неэффективный режим высоких температур исходящих газов (желательно выше 200 °С), – это минимизирует конденсацию влаги за счет повышения температуры воздуха внутри трубы поддува.

Литература

1. Стенников В.А., Петров Н.А., Иванова И.Ю., Добровольская Т.В., Павлов Н.В. Проблемы и направления развития теплоснабжения Республики Саха (Якутия) в среднесрочной перспективе // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 64–74.
2. Доброхотов В.И., Жулев Г.В. Эксплуатация энергетических блоков. М.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
3. Benac D.J. Failure avoidance brief: estimating heater tube life // J. Fail Anal. Prev. No. 9. 2009. P. 5–7.
4. Singh P.M., Mahmood J. Stress assisted corrosion of waterwall tubes in recovery boiler tubes: failure analysis // J. Fail Anal. Prev. 2007. No. 7. P. 361–370.
5. Perdomo J.J., Spry T.D. An overheat boiler tube failure // J. Fail Anal. Prev. 2005. No. 5. P. 25–28.
6. Lee N.H., Kim S., Choe B.H., Yoon K.B., Kwon D.I. Failure analysis of a boiler tube in USC coal power plant // Eng. Fail Anal. 2009. Vol. 16. P. 2031–2035.
7. Satyabrata C. Some aspects of metallurgical assessment of boiler tubes – basic principles and case studies // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 432. P. 90–99.
8. Liu S.W., Wang W.Z., Liu C.J. Failure analysis of the boiler water-wall tube // Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2017. No. 9. P. 35–39.
9. Duarte C.A., Espejo E., Martinez J.C. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 79. P. 704–713.
10. Dhua S.K. Metallurgical investigation of failed boiler water-wall tubes received from a thermal power station // Eng. Fail Anal. 2010. No. 17. P. 1572–1579.
11. Ahmad J., Purbolaksono J., Beng L.C., Rashid A.Z., Khinani A., Ali A.A. Failure investigation on rear water wall tube of boiler // Eng. Fail Anal. 2009. No. 16. P. 2325–2332.
12. Яковлева С.П., Махарова С.Н. Фрактодиагностика технических объектов, разрушившихся при эксплуатации на Севере // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2020. Т. 86, № 6. С. 40–47.
13. Lepov V., Grigoriev A., Bisong M. et al. Microstructure Analyses and Multiscale Stochastic Modeling of Steel Structures Operated in Extreme Environment // Procedia Structural Integrity. 2018. No. 13. P. 1201–1208.

14. Lepov V.V., Ivanov A.M., Loginov B.A. The mechanism of nanostructured steel fracture at low temperatures // Nanotechnologies in Russia. 2008. No. 3(11). P. 734–742.

15. Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. – СПб.: СПбГАХИТ, 1998. – 146 с.

Поступила в редакцию 02.07.2020

Принята к публикации 26.08.2020

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, директор, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, wisecold@mail.ru;

АЧИКАСОВА Валентина Семеновна, ведущий инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7392-6571>, achikasova@iptpn.ysn.ru;

МАХАРОВА Сусанна Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, snmachar@yandex.ru;

ЗАХАРОВ Василий Егорович, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2405-7426>, vasss@mail.ru;

ПАВЛОВ Никита Владимирович, зав. отделом, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3936-9158>, pavlov_nv@iptpn.ysn.ru.

Информация для цитирования

Лепов В.В., Ачикасова В.С., Махарова С.Н., Захаров В.Е., Павлов Н.В. Анализ разрушения материала трубы поддува котельной, эксплуатируемой в экстремальных условиях Арктики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 143–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-14>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-14

Failure analysis of the material of water boiler pipe operated in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia)

V.V. Lepov, V.S. Achikasova, S.N. Makharova, V.E. Zakharov, N.V. Pavlov

Larionov Institute of the physical-technical problems of the North SB RAS, Yakutsk
wisecold@mail.ru

Abstract. The failure of the air-introducing pipe of water boiler in an Arctic settlement of the Republic of Sakha (Yakutia) was studied. The operation mode was studied, and the samples of the destroyed pipe material were investigated by means of optical and electron scanning microscopy. Metal composition was determined, and mechanical characteristics were evaluated. Microstructure analysis initially pointed to a strong thermal overheating of the pipe material, however, more than twofold thinning of the pipe wall and the presence of flaws that were repaired by manual arc welding several times later on proved the corrosion nature of destruction. Calculation revealed that the dew point was reached and moisture was condensed on

the pipe as a consequence of specific low-temperature regime within a large range of air humidity during the operation of the boiler. Thus, it is necessary to change the design of the boiler or the pipe material because the existing version does not suite the extremal performance conditions, since the low ambient temperature causes intensification of heat exchange, a decrease in the temperature of stack effluent, condensation of moisture and corrosion of the pipe metal.

Key words: pipe steel, thermal overheating, microstructure, electron microscopy, microhardness, spectral analysis, corrosion, dew point, fracture.

Acknowledgements. *The reported study was partially funded by RFBR, project number 18-48-140015, in theoretical and scanning microscopy research, and by Ministry of Science and Education of Russian Federation, Project III.28.1.1 in the frames of Program for Basic Research of the Siberian Branch of Russian Academy of sciences, in experimental spectral analysis, optical metallography and microhardness study. Also the research was done using equipment of the Shared core facilities of the Federal Research Center of the Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

References

1. Stennikov V.A., Petrov N.A., Ivanova I.Yu., Dobrovol'skaya T.V., Pavlov N.V. Problemy i napravleniya razvitiya teplosnabzheniya Respubliki Sakha (Yakutiya) v srednesrochnoj perspektive // Energeticheskaja politika. 2018. No. 1. P. 64–74.
2. Dobrokhoto V.I., Zhgulev G.V. Eksploatatsia energeticheskikh blokov. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 256 p.
3. Benac D.J. Failure avoidance brief: estimating heater tube life // J. Fail Anal. Prev. No. 9. 2009. P. 5–7.
4. Singh P.M., Mahmood J. Stress assisted corrosion of waterwall tubes in recovery boiler tubes: failure analysis // J. Fail Anal. Prev. 2007. No. 7. P. 361–370.
5. Perdomo J.J., Spry T.D. An overheat boiler tube failure // J. Fail Anal. Prev. 2005. No. 5. P. 25–28.
6. Lee N.H., Kim S., Choe B.H., Yoon K.B., Kwon D.I. Failure analysis of a boiler tube in USC coal power plant // Eng. Fail Anal. 2009. Vol. 16. P. 2031–2035.
7. Satyabrata C. Some aspects of metallurgical assessment of boiler tubes – basic principles and case studies // Mater. Sci. Eng. A. 2006. Vol. 432. P. 90–99.
8. Liu S.W., Wang W.Z., Liu C.J. Failure analysis of the boiler water-wall tube // Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2017. No. 9. P. 35–39.
9. Duarte C.A., Espejo E., Martinez J.C. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler // Engineering Failure Analysis. 2017. Vol. 79. P. 704–713.
10. Dhua S.K. Metallurgical investigation of failed boiler water-wall tubes received from a thermal power station // Eng. Fail Anal. 2010. No. 17. P. 1572–1579.
11. Ahmad J., Purbolaksono J., Beng L.C., Rashid A.Z., Khinani A., Ali A.A. Failure investigation on rear water wall tube of boiler // Eng. Fail Anal. 2009. No. 16. P. 2325–2332.
12. Yakovleva S.P., Macharova S.N. Fracture diagnostics of the failure of engineering objects operated in the North // Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials. 2020. No. 6 (86). P. 40–47.
13. Lepov V., Grigoriev A., Bisong M. et al. Microstructure Analyses and Multiscale Stochastic Modeling of Steel Structures Operated in Extreme Environment // Procedia Structural Integrity. 2018. No. 13. P. 1201–1208.
14. Lepov V.V., Ivanov A.M., Loginov B.A. The mechanism of nanostructured steel fracture at low temperatures // Nanotechnologies in Russia 3(11): P. 734–742.
15. Burtsev S.I., Tsvetkov Yu.N. Vlazhnii vozdukh. Sostav i svoistva. SPb.: SPb State Cold Academy, 1998. 146 p.

About the authors

LEPOV Valeriy Valerievich, doctor of technical sciences, director, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, wisecold@mail.ru;

ACHIKASOVA Valentina Semenovna, engineer, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7392-6571>, achikasova@iptpn.ysn.ru;

MAKHAROVA Susanna Nikolaevna, candidate of technical science, leading researcher, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk 677980, Russia, snmachar@yandex.ru;

ZAKHAROV Vasilii Egorovich, researcher, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-2405-7426>, vasss@mail.ru;

PAVLOV Nikita Vladimirovich, head of the department of energetics problems, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya str., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3936-9158>, pavlov_nv@iptpn.ysn.ru.

Citation

Lepov V.V., Achikasova V.S., Makharova S.N., Zakharov V.E., Pavlov N.V. Failure analysis of the material of water boiler pipe operated in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 143–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-14>

О парадигме «надежность материала»

И.О. Романов, В.М. Макиенко, Я.А. Востриков

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия
ya-vostrikov@mail.ru

Аннотация. В 2012 г. учеными материаловедов была определена целесообразность внесения изменений и предложена четырехзвенная формула парадигмы материаловедения «состав – структура – технология – свойства». При этом основной вектор ориентирования направлен на комплексный подход к изучению и созданию материалов с обязательным учетом влияния технологии получения материалов на формирование заданных свойств при конкретно выбранных составе и структуре материалов. В данной работе отражена возможность внесения изменений в общепризнанную парадигму материаловедения «состав – структура – технология – свойства». Предложено введение пятого звена – надежности, которая определяет требования к свойствам материалов и технологиям их получения, что также оказывает воздействие на выбор их состава и структуры. Кроме того, надежность является одним из критериев качества материалов и позволяет сформировать единый научный подход к его оценке. На практическом примере показаны функционально-математические зависимости единичных показателей надежности и их сопоставление со служебными характеристиками высокомарганцовистых сталей, а также применимость разработанного методологического подхода для оценки надежности и качества материала и технологий с учетом экономической целесообразности использования различных технологий. Так, с помощью предложенного методологического подхода оценки надежности деталей на примере изготовления била тонкого помола угля определено, что при изготовлении била наиболее выгодно использовать менее легированный материал, при этом существует возможность увеличения экономического эффекта, если предусмотрена возможность упрочнения рабочей поверхности.

Ключевые слова: качество, надежность, материал, свойства, соответствие, парадигма.

Введение

Необходимость реорганизации основных парадигм науки, в том числе материаловедения, неоднократно отмечалось многими учеными, например, профессорами Т. Куном [1], С.Н. Григорьевым [2], А.И. Евстигнеевым [3]. Учитывая этот фактор, а также мировой опыт развития данной области науки, профессором А.Д. Верхотуровым в 2012 г. [4,5] была определена целесообразность внесения изменений и предложена четырехзвенная формула парадигмы материаловедения «состав – структура – технология – свойства». При этом основной вектор ориентирования направлен на комплексный подход к изучению и созданию материалов с обязательным учетом влияния технологии получения материалов на формирование заданных свойств при конкретно выбранных составе и структуре материалов.

В настоящее время исследователи и разработчики новых материалов стремятся обеспечить

необходимые свойства детали (объекта) для выполнения требуемых функций. При этом многие отмечают, что изделия должны обладать высокими качеством и надежностью [6–11].

Важность формирования получения качественных материалов отмечена ведущими материаловедцами профессорами Х. Ри, Э.Г. Бабенко, А.Д. Верхотуровым и др. [12–14]. Во многих работах выделяется тот факт, что восстановление деталей материалами с новыми свойствами положительно влияет на улучшение показателей надежности машин. При этом в исследованиях особое ударение ставится на то, что для обеспечения эффективности оборудования необходимо выявление связи показателей качества с физико-конструктивными характеристиками материалов их рабочей поверхности и условий эксплуатации с применением статических методов оценки надежности. Таким образом, многие исследователи склонны считать, что конечным результатом создания материала является его качество и надежность.

Материалы и методы исследования

Определению понятия «качество» посвящено достаточно большое количество научных работ. Профессор В.Н. Протасов [15] предлагает использовать понятие «потребительское» качество, где одним из свойств называется надежность объекта. Кроме того, статистический анализ литературных данных [16, 17; и др.] позволяет определить надежность как более весомое свойство качества (по сравнению с другими его свойствами: безопасностью, технологичностью и др.).

С другой стороны, один из ведущих специалистов по теории надежности А.С. Проников говорит: «Надежность – это один из основных показателей качества изделий, проявляющийся во времени и отражающий изменения, происходящие в машине на протяжении всего времени ее эксплуатации» [18]. Основу сложившихся систем обеспечения надежности составляют тщательные физические исследования, лабораторное и эксплуатационное использование материалов деталей, узлов [19, 20].

В «классической теории» выбора материалов основным направлением считается определение долговечности детали как основного показателя надежности [21]. В качестве оптимальных принимаются решения, обеспечивающие максимальные физические показатели при приемлемых экономических затратах.

Для рассмотрения вышеуказанных единичных показателей надежности деталей (безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность) применительно к требованиям, к материалам целесообразно привести определение в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 (табл. 1).

При оценке требований надежности деталей к выбору свойств материалов в первую очередь необходимо формирование системы функционально-математических зависимостей единичных показателей надежности детали от ресурса машины в целом.

Наиболее полное описание формирования математических зависимостей единичных показателей надежности (безотказности, ремонтпригодности, сохраняемости, долговечности) деталей отражено в работах [22, 23].

После определения функционально-математических зависимостей единичных показателей надежности, а также коэффициента сохранения эффективности, определяющего надежность элемента (детали), целесообразно обозначить свойства и характеристики материала, обуславли-

вающие реализацию данных показателей (безотказность, ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность).

Применимость предлагаемого методологического подхода оценки «надежности материалов» показана на примере достаточно большой группы деталей породоразрушающего инструмента и оборудования, работающих в условиях ударно-абразивного износа и, чаще всего, изготовленных из высокомарганцевистой стали. Определение параметров надежности указанных деталей является весьма актуальной и востребованной задачей. Учитывая, что надежность деталей (как элементарных элементов системы) предъявляет требования к выбору материала, необходимо провести сопоставление единичных показателей надежности деталей и служебных характеристик материалов.

В целях визуализации сопоставления предложено параметры деталей и служебные характеристики материала отобразить в табличной форме (см. табл. 1).

Проведенный анализ системного подхода, предложенный А.И. Уемовым [25], в основу которого положен принцип комбинаторики различных точек зрения на соответствие терминов, позволяет предположить, что износостойкость в данном случае является системообразующим свойством, определяющим основные требования к материалу, обеспечивающие надежность детали в конкретно заданных условиях эксплуатации. Кроме того, анализ контекста понятий «безотказность» и «износостойкость» (см. табл. 1), а также метод «сопоставления» [24] показывают, что в понятии «износостойкость» определены конкретные функции материала и условия его эксплуатации, т. е. износостойкость является частным случаем безотказности детали, соответственно, для определения данного единичного показателя надежности возможно использование ранее изложенных подходов.

При этом свойств, соответствующих другим единичным показателям надежности высокомарганцевистых деталей (ремонтпригодности, сохраняемости и долговечности), в нормативно-технической, научной и справочной литературе не приводится.

Таким образом, наиболее значимым единичным параметром надежности высокомарганцевистых деталей породоразрушающего инструмента является износостойкость (безотказность), при этом для определения комплексного показателя

Соответствие рабочих свойств материала и показателей надежности

Table 1

Compliance of the working properties of the material and reliability indicators

Единичный показатель надежности Single reliability indicator	Определение Definition	Служебная характеристика высокомарганцевистой стали Service characteristics of high-manganese steel	Определение Definition
Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять способность выполнять требуемые функции в течение некоторого времени или наработки в заданных режимах и условиях применения	Износостойкость	Свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания
Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в его приспособленности к поддержанию и восстановлению состояния, в котором объект способен выполнять требуемые функции, путем технического обслуживания и ремонта	Твердость	Способность материала сопротивляться пластической деформации или разрушению при местном силовом воздействии
Сохраняемость	Свойство объекта сохранять способность к выполнению требуемых функций после хранения и (или) транспортирования при заданных сроках и условиях хранения и (или) транспортирования	Ударная вязкость	Способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки
Долговечность	Свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях использования, технического обслуживания и ремонта до достижения предельного состояния.		

надежности (коэффициент сохранения эффективности) [22, 23] возможно и целесообразно использование средних справочных значений единичных показателей ремонтопригодности и сохраняемости, а в качестве показателя безотказности применение значения коэффициента износостойкости детали, что позволяет сформулировать опреде-

ление «надежность материала» — это комплекс свойств и характеристик, позволяющих обеспечить реализацию единичных показателей надежности изделия (безотказность, ремонтопригодность, сохраняемость, долговечность или их различные комбинации) при заданных режимах или определенных условиях эксплуатации.

При этом необходимо учитывать, что выбор материала производится для конкретной детали при определенных условиях эксплуатации.

Результаты и обсуждение

В качестве примера рассмотрим оценку надежности материала (коэффициента сохранения эффективности как показателя надежности) при различных технологиях формирования поверхности била молотковой мельницы тонкого помола угля, которые используются на ТЭЦ для повышения эффективности сжигания угля и снижения загрязнения окружающей среды. Било изготавливается из стали 110Г13Л методом литья, весом 10 кг и при износе рабочей поверхности в среднем 4 кг, производится замена комплекта (120 штук) до тех пор, пока мельница не вырабатывает свой ресурс, который определяется предельным износом ее брони.

Оценка надежности материала для изготовления била осуществлялась по следующим вариантам: 1 – стандартное новое било из стали 110Г13Л; 2 – новое било из стали 110Г13Х2БРЛ; 3 – новое било из стали 80ГСЛ термоупрочненное; 4 – било из стали 80ГСЛ, упрочненное проволокой Св-08ХМ через легирующую пластину, содержащую 20 % карбидов вольфрама, кремния и др.; 5 – стандартное новое било из стали 110Г13Л, упрочненное по технологии 4; 6 – упрочненное новое било проволокой Св-08ХМ через легирующую пластину, содержащую 40 % карбидов.

Исходные данные для определения экономических показателей и показателей надежности материала била с учетом работ [22, 23] отражены в табл. 2. Результаты расчетов сведены в табл. 3. Анализ табл. 3 показывает, что в настоящее время по принятым технологиям все рассмотрен-

Таблица 2

Исходные данные

Table 2

Source data

Варианты изготовления била The production version bilo	Показатели безотказности детали The reliability of the part									
	$K_{Б1}$	γ	N_3	$\overline{K_{БЭ}}$	K_B	K_P	N_P	K_C	K_D	N_Φ
1	0,3	0,9	3	0,23	1	0,39	3	0,95	0,56	1
2	0,33	0,9	3	0,22	1	0,44	2	0,95	0,61	1
3	0,29	0,9	3	0,24	1	0,37	3	0,95	0,53	1

Примечание. $\overline{L_M} = 1200$ ч; $\overline{L_{H1}} = 360$ ч; $\overline{L_{H1Э}} = 324$ ч.

Note. $\overline{L_M} = 1200$ h; $\overline{L_{H1}} = 360$ h; $\overline{L_{H1Э}} = 324$ h.

Таблица 3

Сводная таблица экономических показателей и показателей надежности выбора материалов для изготовления била

Table 3

Summary table of economic indicators and indicators of reliability of the choice of materials for the manufacture of bilo

Вариант Version	Показатели надежности била Reliability indicators								$C_{3Э}$	$C_{ЭФ}$
	α	β	$K_{Б1}$	$\overline{K_{БЭ}}$	K_P	K_C	K_B	K_H	Тыс.р	Тыс.р
1	–	–	0,3	0,23	–	–	–	0,25	180	–
2	–	–	0,33	0,22	–	–	–	0,25	216	
3	–	–	0,29	0,24	–	–	–	0,25	144	
4	–	0,35	0,36	0,21	0,5	0,95	1	0,36	106	38
5	–	0,375	0,3	0,23	0,39	0,95	1	0,327	148	32
6	–	0,4	0,3	0,23	0,39	0,95	1	0,242	244	–64



Вариация реструктурированной парадигмы.

Variation of the restructured paradigm.

ные варианты равнозначны по коэффициенту надежности. Однако, при рассмотрении экономической стороны вопроса видно, что при изготовлении было наиболее выгодно использовать менее легированный материал, если при этом еще и предусмотреть возможность упрочнения рабочей поверхности, то экономический эффект возрастает.

Таким образом, тенденция в потребности учета качества и надежности материалов при определении свойств и технологий их получения, а также возможность установления математически-функциональных зависимостей единичных показателей надежности от физико-конструктивных характеристик материалов их рабочей поверхности и условий эксплуатации с применением указанного обобщенного методологического подхода по оценке комплексного показателя надежности материала позволяет прогнозировать изменения в формуле парадигмы материаловедения «состав – структура – технология – свойства» с введением нового звена «надежность» как показателя качества. При этом формула имеет не линейный характер, а подразумевает наличие взаимосвязей согласно рисунку.

Показатель надежности материала раскрывает понятие «свойства», т. е. через обобщенный показатель надежности предъявляются требования к свойствам материала, например, износостойкость, характеризующая безотказность детали (как в описанном выше случае). С другой стороны, зная свойства, становится возможным говорить о надежности материалов, тем самым прогнозируя их качество. Аналогичным образом прослеживается взаимосвязь надежности и технологии получения материалов, при этом возможен как комплексный подход, позволяющий учитывать и прогнозировать как одновременно и свойства материалов, и технологию, так и только технологию.

Выводы

Повышенные требования потребителя к конечному продукту производства предопределяют

необходимость внесения изменений в методологические подходы при разработке новых материалов, в том числе и единообразие в оценке и прогнозировании эксплуатационных качеств и характеристик, одной из которых является качество, предложенное многими исследователями. При этом определяющим свойством является надежность материала, что позволяет установить функционально-математические зависимости единичных показателей от физико-конструктивных свойств.

Литература

1. Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс, 1977. 300 с.
2. Григорьев С.Н. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровов для применения в инструментальном производстве // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2011. № I-1(1). С. 92–98.
3. Муравьев В.И., Евстигнеев А.И., Бахматов П.В., Бутин А.В. Аналитическая оценка и разработка методов повышения коррозионной стойкости конструкционных сталей ТСПН // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2011. № IV-1(8). С. 92–98.
4. Верхотуров А.Д. Григорий Валентинович Самсонов – основатель новой парадигмы в материаловедении // Г.В. Самсонов – ученый, учитель, друг. Киев: Наукова думка, 2012. С. 53–63.
5. Верхотуров А.Д., Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А. и др. К вопросу о новой парадигме материаловедения // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2014. № III-1(19). С. 92–98.
6. Козлов С.И. Совершенствование ремонтов как условие промышленной безопасности металлургических предприятий // Механическое оборудование металлургических заводов. 2015. № 2 (5). С. 69–74.
7. Milojević I.S., Rade V. Guberinić stochastic model of forecasting spare parts demand // Vojnotehnički Glasnik. 2012. Vol. 60(1). P. 216–234. DOI 10.5937/vojtehg1201216M.
8. Fragassa C., Pavlovic A., Massimo S. Using a total quality strategy in a new practical approach for improving the product reliability in automotive industry // International Journal for Quality Research. 2014. Vol. 8(3). P. 297–310.
9. Stere A. Dependability and reliability of manufacturing systems // Fiabilitate și Durabilitate. 2014. No. 1 Suppl. 1. P. 99–105.
10. Косимов К., Мамаджанов П., Махмудов Р. Композиционные порошковые материалы для упроч-

нения поверхностей деталей машин // Российский электронный научный журнал. 2014. № 1. С. 29–35.

11. Байгильдин Д.Ю. Обзор существующих современных материалов для восстановления деталей машин // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-1. С. 16–18.

12. Меднева А.В., Ри Э.Х., Хосен Р. и др. Электродные материалы из алюминидов никеля для электроискровой обработки // Ученые заметки ТОГУ. Электронное научное издание. 2016. Т. 7, № 4. С. 321–324.

13. Бабенко Э.Г. Теоретические и технологические основы повышения качества и свойств сплавов (покрытий) при электротермических процессах на базе создания легирующих сварочно-наплавочных материалов с использованием минерального сырья: дисс. д-ра техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2002.

14. Химухин С.Н., Верхотуров А.Д. Электродный материал из белых чугунов, легированных вольфрамом // Перспективные материалы. 2006. № 5. С. 49–53.

15. Протасов В.Н. Методология выбора материалов потребительского качества для машиностроительной продукции // Территория Нефтегаз. 2011. № 4. С. 24–29.

16. Стопалов С. Надежность тракторов. Долговечность и безотказность – что важнее? // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2011. № 7. С. 24–28.

17. Бондарева Г.И. Повышение надежности машин путем разработки и оптимизации способов вос-

становления работоспособности машин и оборудования // Международный научный журнал. 2010. № 5. С. 85–92.

18. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

19. Кугель Р.В. О натурных испытаниях долговечности деталей и агрегатов машин. М.: Машиностроение, 1970. 237 с.

20. Решетов Д.Н. Надежность и долговечность машин. Учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1988. 240 с.

21. Кугель Р.В. Долговечность автомобилей / под ред. д.т.н, проф. А.А. Липгарта. М.: ГНТИ Машиностроительной лит-ры. 1961. 432 с.

22. Стрельцов А.С., Романов И.О. Система оценок показателей надежности машин и диагностики экономической целесообразности восстановления и упрочнения деталей машины // Сварка и диагностика. 2016. № 5 (59). С. 30–35.

23. Романов И.О., Стрельцов А.С. Функционально-математическое определение показателей надежности и установление зависимости комплексного показателя от единичных на стадиях изготовления и восстановления деталей, определяющих безотказность машины // Надежность. 2018. Т. 18, № 2. С. 10–16.

24. Макаев Э.А. Общая теория сравнительного языкознания. М.: Наука, 1977. 205 с.

25. Уемов А.И. Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с.

Поступила в редакцию 03.06.2020

Принята к публикации 28.07.2020

Об авторах

РОМАНОВ Игорь Олегович, кандидат технических наук, доцент, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-0647-1677>, ig_romanov@mail.ru;

МАКИЕНКО Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-0532-7761>, Mvm_tm@festu.khv.ru;

ВОСТРИКОВ Ярослав Алексеевич, старший преподаватель, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-4328-0976>, ya-vostrikov@mail.ru.

Информация для цитирования

Романов И.О., Макиенко В.М., Востриков Я.А. О парадигме «надежность материала» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 3. С. 152–159. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-15>

About the «reliability of the material» paradigm

I.O. Romanov, V.M. Makienko, Y.A. Vostrikov

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia
ya-vostrikov@mail.ru

Abstract. In 2012, materials scientists determined the feasibility of making changes and proposed a four-part formula for the materials science paradigm «composition-structure-technology-properties». At the same time, the main orientation vector is aimed at a complex approach to the study and creation of materials with a mandatory account of the influence of the technology of obtaining materials on the formation of specified properties with a specifically selected composition and structure of materials. This paper reflects the possibility of making changes to the generally accepted paradigm of materials science «composition – structure – technology – properties». It is proposed to introduce the fifth link – reliability, which determines the requirements for the properties of materials and technologies for their production, which also affects the choice of their composition and structure. In addition, reliability is one of the criteria for the quality of materials and allows you to form a unified scientific approach to its assessment. The practical example shows the functional and mathematical dependences of individual reliability indicators and their comparison with the service characteristics of high-manganese steels, as well as the applicability of the developed methodological approach to evaluate the reliability and quality of materials and technologies, taking into account the economic feasibility of using various technologies. Thus, using the proposed methodological approach to assess the reliability of parts, by the example of the manufacture of fine-ground coal bilo, it is determined that it is most profitable to use less alloyed material in the manufacture of bilo, while there is a possibility of increasing the economic effect if the possibility of working surface hardening is provided.

Key words: quality, reliability, material, properties, compliance, paradigm.

References

1. Kun T. Struktura nauchnykh revolyucij. M.: Progress, 1977. 300 p.
2. Grigor'ev S.N. Tekhnologicheskie principy osazhdeniya iznosostojkikh nanopokrytij dlya primeneniya v instrumental'nom proizvodstve // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike. 2011. No. I-1(1). P. 92–98.
3. Murav'ev V.I., Evstigneev A.I., Bahmatov P.V., Butin A.V. Analiticheskaya ocenka i razrabotka metodov povysheniya korrozionnoj stojkosti konstrukcionnykh stalej TSPN // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike. 2011. No. IV-1(8). P. 92–98.
4. Verhoturov A.D. Grigorij Valentinovich Samsonov – osnovatel' novoj paradigmy v materialovedenii // G.V. Samsonov – uchenyj, uchitel', drug. Kiev: Naukova dumka, 2012. P. 53–63.
5. Verhoturov A.D., Mokrickij B.Ya., Pustovalov D.A. et al. K voprosu o novoj paradigme materialovedeniya // Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Nauki o prirode i tekhnike. 2014. No. III-1(19). P. 92–98.
6. Kozlov S.I. Sovershenstvovanie remontov kak uslovie promyshlennoj bezopasnosti metallurgicheskikh predpriyatij // Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov. 2015. No. 2 (5). P. 69–74.
7. Milojević I.S., Rade V. Guberinić stochastic model of forecasting spare parts demand // Vojnotehnički Glasnik. 2012. Vol. 60(1). P. 216–234. DOI 10.5937/vojtehg1201216M.
8. Fragassa C., Pavlovic A., Massimo S. Using a total quality strategy in a new practical approach for improving the product reliability in automotive industry // International Journal for Quality Research. 2014. Vol. 8(3). P. 297–310.
9. Stere A. Dependability and reliability of manufacturing systems // Fiabilitate și Durabilitate. 2014. No. 1. Suppl. 1. P. 99–105.
10. Kosimov K., Mamadzhanov P., Mahmudov R. Kompozicionnye poroshkovye materialy dlya uprochneniya poverhnostej detalej mashin // Rossijskij elektronnyj nauchnyj zhurnal. 2014. No. 1. P. 29–35.
11. Bajgil'din D.Yu. Obzor sushchestvuyushchih sovremennykh materialov dlya vos-stanovleniya detalej mashin // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. No. 5-1. P. 16–18.

12. Medneva A.V., Ri E.H., Hosen R. et al. Elektrodnye materialy iz alyuminidov nikelya dlya elektroiskrovoj obrabotki // Uchenye zametki TOGU. Elektronnoe nauchnoe izdanie. 2016. Vol. 7, No. 4. P. 321–324.
13. Babenko E.G. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy povysheniya kachestva i svoystv splavov (pokrytij) pri elektrotermicheskikh processah na baze sozdaniya legiruyushchih svarочно-naplavochnykh materialov s is-pol'zovaniem mineral'nogo syr'ya: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni dokt. tekhn. nauk. Komsomol'sk-na-Amure, 2002.
14. Himuhin S.N., Verhoturov A.D. Elektrodnyj material iz belyh chugunov, legirovannyh vol'framom // Perspektivnye materialy. 2006. No. 5. P. 49–53.
15. Protasov V.N. Metodologiya vybora materialov potrebitel'skogo kachestva dlya mashinostroitel'noj produkcii // Territoriya Neftegaz. 2011. No. 4. P. 24–29.
16. Stopalov S. Nadezhnost' traktorov. Dolgovechnost' i bezotkaznost' – chto vazhnee? // Sel'skohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont. 2011. No. 7. P. 24–28.
17. Bondareva G.I. Povyshenie nadezhnosti mashin putem razrabotki i optimizacii sposobov vosstanovleniya rabotosposobnosti mashin i oborudovaniya // Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. 2010. No. 5. P. 85–92.
18. Pronikov A.S. Nadezhnost' mashin. M.: Mashinostroenie, 1978. 592 p.
19. Kugel' R.V. O naturnyh ispytaniyah dolgovechnosti detalej i agregatov mashin. M.: Mashinostroenie, 1970. 237 p.
20. Reshetov D.N. Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin. Ucheb. posobie dlya mashinostr. spec. vuzov. M.: Vysshaya shkola, 1988. 240 p.
21. Kugel' R.V. Dolgovechnost' avtomobilej / pod red. d.t.n. prof. A.A. Lipgarta. M.: GNTI Mashinostroitel'noj lit-ry. 1961. 432 p.
22. Strel'cov A.S., Romanov I.O. Sistema ocenok pokazatelej nadezhnosti mashin i diagnostiki ekonomicheskoy celesoobraznosti vosstanovleniya i uprochneniya detalej mashiny // Svarka i Diagnostika. 2016. No. 5 (59). P. 30–35.
23. Romanov I.O., Strel'cov A.S. Funkcional'no matematicheskoe opredelenie pokazatelej nadezhnosti i ustanovlenie zavisimosti kompleksnogo pokazatelya ot edinichnyh na stadiyah izgotovleniya i vosstanovleniya detalej, opredelyayushchih bezotkaznost' mashiny // Nadezhnost'. 2018. Vol. 18. No. 2. P. 10–16.
24. Makaev E.A. Obshchaya teoriya sravnitel'nogo yazykoznaniya. M.: Nauka, 1977. 205 p.
25. Uemov A.I. Sistemnyj podhod i obshchaya teoriya sistem. M.: Mysl', 1978. 272 p.

About the authors

ROMANOV Igor Olegovich, candidate, associate professor, Far Eastern State University of Railway Transport, 47 Seryshev str., Khabarovsk 680021, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-0647-1677>, ig_romanov@mail.ru;

MAKIENKO Victor Mihailovich, doctor of technical sciences, professor, Far Eastern State University of Railway Transport, 47 Seryshev str., Khabarovsk 680021, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-0532-7761>, Mvm_tm@festu.khv.ru;

VOSTRIKOV Yaroslav Alekseevich, senior lecturer, Far Eastern State University of Railway Transport, 47 Seryshev str., Khabarovsk, 680021, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-4328-0976>, ya-vostrikov@mail.ru.

Citation

Romanov I.O., Makienko V.M., Vostrikov Y.A. About the «reliability of the material» paradigm // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, No. 3. P. 152–159. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-15>

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

1. Все текстовые файлы, включая таблицы, должны быть подготовлены в формате Microsoft Word. Формат страниц А4, поля: сверху и снизу – 2,0 см, слева – 3,0 см, справа – 1,5 см. Текст должен быть черного цвета, шрифт Times New Roman **14 pt**, межстрочный интервал (за исключением таблиц) – 1,5 pt. Абзацный отступ – 1,25. Общий объем рукописи, включая все иллюстрации (6–8 рис.) и таблицы (1–3), 10–30 стр.

2. Общий вид статьи

2.1.

- УДК;
- название статьи (не более 10 слов) должно соответствовать тематике журнала;
- фамилии и инициалы авторов;
- место работы каждого автора, город, страна;
- электронный адрес контактного лица;
- расширенная аннотация (150–250 слов): должны быть отражены содержание рубрик статьи и информативно представлены результаты работы – введение, материалы и методы, результаты исследования, обсуждение и заключения. Текст аннотации приводится в прошедшем времени.
- ключевые слова (5–10);
- благодарности: указываются все источники финансирования исследования и благодарности людям.

2.2. Перед основным текстом статьи вся информация, представленная в п.2.1., приводится на английском языке. Фамилии на английском языке указываются в соответствии с их написанием в ORCID ID, Researcher ID.

2.3. Текст статьи (на русском языке). Содержание статьи должно соответствовать тематике, целям и задачам журнала. Материал статьи (кроме обзоров) должен быть изложен в следующей последовательности с выделением жирным шрифтом названий разделов (без нумерации): введение (цели, актуальность), материалы и методы исследования, результаты и обсуждение, выводы или заключение.

Текст заключения (используется настоящее время) может содержать сравнение с предыдущими работами, наметить основные направления в дальнейших исследованиях, идеи, что предстоит делать.

2.4. Список литературы (не менее 25–40 работ) приводится на русском языке и латинице (References). Желательны ссылки на работы последних лет, ограничить ссылки на свои работы. К статьям в списке литературы указывается DOI (где есть).

Ссылки на литературу даются в тексте в квадратных скобках. Список литературы (литература) оформляется в порядке упоминания в соответствии с требованием ГОСТ Р 7.0.5-2008.

3. После списка литературы приводится:

- информация об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание, должность;
- аффилиация авторов: полное официальное название организации, полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну), указываются все места работы, имеющие отношение к проведению исследования;
- ORCID ID, Researcher ID, e-mail.

Приводится на русском и английском языках.

4. Рисунки (цветные, черно-белые, серые, штриховка) должны быть оформлены в виде отдельных графических файлов, допустимые растровые форматы: TIFF, JPG, PDF, PNG, при этом разрешение должно быть не менее 300 dpi. При использовании векторной графики допускаются любые форматы, включая CDR, EPS, AI, WMF, EMF, Surfer, Grapher, при условии их качественного экспорта в PDF.

Фотографии представляются в виде отсканированных или цифровых изображений с разрешением не менее 300 dpi. Желательно представить также оригиналы.

Все рисунки и фотографии должны иметь подрисуночные подписи на русском и английском языках

5. Таблицы должны быть оформлены в книжном формате объемом не более одной страницы вместе с заголовком и примечаниями, размер шрифта – не менее 9 pt. Предпочтительны таблицы, пригодные для редактирования, не скан. Все таблицы должны иметь заголовки.

Названия таблицы, столбцов и строк должны быть переведены на английский язык.

6. Обозначения, принятые в статье, должны быть пояснены при изложении.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

7. Статья должна быть подписана всеми авторами (на последней странице).

8. Рукописи, оформленные не в соответствии с указанными требованиями, не принимаются.

9. Редакция журнала к каждой статье через систему CrossRef присваивает DOI.

Статья представляется в редакцию (677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33) в одном печатном экземпляре и в электронном виде в формате MSWord (на любом носителе или на e-mail: no.usn@mail.ru) вместе со следующими сопроводительными документами:

1. Официальное направление от организации, в которой выполнена работа, с указанием, что данный материал не был опубликован в других изданиях.

2. Экспертное заключение организации о возможности опубликования в открытой печати.

3. Сведения об авторах (всех): полное ФИО, место работы, должность, ученая степень, ученое звание, электронный адрес (при публикации e-mail первого автора будет указан в сноске на первой стр. статьи), контактный телефон.

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *Н.В. Счастнева*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *А.А. Николашкиной*

Дата выхода в свет 30.09.2020. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 18,8. Тираж 100 экз. Заказ № 89. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, pras.ysn.ru

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес издательства:

Издательство СО РАН
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
E-mail: psb@sibran.ru
тел. (383) 330-80-50

Отпечатано в Издательстве СО РАН
Интернет-магазин Издательства СО РАН
<http://www.sibran.ru>