

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2020, Том 25, № 2

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.ysn.ru>

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

Подписной индекс в каталоге Почта России – ПР046
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. 2

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

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

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

Editor-in-Chief

V.V. Filippov

Corresponding Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief:

N.G. Solomonov

Corresponding Member of RAS

Yu.M. Grigoriev

Dr. of Physico-Mathematical Sciences

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<http://nras.ysn.ru>

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
Хубберт 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>Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С.</i> Seismotectonics of the northern sector of the Verkhoyansk fold system (northeast of the Russian Arctic).....	7
<i>Kostin A.V.</i> Immiscible silica- and iron-rich melts at the Kildyam volcano complex (central Yakutia, Russia)	20
<i>Коногорова Д.В., Ковальчук О.Е., Бардухинов Л.Д., Кедрова Т.В.</i> Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Накынское кимберлитовое поле, Западная Якутия)	
<i>Павлов И. С., Suzuki N.</i> Табаюрахский мамонт (<i>Mammuthus primigenius</i> Blum., 1799), о.Котельный, Новосибирский архипелаг.....	
<i>Климовский А.И.</i> Костные остатки <i>Mammuthus primigenius</i> с окрестностей с. Даппарай, Олекминский район	32

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Готовцев С.П., Климовский И.В.</i> О геокриологической изученности южной части Западной Якутии.....	
<i>Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В., Лобанов А.Л., Данзанова М.В.</i> Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы.....	43

Общая биология

Экология

<i>Протопопов А.В., Протопопова В.В.</i> Степной компонент позднеплейстоценовых экосистем Якутии	51
<i>Порядина Л.Н.</i> Материалы к лишенобиоте Центральной Якутии	68

Биологические ресурсы

<i>Исаев А.П., Бочкарев В.В., Соломонов Н.Г., Кириллин Р.А., Шемякин Е.В., Габышев В.Ю.</i> Общий обзор фауны отряда Соколообразные (Falconiformes) на Средней Лене	76
<i>Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю.</i> Сравнительная характеристика лесных массивов с использованием дешифрирования снимков сверхвысокого разрешения	85
<i>Краснова А.Н., Польшина Т.Н.</i> Редкая аномалия «ветвистость» <i>typha grossheimii</i> poded. гидрофильного рода <i>typha</i> l. (typhaceae)	94

Металлургия и материаловедение

Материаловедение

<i>Сукнёв С.В.</i> Квазихрупкое разрушение структурно-неоднородного материала с круговым отверстием при сжатии.....	101
---	-----

<i>Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г.</i> Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена	101
<i>Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Попов С.Н.</i> Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена	118

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

- Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S.* Seismotectonics of the northern sector of the Verkhoyansk fold system (northeast of the Russian Arctic)..... 7
- Kostin A.V.* Immiscible silica- and iron-rich melts at the Kildyam volcano complex (central Yakutia, Russia) 20
- Konogorova D.V., Kovalchuk O.E., Bardukhinov L.D.* Unique diamond from the Nyurbinskaya pipe (Nakyn kimberlite field, West Yakutia, Russia) 20
- Pavlov I., Suzuki N.* Tabayuryakhsky mammoth (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799), from the island of Kotelný, Novosibirskiy Archipelago 20
- Klimovsky A.I.* The bone remains of *Mammuthus primigenius* from the vicinity of Dapparay village, Olekminsky District, Southern Yakutia..... 32

Engineering geology, permafrost and soil science

- Gotovtsev S.P., Klimovsky I.V.* On the geocryological studies on the southern part of western Yakutia 43
- Zhang R.V., Pavlova N.A., Ogonerov V.V., Lobanov A.L., Danzanova M.V.* Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects 43

General biology

Ecology

- Protopopov A.V., Protopopova V.V.* Steppe component of the Late Pleistocene ecosystems of Yakutia 51
- Poryadina L.N.* Materials on the lichenbiota of Central Yakutia..... 68

Biological resources

- Isaev A.P., Bochkarev V.V., Solomonov N.G., Kirillin R.A., Shemyakin E.V., Gabyshev V.Yu.* General overview of the Falconiformes fauna of the Middle Lena valley and adjacent territories 76
- Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu.* Comparative characterization of forests using the interpretation of ultra-high resolution images..... 85
- Krasnova A.N., Polshina T.N.* A rare branching anomaly of *TYPHA GROSSHEIMII* POBED. of the hydrophilic genus *TYPHA* L. (TYPHACEAE)..... 94

Metallurgy and materials science

Materials science

- Suknev S.V.* Quasi-Brittle Fracture of a Structurally Inhomogeneous Material with a Circular Hole Under Compression..... 101

<i>Vasilev A.P., Okhlopkova A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G.</i> Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene	101
<i>Markova M.A., Petrova P.N., Fedorov A.L., Popov S.N.</i> Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene	118

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология, минералогения

УДК 551.248(571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-1

Seismotectonics of the northern sector of the Verkhoyansk fold system (north-east of the Russian Arctic)

L.P. Imaeva¹, G.S. Gusev², V.S. Imaev^{1,3}

¹*Institute of the Earth's Crust SB of RAS, Irkutsk, Russia*

²*Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements RAS, Moscow, Russia*

³*Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia*

*imaeva@crust.irk.ru

Abstract. *In the northern sector of the Verkhoyansk fold system, tectonic structures are separated by crustal geoblocks of different ages, which belong to the Siberian platform and the Mesozoic Laptev Sea plate. These geoblocks are key objects of studies aimed at clarifying the evolution of the transitional 'continent-shelf' zone of the Arctic boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates. Our study focused on the northern sector of the Verkhoyansk fold system and aimed to clarify regularities of seismotectonic destruction of the crust. We analyzed the seismotectonic data on neotectonic structures located in the Kharaulakh segment and the Lena River Delta, geological and geophysical structural features, active faults, modern structural plans, and the dynamic characteristics of the present-day terrain. Based on the comprehensive analysis of the study results, we identified for the first time a system of conjugated active strike-slip faults that reflect the structural plan of the northern sector of the Verkhoyansk fold system. In the sublongitudinal direction along the Ust-Lena right-lateral strike-slip fault, a structural boundary is traced as a major element of the kinematic plan of the modern structures, which predetermines the seismotectonic parameters of the zones of increased seismic activity. In small-scale geological and tectonic maps, as well as in satellite images, the Ust-Lena fault is structurally manifested from the Lena River Delta to the Orulgan segment of the Verkhoyansk fold system. The Bulun fields of earthquake epicenters ($M_w = 6.8-7.0$) and a wide zone of seismic dislocations varying in genesis are located at the southeastern termination of this fault. We analyzed the state of crustal stress across the study area using the tectonophysical data on the Late Cenozoic rupturing and folding deformations along with seismological data, and conclude that this is a unique transitional region wherein the mid-oceanic and continental crustal structures are conjugated, and the tectonic stress field changes from extension to compression. This study clarifies the kinematic plan of the modern structures in the shelf-continent transition zone of the Arctic boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates. The study results can be useful for Arctic shelf development projects of Russian and foreign companies.*

Key words: Arctic segment of the boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates, northern sector of the Verkhoyansk fold system, continent-shelf zone, modern structures, active faults, kinematic types, earthquake focal mechanism, seismotectonic deformations, tectonic stress types, dynamic model of modern structures.

Acknowledgements. *The studies were carried out under the RFBR Project 19-05-00062 – Dynamics of the modern structures of the continental-shelf zone in the northeastern sector of the Russian Arctic.*

Introduction

The Arctic boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates has been explored, but modern structures of the shelf-continent transition zone remain the least studied. Most stud-

ies of this region are devoted to the Laptev Sea riftogenesis [1–4 et al.] and the dynamics of seismo-generating structures in the adjacent segments of the continental Arctic-Asian seismic belt [5–7 et al.]. Many publications state that in the Kharaulakh seg-

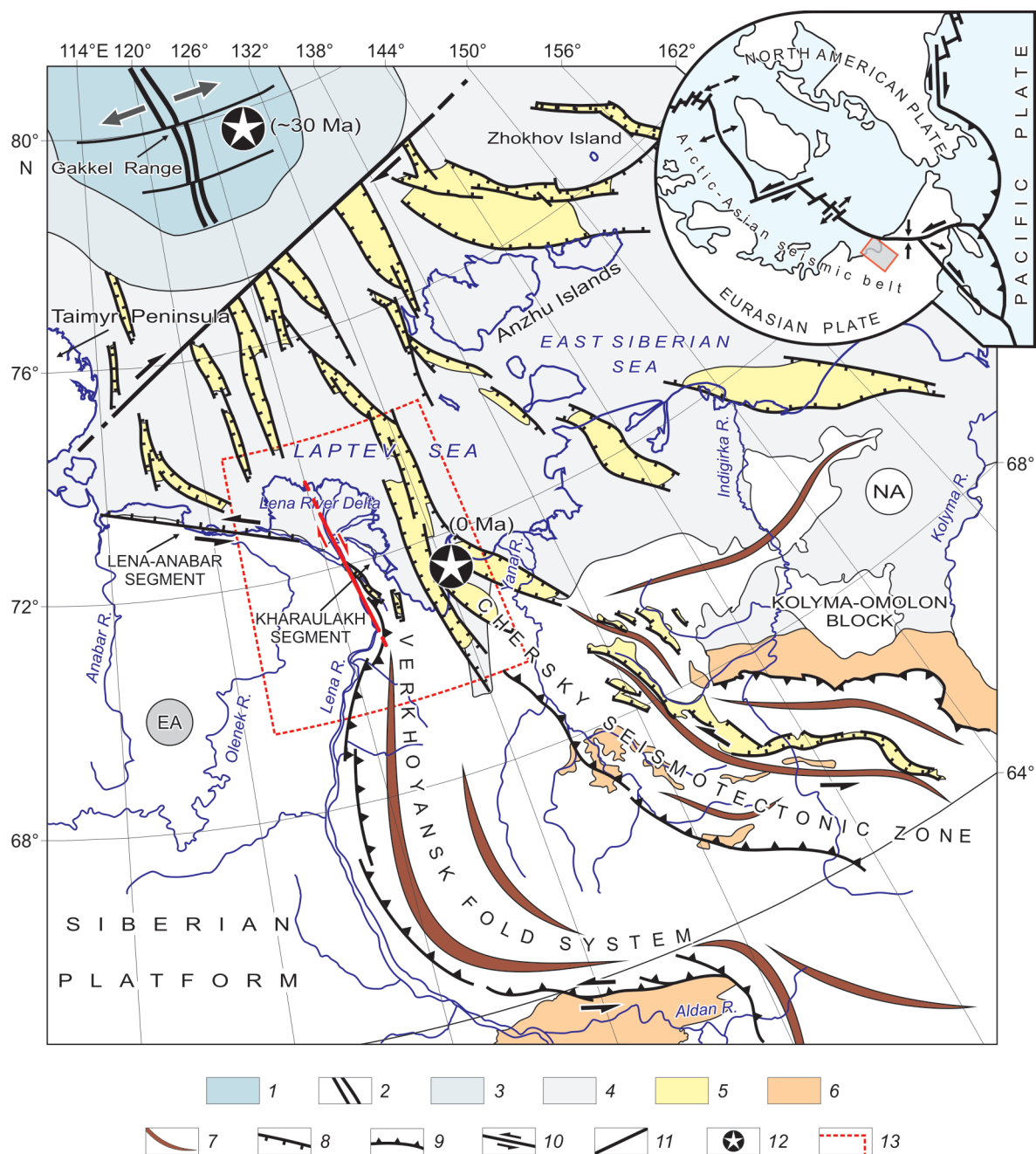


Fig. 1. Cenozoic tectonics of the Arctic sector of the Eurasian-North American lithospheric plate boundary (modified after [30]). Lithospheric plates: EA– Eurasian; NA– North American.

Inset: notation of study area.

1 – Eurasian Basin; 2 – Gakkel spreading ridge; 3 – continental slope; 4 – cover of Pliocene–Quaternary deposits; 5 – rift basins; 6 – Cenozoic depressions (piedmont and intermontane troughs); 7 – mountain ranges; 8 – normal faults; 9 – reverse and thrust faults; 10 – strike-slip faults (red – Ust-Lena fault); 11 – transform fault; 12 – locations of rotation poles for the Eurasian and North American plates in different time intervals (after [31]); 13 – study area.

ment of the Verkhoyansk fold system and the Lena River Delta, extensional zones and seismic activity of neotectonic structures developed under the influence of rifting in the Laptev Sea shelf (Fig. 1).

Our study focused on the northern sector of the Verkhoyansk fold system, which is a unique geodynamic polygon. Field seismotectonic surveys and studies of the Late Cenozoic tectonic stress field of the study area were complemented by investigations of paleoearthquake traces in the zones influenced by large active faults. We investigated the interactions of seismogenerating structures that developed in the zone of transition from the rift depressions extending from the mid-Arctic Gakkel ridge to the Laptev Sea shelf and further into the Chersky seismotectonic zone of the Eurasian continent. Based on our research algorithm, we identified zones with different tectonic regimes of the stress-strain state of the crust and constructed a regional structural-dynamic model of the main seismogenerating structures of the study area.

The research objectives were as follows:

- Analyze earthquake epicenter distribution patterns based on records of both stationary and temporary networks of field seismic stations;
- Determine the kinematic type of seismotectonic deformations in focal areas of earthquakes with $M_w = 4.3-5.5$;
- Consolidate a unified catalog of earthquake source parameters;
- Identify the zones of active fracturing that influence the stress-strain state of the crust of conjugated blocks and segmentation of modern structures;
- Identify uniformly deformed dynamic segments within the modern structures of the Kharaulakh segment of the Verkhoyansk fold system and the Lena River Delta and clarify their genesis; and
- Determine the structural-kinematic plan of the junction of the main geostructures in the shelf-continent transition zone of the Arctic boundary between the Eurasian and North American lithospheric plates.

Our comprehensive study used data from new regional case studies implemented by the authors and data on the geology, tectonics, geophysics, seismogeology, and hydrogeology of the study area from publications by industrial and research organizations.

Research methods

Our seismotectonic studies are based on the concept envisaging the structural and dynamic uniformity of the geophysical medium and specific regulari-

ties of seismogeodynamic processes taking place in this medium. The research methodology was developed by the Institute of Physics of the Earth RAS [8, 9] and supplemented as described in [7, 10, 11]. The research algorithm starts with establishing the general trends in the neotectonic development of the study area. Modern (Late Cenozoic) structures in the study area were analyzed considering the recent tectonics as a structural framework comprising active faults and other features demonstrating the present-day tectonic activity related to the regional seismicity. Neotectonic structures of the Russian Arctic are ranked by degree of activity according to the regional principles of the classification described in [7, 10, 11].

In our study, a domain is a neotectonic geodynamic taxon of the territorial rank, which is considered as a spatially-localized integral object with multifactor interactions between its main components. The classification of domains is a multi-level system including eight classes of activity of modern geodynamic processes that lead to the formation of neotectonic structures. Each activity class is characterized by its specific and optimal set of features pertaining to tectonics (geodynamic setting), geophysics (heat flow, gravity field anomalies, and crustal thickness), morphostructure (elevation, difference between the highest and lowest elevations, and rates of vertical and horizontal movement of the ground surface), material, deformation features, and GPS measurements. Additionally, the inherited dynamics of the neotectonic structures were considered with respect to conditions in previous stages of domain development. To assess the modern geodynamic activity and specify the class of each domain, we interpreted both its primary and additional features. Three groups of activity classes were distinguished as follows: low activity (classes 1–2), moderate activity (classes 3–5), and high activity (classes 6–8). The characteristics for the domains specified in the northern sector of the Verkhoyansk fold system are shown in Fig. 2.

The next stage of the study aimed to identify the most probable areas of recent activity for a more detailed investigation and search for reference objects. Large-scale morphostructural and structural-dynamic mapping was carried out to provide the two components of morphotectonic analysis. The main concept for this analysis is consistency between terrain features and corresponding rates and types of endogenous processes. Relative movements of crustal blocks during neotectonic activity

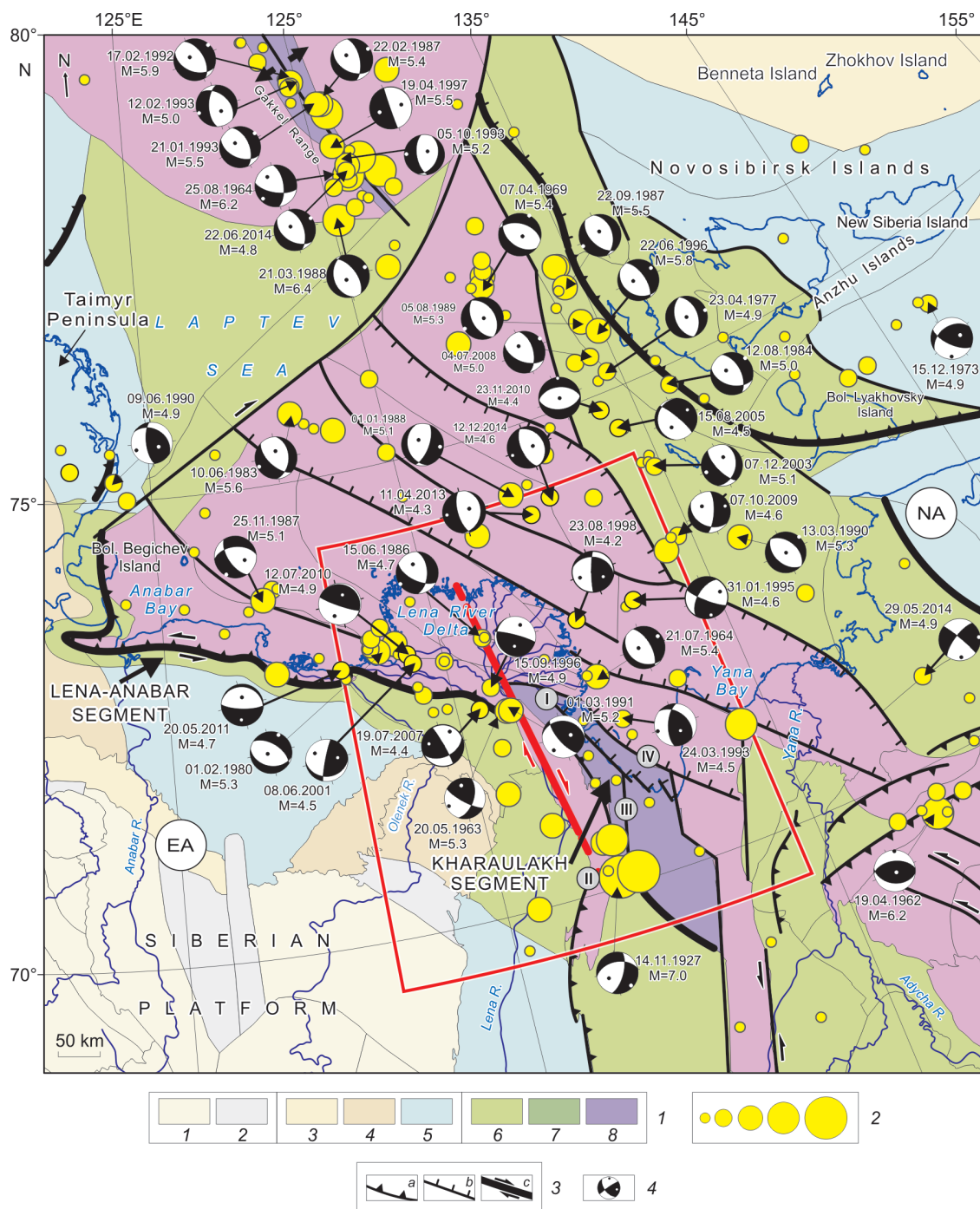


Fig. 2. Geodynamic activity of neotectonic structures in the Arctic sector of the Eurasian-North American lithospheric plate boundary (modified after [6]). Lithospheric plates: EA – Eurasian; NA – North American. Active fault systems: I – Primorsky, II – Verkhoyansk, III – Kharaulakh, IV – Buor-Khaya. I – classes of geodynamic activity: low (1–2), moderate (3–5), high (6–8); 2 – earthquake epicenters (M_w): ≤ 4.0 , 4.1–5.0, 5.1–6.0, 6.1–7.0, and ≥ 7.0 (data from [6]); 3 – kinematics of active faults: thrusts (a), normal faults (b), strike-slip faults (red – Ust-Lena fault) (c); 4 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), emergence of the main compression and extension stress axes (black and white dots, respectively).

cycles create the main features of the terrain – morphostructures bordered by active faults. The types of endogenous geodynamics are reflected in the

features of modern geodynamic activity within the blocks of various ranks, as well as in the linear fault zones separating the blocks.

The data base, including geological, geophysical, and seismological data from the study area, provides the basis for investigating the structural-dynamic features of the main fields of earthquake epicenters characterized by a maximum seismic potential. To this end, large-scale remote images and laser-scanning images of the pleistoseist areas of strong earthquakes were deciphered which allowed preliminary mapping of active faults, diagnostics of fault kinematics, and selection of sites for detailed field surveys. Attention was given to additional indicators of recent fault activity, such as displacements identified by repeated geodetic surveys; earthquake epicenters confined to the zones of dynamic influence of faults; focal mechanisms of earthquakes as indicators of the dynamics; directions of crustal movements; geothermal and gas-hydrochemical anomalies (evidence of increased crustal permeability); and seismic profiling, seismic survey, gravimetric, and electrical survey data. Field studies were carried out to collect and clarify the information on deformation and displacements of young terrain elements and sediments, determine their ages, and discover evidence of strong paleo- and modern earthquakes. Trenching was performed on seismogenic deformation sites. Based on the field database, it was possible to clarify the kinematic types of the Late Cenozoic folds and faults and the structural parageneses of active faults. The kinematic types of the contact zones of the main seismogenerating structures were determined, and models showing the regional structures and dynamics were created. The experience of Russian and international joint research projects shows that the sequence of data collection and processing described above ensures that the resultant datasets provide for a comprehensive and reliable investigation of modern seismogeodynamic processes.

Seismotectonics of the Kharaulakh segment

Geological and tectonic structure. The Kharaulakh segment of the northern sector of the Verkhoyansk fold system includes the southern termination of the rift depressions in the Laptev Sea shelf and the coastal conjugated structures that belong to the Chersky seismotectonic zone (Fig. 1, 2). The sediments observed in this area cover a wide age range, from the Upper Proterozoic to the Cenozoic inclusively (Fig. 3). In terms of tectonics, the Kharaulakh segment is a frontal zone of the Verkhoyansk fold system that formed mainly in the Early Cretaceous [12, 13]. This segment began to form in the Riphean

at the Siberian platform margin and developed as an extensive passive continental margin in the course of its long-term evolution, which is manifest in its structure and types of dislocations observed. Based on the structural and geometrical analyses of the structure-forming zones of the Kharaulakh segment, it is possible to distinguish two phases of Mesozoic folding. In the first phase, folding occurred in the eastern part of the segment, as evidenced by the northeast-striking folds and faults. In the second phase, sublongitudinal folds deviating to the northwest were formed. It is probable that the second phase included the formation of the main thrust structures and the knee bend of the Kharaulakh segment, which strikes along the left bank of the Lena River Delta to the fold zone of the Olenek sector of the Lena-Anabar segment (Fig. 1, 2).

Cenozoic events in the study area were related to the interaction of the North American and Eurasian lithospheric plates in northeastern Asia. At the beginning of the Cenozoic, this territory was involved in intensive tectonic processes associated with rifting along the continental continuation of the Gakkel spreading ridge. The continental crust was partially destructed over vast areas, including the northern sector of the Verkhoyansk fold system [2, 5, 14]. The Cenozoic megacomplex contains mainly Paleocene–Eocene continental sediments observed with a sharp angle discordance at different horizons of the dislocated Precambrian–Mesozoic megacomplex. The sediments fill a series of sublongitudinal depressions formed during the earliest phase of rifting in the continental continuation of the Gakkel spreading ridge. At some locations, the Paleogene sediments are folded and disturbed by thrusts and reverse faults. At the eastern sides of the Kengdei, Naiba, and other small depressions, local thrusts are confirmed by direct structural observations and exploratory drilling materials.

In the field study of the Kengdei River, we observed a gently dipping thrust and a contact of essentially sandy and mainly coal-bearing beds of Lower Eocene age (Fig. 4). The footwall of the thrust is an aleurite-sandy bed containing abundant relics of freshwater mollusk fauna. In the hanging wing, there are three layers of coal separated by aleurites and variegated sandstones with numerous casts of leaves. The thrust is marked by the displacements of the lower coal layer. The fault plane is subhorizontal in the southern part of the outcrop and dips at 30–35° in the frontal part where micro-thrusts are observed.

The thrust fault is accompanied by tectonic fractures clearly observed in the lithified interlayers of

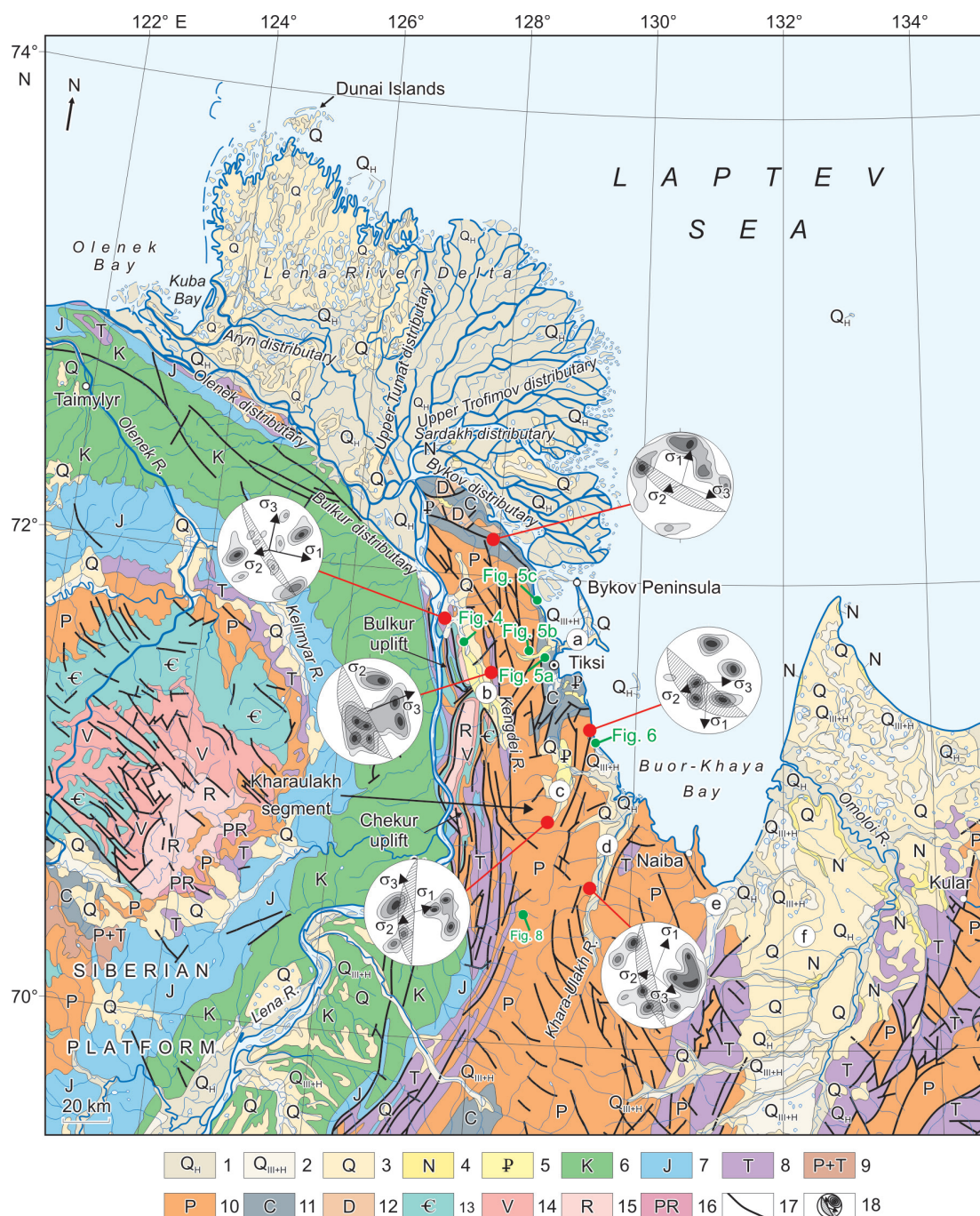


Fig. 3. Fragment of the geological map of the northeastern sector of the Verkhoyansk fold system (scale 1:1,500,000) (from [22]). Cenozoic basins: Khorogor (*a*), Kengdei (*b*), Kunga (*c*), Kharaulakh (*d*), Naiba (*e*), Omoloi (*f*).

1–3 – Quaternary system: 1 – Holocene; 2 – Neopleistocene and Holocene; 3 – Neopleistocene; 4 – Neogene system, Pliocene; 5 – Paleogene system; 6 – Cretaceous system, lower series; 7 – Jurassic system, upper series; 8 – Triassic system; 9 – Permian system, upper series, Triassic system; 10 – Permian system, upper and lower series; 11 – Carboniferous, upper and lower series; 12 – Devonian system; 13 – Cambrian system; 14 – Vendian system; 15 – Riphean system; 16 – Lower Proterozoic; 17 – faults differing in kinematics; 18 – rock fracturing diagrams, positions of vectors of the principal stress axes: extension (σ_1), intermediate (σ_2), compression (σ_3), and fault planes. Black dots – positions of the figures.

sands and aleurites. The circle diagram shows several maximum values grouped in the sublongitudinal and northeastern belts (Fig. 4). Their spatial po-

sitions relative to the working plane of the fault indicate the major thrust displacement. At the same time, the southeastern hanging wing shifted both to

SEISMOTECTONICS OF THE NORTHERN SECTOR OF THE VERKHOYANSK FOLD SYSTEM

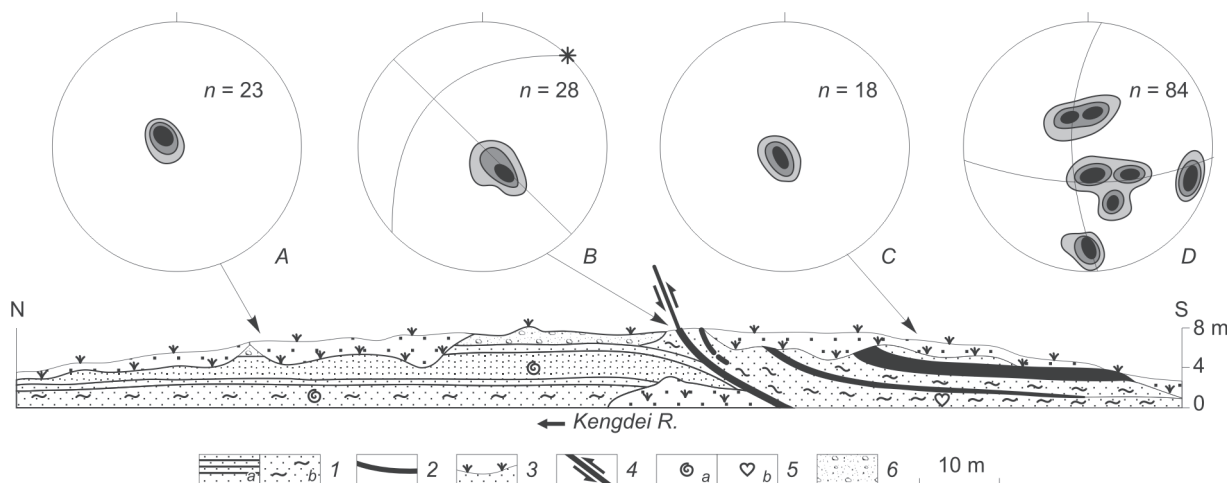


Fig. 4. Knyazyuregin thrust in the Kengdey depression.

1 – sandstones (a) and aleurite-sandy deposits (b); 2 – coal seams; 3 – scree and soddy areas; 4 – thrust plane; 5 – paleontological remains: freshwater mollusks (a) and casts of leaves (b); 6 – sand-gravel-pebble deposits. A–D – fracture diagrams (n – number of measurements).

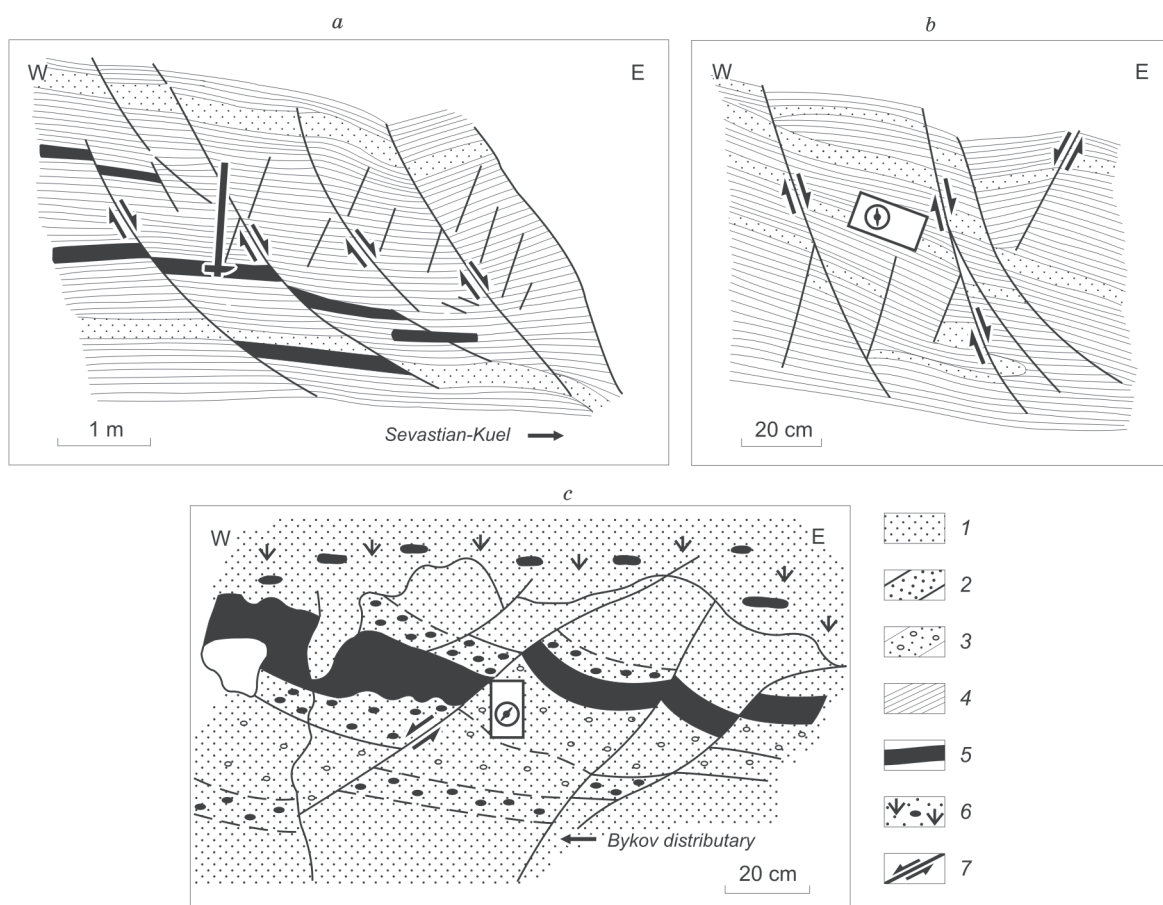


Fig. 5. Normal faults in stratigraphically different heterochronous rocks of the Laptev Sea coast (data from [5]).

a – Carboniferous deposits of the Sevastian-Kuel River; b – Permian deposits of the Khorogor River; c – Eocene deposits of the Bykov distributary. 1 – sandstones; 2 – sands with pebbles of various sizes; 3 – gravelites; 4 – shale; 5 – coal (a) and lignite (c); 6 – vegetation and silt soil; 7 – normal faults.

the north and northwest. The thrust is oriented across the strike of the Kengdei depression, which is also indicative of northwestern displacement. All of the above-mentioned observations suggest compression in the Cenozoic. The structural study results show that the compression axis was oriented sublatitudinally. According to the analysis of the Cenozoic cross-sections of the Kharaulakh segment and adjacent territories, compression took place in the Middle Miocene [5, 14, 15].

The next phase of the Cenozoic history was extension in the Pliocene–Quaternary. The axis of extension was oriented sublatitudinally and to the northeast. Normal fault displacements are observed in the rocks of the Laptev Sea, which are stratigraphically different in age (Fig. 5). Such displacements are manifest in the irregular shapes of the modern terrain features, including chopped forms and sharp ledges. Their working planes are identified in the Carboniferous sandstones and aleurites with intense cleavage and are accompanied by bands of crushed rocks, gouge, and numerous slickensides. Displacement amplitudes vary from several dozens of centimeters to a few meters. With depth, the faults are less-steeply dipping and can be classified as listric faults.

An example of a listric fault is a fault in the coastal outcrop of the 8–10 m marine terrace of the Buor-Khaya Bay near the place where the Yt-Yurege River reaches the sea (Fig. 6). Here, about 50 km south of Tiksi Settlement (600 m northwest of the Yt-Yurege River mouth), there is a contact zone of carbonaceous schists and Pliocene weathering crust represented by kaolinite clays developed on the schists. The zone is classified as a listric normal fault with a

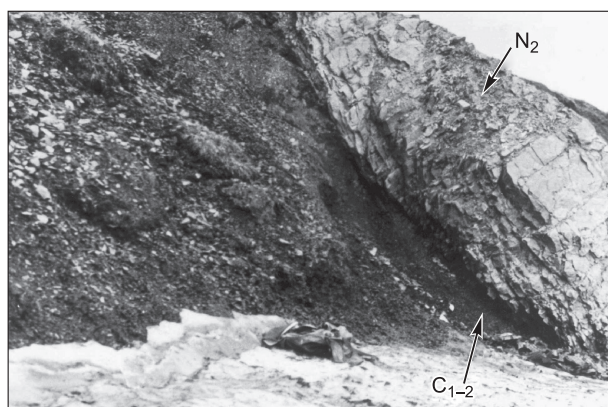


Fig. 6. Listric normal fault at the Yt-Yurege River mouth, Laptev Sea coast. Outcrops: dark – Tiksi formation (C_{1-2}), light – Pliocene (N_2) weathering crust. Photograph by [V.S. Imaev].

flattening plane (the dip angle reduces from 55° in the upper part to $30\text{--}35^\circ$ in the lower part of the outcrop). The fault strike is parallel to the seashore, and the dip is to the northeast (dip azimuth of 50°). Bedrock with numerous normal fault slickensides and 20–25 cm beds of mylonite can be observed in this zone.

Normal faults are also observed in the Cenozoic depressions (Fig. 3). The fault kinematics is clearly confirmed by fracture diagrams. The Kharaulakh depression sides are steeply-dipping (up to $70\text{--}75^\circ$) normal faults. The normal fault planes are cut into separate segments by strike-slip faults. The strike-slip fault kinematics is confirmed by their positions relative to the displaced normal faults. Normal faults were also detected by structural observations in the field on the western side of the Kengdei depression and confirmed by geophysical data [14].

In the dynamic setting of the Cenozoic, faults of two directions were active. Reverse faults with a strike-slip component, and normal faults with a strike-slip component developed mainly in the sub-longitudinal direction. The sublatitudinal faults showed more complex kinematics, and multidirectional strike-slip faults with a normal component were dominant (Fig. 2, 3). The systems of regional and local faults active in the Cenozoic are revealed on the basis of geological and geophysical datasets, and their kinematics are confirmed by fracture diagrams and focal mechanisms of earthquake sources [5, 11, 14]. Considering the fault locations, lengths, and kinematics, four main fault systems are distinguished: I – Primorsky (strike-slip faults with a normal component), II – West Verkhoyansk (thrusts), III – Kharaulakh (strike-slip faults with a normal component), and IV – Buor-Khaya (normal faults).

The Primorsky system of strike-slip faults with a normal component (I) is located in the northern part of the Kharaulakh segment of the northern sector of the Verkhoyansk fold system. The Primorsky normal fault system, with a small left-lateral strike-slip component, strikes west-northwest for about 50 km. It is subparallel to the Bykov distributary from the Lena River Delta to Buor-Khaya Bay. Along the western coast of the Buor-Khaya Bay, the Primorsky normal fault system continues as a series of sub-longitudinal (north-northwest-striking) faults with a total length of 160 km, which are cut by northeast-striking faults. The highest activity is observed in the central part of the Primorsky system, that is, the

area from the Khorogorsky to the Kharaulakh depression.

The West Verkhoyansk system (II) extends to the right bank of the lower reaches of the Lena River. It separates the Verkhoyansk fold-thrust belt from the Siberian platform. Near the Chekurovka area, thrusts are also traced on the left bank of the Lena River, where the Cambrian strata of the footwall and the Vendian formations of the hanging wing are in contact along the inclined zone of crushed rocks. Fracture diagrams and focal mechanisms of earthquake sources confirm the kinematic type, strike, and dip of the West Verkhoyansk thrusts (Fig. 2, 3). Despite its ancient age, this fault system was recently active, as evidenced by the clearly morphologically-manifest frontal part and the epicenters of weak earthquakes confined to the zone of its dynamic influence.

The Kharaulakh system of sublongitudinal faults (III) is located in the central part of the study area (Fig. 2, 3). It is a 6–7 km wide and almost 200 km long zone of closely-spaced subparallel faults consisting of two rectilinear echeloned segments connected by a diagonal link (3 km wide, 20–25 km long). The fault system is active, as evidenced by clear morphological features in aerial photographs and features observed in the field (numerous ravines, gullies, rock collapse, and landslides), as well as local earthquakes, including the 1927–1928 Bulun events ($M_w = 8-9$).

The Buor-Khaya fault system (IV) includes normal faults located along the western coast of Buor-Khaya Bay (Fig. 2, 3). The faults cut the basement of the riftogenic structure, and most of them penetrate into the upper horizons of the sedimentary cover, which suggests their young (Pliocene–Quaternary?) age. The age assumption is based on geological and geomorphological field observations [16] and multi-channel seismic profiling data [17]. Sublongitudinal faults belonging to this system are traced from the coastal areas into Buor-Khaya Bay where they can be clearly detected in the seafloor relief. These faults are further confirmed by earthquake focal mechanism solutions.

Seismicity and seismotectonic deformations. The Kharaulakh segment is located within the continental part of the northwest flank of the Arctic-Asian seismic belt (Fig. 1, 2). The first instrumental data on its seismicity were obtained in 1909, when an earthquake ($M_w = 6.8$) in the Laptev Sea near the delta of the Lena River was recorded by the global network of seismic stations (Fig. 2, 7). Earthquakes

of $M_w = 5.5-6.0$ with epicenters in the Laptev Sea area were recorded in 1914–1926. The epicenters of five Bulun earthquakes ($M_w = 5.8-6.8$) recorded in 1927–1928 were located 140–160 km south of the Tiksi settlement. Analysis of the locations of the local earthquake sources (Fig. 7) in relation to the tectonic features of the Kharaulakh segment (Fig. 3) shows that the epicenters are mostly confined to the systems of large faults and thus confirm their current activity. It should be noted that most earthquakes in this area occurred in the crust at depths up to 35 km (94 % of the total number for the specified depth); only 6 % were recorded in the depth range of 36–55 km, while the most frequent local seismic events occurred at a depth of 15 km.

The field of tectonic stresses is inhomogeneous in the seismically-active Kharaulakh zone, as revealed from earthquake focal mechanism solutions (Fig. 7, Table 1). The major stresses acting in the earthquake sources have different azimuths and dip angles ranging from horizontal to subvertical. This suggests that the seismic process in this zone developed under both extension and compression. The seismically-active Buor-Khaya and Primorsky zones are currently subject to extension across the strike of the regional structures. This assumption is supported by earthquake focal mechanism solutions showing normal faulting. Further westwards to the Lena River, extension is replaced with compression. In this area, strike-slip faults, normal faults with a strike-slip component, and thrusts are revealed from the local earthquake focal mechanism solutions. Normal faults with a strike-slip component are shown by earthquake focal mechanisms for the Bulun events in the seismically-active Kharaulakh zone.

Based on the analysis of the state of crustal stresses from north to south, another transitional area is revealed wherein extension (sea shocks in Buor-Khaya Bay) is replaced by compression, as evidenced by thrusts in the Naiba depression. Southeast of the Chersky seismotectonic zone, the field of tectonic compression stress is stable, and the earthquake focal mechanism solutions show strike-slip, thrust, and reverse faults. The seismological data are consistent with the geostructural observations and confirm a wide range of faults (normal, strike-slip, and thrust faults and their modifications).

Seismic dislocations of various geneses were detected in aerial and satellite images (Fig. 7). Geostructural methods were used to determine their locations and possible earthquake magnitudes of suffi-

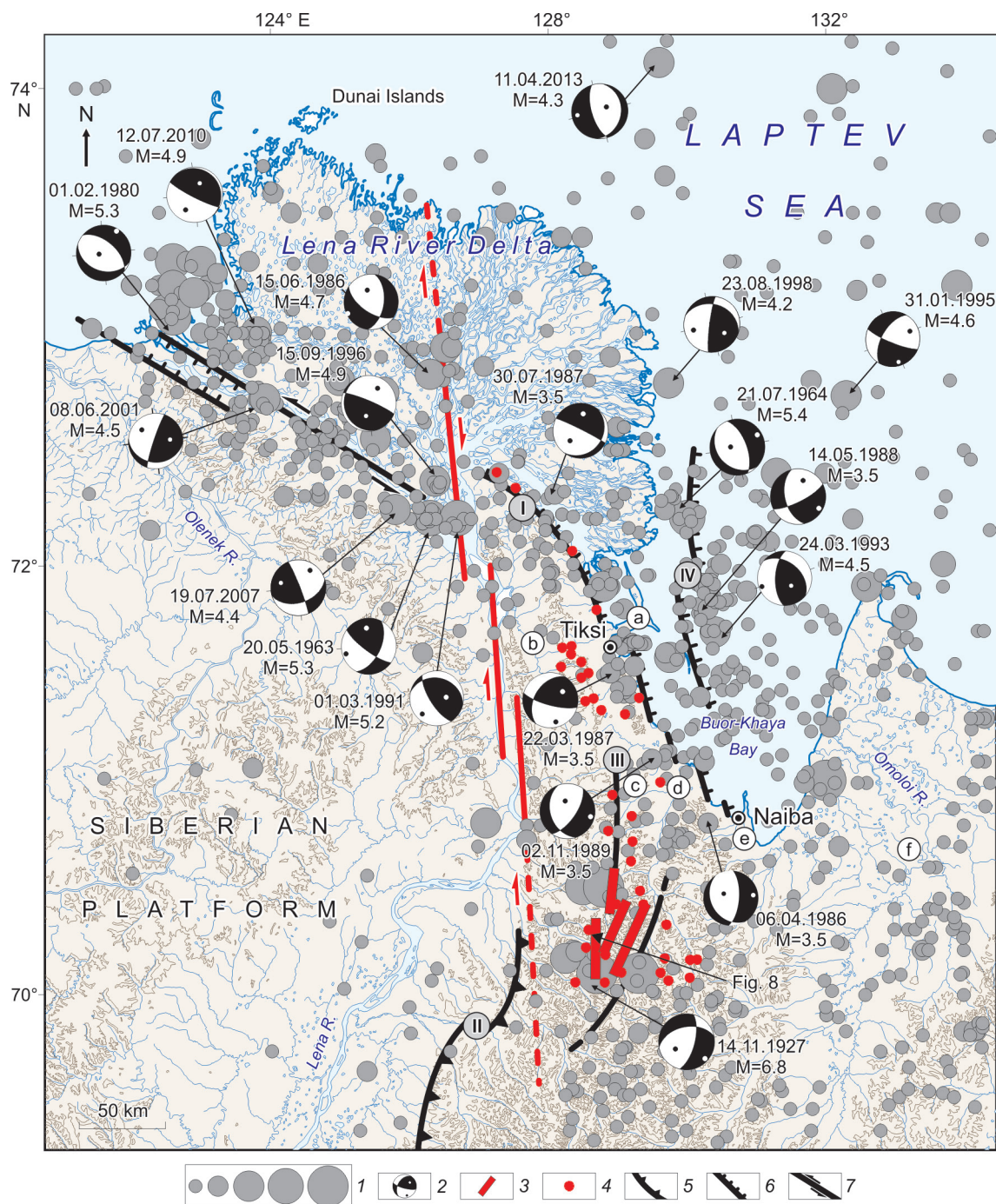


Fig. 7. Earthquake epicenters in the northeastern sector of the Verkhoyansk fold system.

Active fault systems: I – Primorsky, II – Verkhoyansk, III – Kharaulakh, IV – Buor-Khaya.

Cenozoic basins: Khorogor (a), Kengdei (b), Kunga (c), Kharaulakh (d), Naiba (e), Omoloi (f).

1 – earthquake epicenters (M_w): < 3.0, 3.1–4.0, 4.1–5.0, 5.1–6.0, 6.1–7.0 (data from [6]); 2 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), emergence of the main compression and extension stress axes (black and white dots, respectively); 3 – seismodislocations; 4 – seismic traces; 5 – thrusts, 6 – normal faults; 7 – strike-slip faults (red – Ust-Lena fault).

cient intensity for the occurrence of such dislocations. For each seismic dislocation, its probable occurrence time was determined by the dislocation size, morphological features, and types of primary (seismotec-

tonic) and secondary (seismogravitational) deformations. In general, the identified seismogenic structures differ in size and morphology and belong to different genetic types, that is, their formation is re-

Table 1

Earthquake focal mechanisms ($M_w = 3.5$) in the northeastern sector of the Verkhoyansk fold system

Day.month.year; Hour:min: sec	Hypocenter coordinates			M_w	Focal mechanisms			Data sources	Fault types
	Φ (°N)	Λ (°E)	h (km)		strike	dip	slip		
14.11.1927 00:12:08	70.10	128.70	15	6.8	268	46	–35	F, 2009	Normal fault
20.05.1963 17:01:35	72.2	126.3	15	5.3	356	70	–164	F, 2009	Strike-slip fault
21.07.1964 9:56:17	72.2	130.0	35	5.4	130	45	–112	F, 2009	Normal fault
01.02.1980 17:30:27	73.04	122.61	27	5.3	315	55	–78	HRVD	Normal fault
06.04.1986 01:27:21	70.8	130.3		3.5	5	66	–74	F, 2009	Normal fault
15.06.1986 06:55:36	72.8	126.3	10	4.7	130	60	–134	F, 2009	Strike-slip fault with normal component
22.03.1987 01:14:10	71.5	128.9	7	3.5	212	42	22	F, 2009	Reverse fault with right-lateral strike-slip component
30.07.1987 18:51:28	72.3	128.1	18	3.5	295	86	–70	F, 2009	Normal fault
14.05.1988 13:25:50	71.8	130.3		3.5	167	51	–160	F, 2009	Normal fault
02.11.1989 04:40:42	71.1	129.5	31	3.5	161	38	–136	F, 2009	Normal fault
01.03.1991 01:57:06	72.2	126.7	39.4	5.2	290	7	49	F, 2009	Thrust and reverse faults
24.03.1993 22:43:29	71.69	130.40	9–10	4.5	329	41	46	S, 2017	Reverse fault
31.01.1995 12:43:43	72.71	132.28	37	4.6	135	79	–34	S, 2017	Strike-slip fault with normal component
15.09.1996 00:21:23	72.36	126.38	4–5	4.9	170	12	140	S, 2017	Reverse and thrust faults
23.08.1998 09:59:03	72.77	129.73	33–35	4.2	302	29	14	S, 2017	Thrust fault
08.06.2001 04:59:02	72.70	123.92	10–12	4.5	205	84	67	S, 2017	Reverse and thrust faults
19.07.2007 06:18:44	72.24	125.80	37–38	4.4	79	45	7	S, 2017	Reverse fault with strike-slip component
12.07.2010 10:06:43	72.98	123.79	6–7	4.9	325	9	112	S, 2017	Thrust and reverse faults
11.04.2013 20:01:09	74.11	129.62	36	4.3	20	25	–70	S, 2017	Normal fault

Note. M_w – moment magnitude; parameters of nodal planes: strike, dip, and slip in degrees. Data sources: S, 2017 [18], F, 2009 [19], HRVD [20].

lated to seismic events ($M_w = 6.0–7.5$) that occurred at different times and locations.

A major seismic dislocation in the zone of dynamic influence of the Kharaulakh fault is the Baris fault which is a 12-km long linear sublongitudinal

normal fault with a strike-slip component (Fig. 8). Displacements of some landforms are predominantly right-lateral. In field observations, the fault was detected as a system of ditches 10–15 m wide. On the slopes and peaks of the watersheds, the fault is

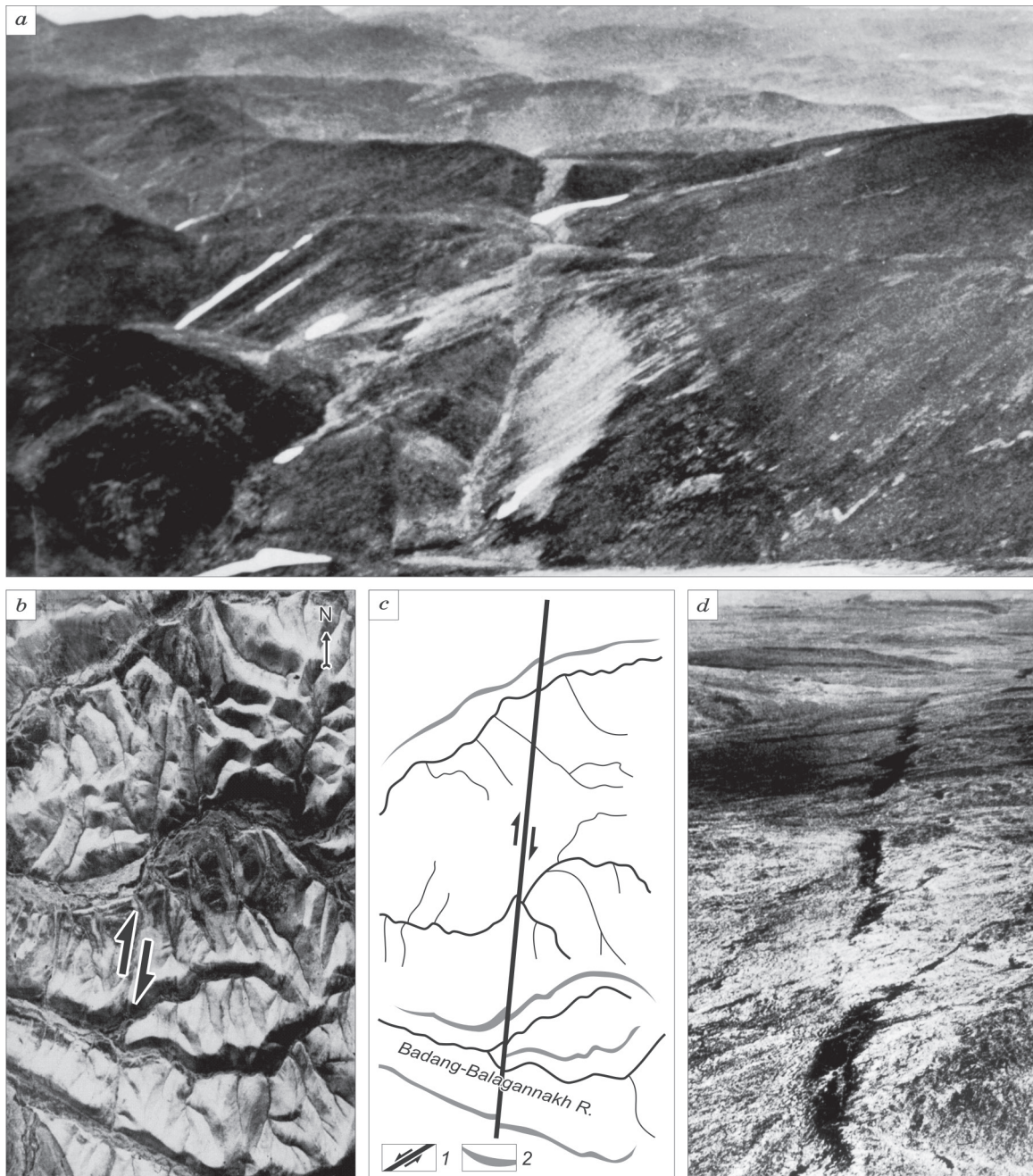


Fig. 8. Beris seismodislocation.

a – photograph of the system of ground surface ruptures resulting from the Bulun earthquakes of 1927–1928 ($M_w \geq 7.0$); *b* – aerial photograph of the Beris seismodislocation (arrows show the fault plane); *c* – fragment of the deciphered image: strike-slip faults (1), watershed axes (2); *d* – photograph of seismogenic extension fractures in the Kharaulakh fault zone (origin place of the Beris seismodislocation).

marked by troughs 4–6 m wide and filled with argillite and sandstone fragments crushed to debris. At the edges of the ditches and troughs, there are steep (80–90°) walls rising 2.0–2.5 m above the bottoms and composed mainly of fragments of silicified dense sandstones. The fault wings' displacement di-

rection is reliably determined from the displacement of the sublatitudinal tributaries of the rivers, as well as the axial lines of the watershed ridges. The western wing is horizontally displaced by 25–30 m. The displacement involved the youngest deposits of the fluvio-glacial complex up to the floodplain and

above-floodplain terraces. Based on these data and the rock fracturing analysis, this is a right-lateral normal fault with a strike-slip component. In our calculation, the age of the Baris seismodislocation is a thousand years, considering an estimated earthquake magnitude of 7.0–7.5. Structural-dynamic studies of the Kharaulakh segment of the Verkhoyansk fold system reveal areas that differ in the state of crustal stress and fault kinematics, including normal, strike-slip, and thrust faults and their combinations.

Seismotectonics of the Lena River Delta

Geologic and tectonic structure. The tectonic structure of the Lena River Delta is defined by the junction of large crustal geoblocks—the ancient Siberian Platform and the Mesozoic Laptev Sea Plate—separated by the Kharaulakh segment of the Verkhoyansk fold system (Fig. 1–3). Their fragments compose a specific structural pattern. The ideas concerning the geological structure of the pre-Cenozoic base of the delta were formulated according to geophysical data interpretations [3, 4, 21] and geological data on the contact structures of the Lena-Anabar and Kharaulakh segments of the Verkhoyansk fold system [22, 23]. It is assumed that the delta base is a complex fold-block structure that is similar in structure and history to the Hercynides of the northern Taimyr Peninsula. In the delta, the pre-Quaternary formations outcrop mainly on the banks of the Bykovsky, Olenek, and Bulkur distributaries and also occur as erosive remnants on islands in the estuary of the Lena River valley (Fig. 3).

The structure of the pre-Cenozoic delta base is represented by a series of northwest-trending blocks covered by Cenozoic sediments of different thicknesses. Based on the gravity field interpretations, the Archean formations are presumably confined to the uplifted block of the delta [24]. According to other data, the Archean formations may occur at a depth of about 100 m, and the pre-Cenozoic base at the northeastern part of the delta is assumed to occur at a depth of about 3,000 m [25]. Abundant Ordovician–Lower Carboniferous deposits in the delta were identified from seismic profiles [21, 25]. The age and composition of the Ordovician rocks are conditionally determined by analogy with the deposits in the neighboring areas (Fig. 3).

Paleogene deposits comprise the major depression grabens of the delta. A general idea of their structure is based on studies of similar sediments in the grabens adjacent to the delta in the northern sec-

tor of the Kharaulakh segment [22, 23]. Eocene sandstones and 0.3 to 2.4 m thick aleurolite and brown-coal seams can be seen in outcrops observed along the Bykov distributary. Neogene sediments are exposed fragmentarily in outcrops observed on islands in the delta. Paleogene and Neogene sediments formed in a setting of differentiated displacements of large blocks, therefore total thickness ranges from several tens of meters to 2–3 km at the most subsided sites [24].

The surface cover of the delta is composed of Quaternary sediments. However, their age is conditional and determined only by the stratigraphic and geomorphological positions of the strata without sufficient paleontological and palynological data. The delta surface is mostly composed of modern sediments, such as alluvial, lacustrine-boggy, lacustrine-boggy-aeolian, aeolian, gravitational, and marine sediments. The islands in the delta are composed of heterochronous and heterogeneous sediments. Their geological structure suggests a sharp change in sedimentation conditions in both lateral and vertical directions within a short time [24].

The Quaternary history of the Laptev Sea shelf, including the Lena River Delta, is sharply different from that of the continental part of the Kharaulakh segment. It is related to opening of the Eurasian sub-basin, the onset of which is assumed to occur at the end of the Paleocene (~56 Ma) [4, 21]. This region was dominated by strike-slip and normal-strike-slip tectonic movements that predetermined the block structure of the delta, as is clearly evidenced by different hypsometric positions of Late Quaternary and Holocene sediments (Fig. 3). According to Galabala [16], in the central part of the delta, the bottom of the Holocene alluvial sediments can be traced at the current level of the Trofimov distributary (a borehole drilled to a depth of 25 m in the northeastern end did not reach these sediments). In the western part of the delta, the fault displaced Zyryansk-Sartansk (Upper Pleistocene) horizons by 30 m.

Normal-fault structures observed in this area suggest an extensional phase with the axes presumably oriented sublatitudinally and to the northeast [6]. Under these geodynamic conditions, faults of two orientations were active in the Cenozoic. Heterochronous normal and normal strike-slip displacements are typical of submeridional faults, whereas the kinematics of sublatitudinal faults are more complex, and differently-oriented oblique-slip components are predominant [6].

Geomorphological structure. The activity of the newest structures of the Lena River Delta is evidenced by morphodynamical indicators and geomorphological characteristics of the present-day relief (Fig. 9). The current structure of the delta includes separate segments of regional fill deltas. According to the age analysis of fan deposits, the most ancient (8570 years BP) parts of the delta are the islands in its western segment, which are bordered by the Aryn and Tumat distributaries, and the youngest (1500–2000 years BP) parts are the islands of the Bykov distributary in the southeastern segment of the delta [24, 26].

The Lena River Delta shoreline is segmented in accordance with the positions of the regional fill

deltas. In the western part of the delta (Kuba Bay), there are Holocene marine terraces (up to 8 m high; age of 3000 years BP) that are mapped in Grigoriev et al. [25]. The northern part of the delta is represented by the abrasion-accumulation shores of the Tumat alluvial fan. The abrasion bench (up to 1 m high) is periodically flooded during tides and surges leading to active accumulation. To the east, the delta shoreline is exclusively abrasional. In the eastern part of the delta, the mouth areas of the Sardakh, Trofimov, and Bykov distributaries are actively developing estuaries. The overall water flow in the delta area concentrates in the eastern and south-eastern distributaries, which indicates topographi-

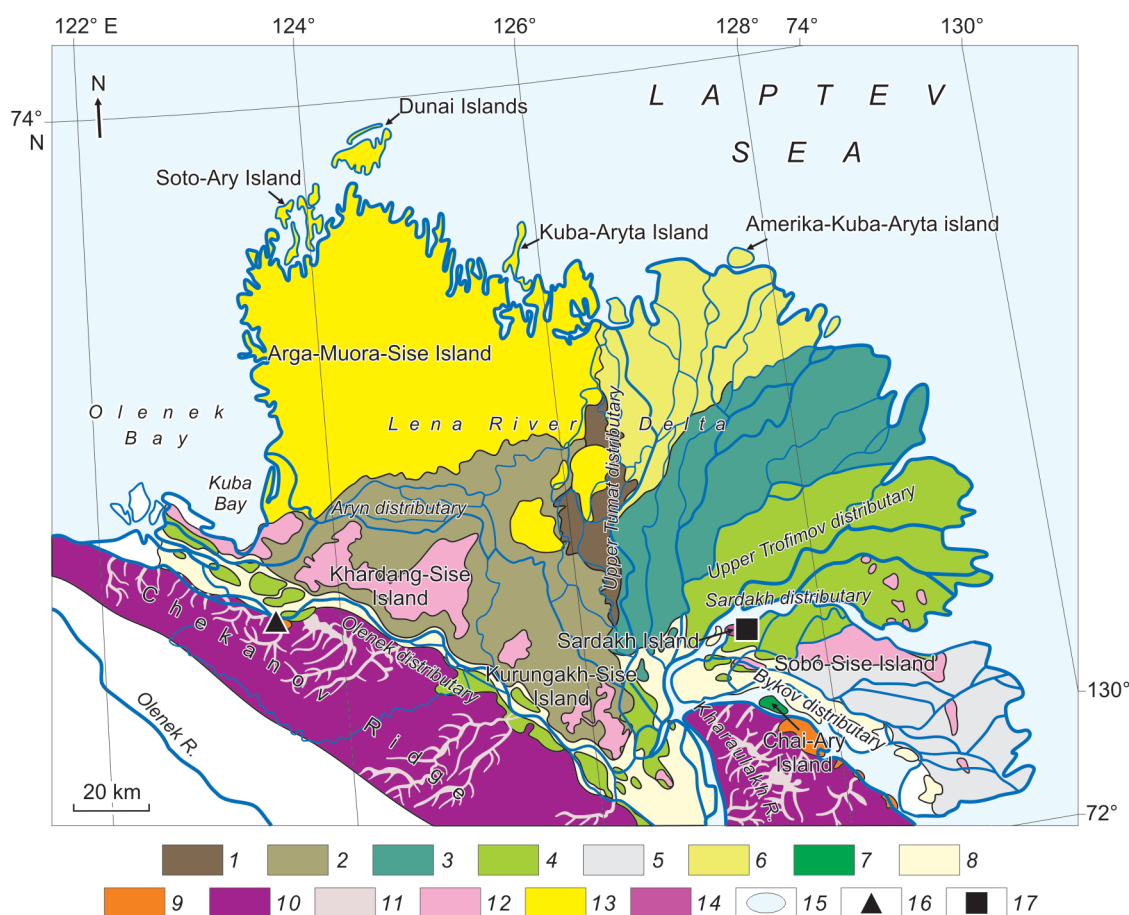


Fig. 9. Geomorphological map showing cumulative and denudation relief structures of the Lena River Delta (data from [24]). 1–6 – alluvial-marine terraces, ages: 1 – 8000; 2 – 6000–4000; 3 – 3000; 4 – 2500–3000; 5 – 1500–800; 6 – 1200–500 yrs BP; 7 – Chai-Ary Island terrace consisting of coarse clastic sediments (height up to 12 m); 8 – floodplain terrace consisting of sands (height up to 7 m; age from 200 yrs to the current time); 9 – alluvial fan of glacial water deposits (age 500–200 yrs BP); 10 – structural denudation relief of low hills consisting of Pre-Quaternary rocks; 11 – terraced stream valleys; 12 – thermally-denuded surface of glacial complex rocks (height up to 50 m); 13 – remnant of the alluvial marine terrace of Arga-Muora-Sise Island (height of 20–22 m); 14 – erosion-abrasion rock of Sardakh Island (height up to 50 m; Neogene); 15 – lacustrine thermokarst basins filled with high-terrace water. Legend, not to scale: 16 – basin terrace (height up to 30 m; age 138 kyr BP); 17 – basin terrace (height of 10–15 m; age 48 Kyr BP).

cal subsidence of the delta surface to the east and southeast, away from the sublongitudinal system of the Tumat distributaries.

The topographical subsidence of the northwestern part of the Lena River delta towards the southeast was observed in the field study of the Quaternary sediments of the Kurungnakh-Sise Island [24]. In this area, a lithological boundary is clearly detected at a height of 8 m between the glacial rock complex and the underlying sands. It is traced at the same height for almost 4 km along the Bulkur distributary and then roughly descends towards the Olenek distributary.

Different elevations of the glacial rock complex's surface are noted in the western and eastern parts of the delta [24–26]. Thus, the general uplift of

the crust in the western segment of the Lena River Delta and differentiated block movements along the faults offer a reasonable explanation of the anomalous redistribution of water flow among the distributaries. Water and debris flow primarily to the east and southeast into the Bykov and Trofimov distributaries, rather than taking a straight route to the northwest in the Olenek distributary. Tectonic subsidence is most intensive near the Bykov distributary (southeast), which predetermines the largest water flow exclusively in this direction.

Seismicity and seismotectonic deformations. Seismically-active zones of the newest structures of the Lena River Delta were revealed by analyzing the field of earthquake epicenters. The diagram in Figure 10 shows the earthquake epicenters record-

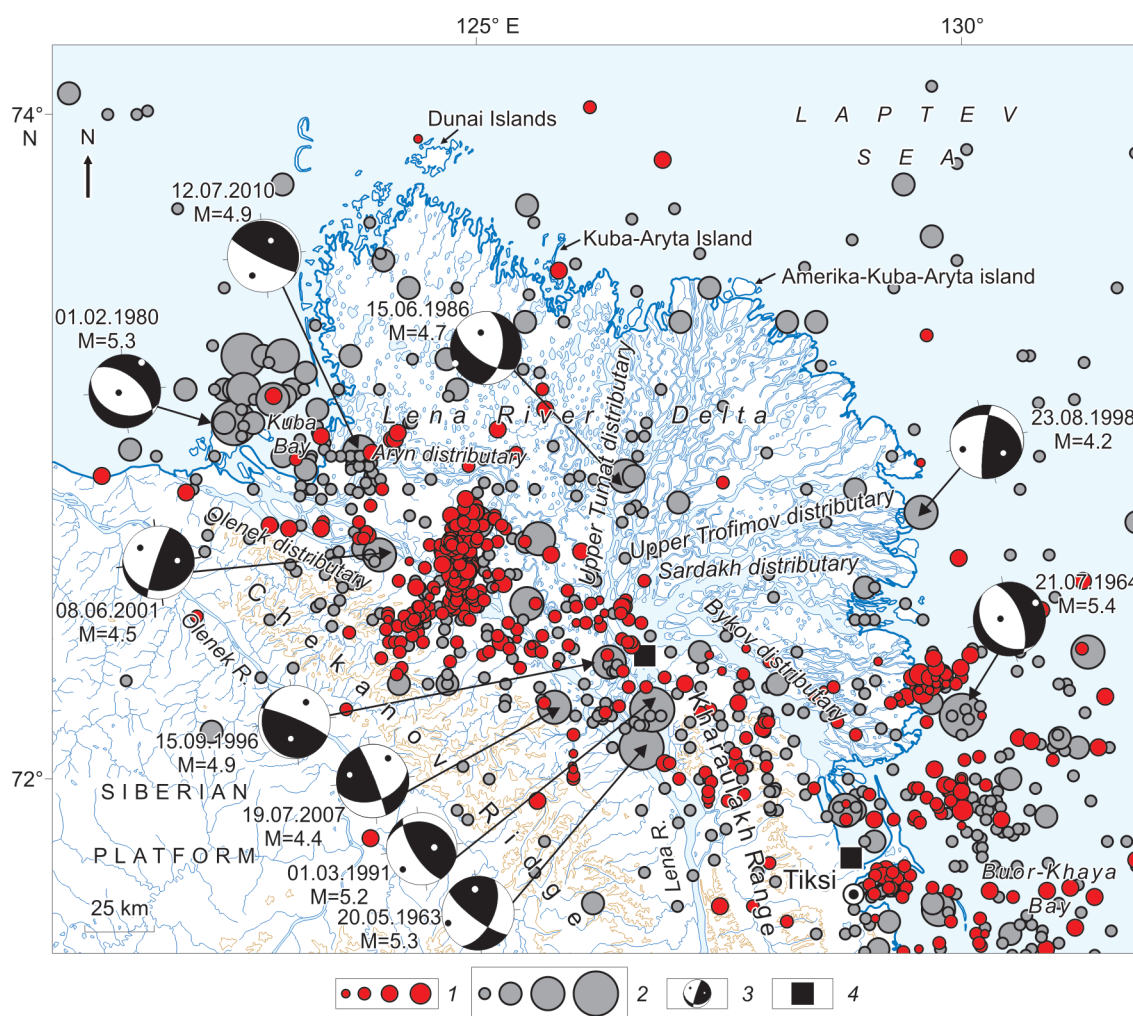


Fig. 10. Earthquake epicenters and focal mechanisms for the Lena River Delta (data from [6, 18]).

1 – earthquake epicenters (M_w): –1.5 to –0.1, –0.1 to 1.2, 1.2–2.6, 2.6–4.0 (data from [27]); 2 – earthquake epicenters (M_w): < 3.0, 3.1–4.0, 4.1–5.0, 5.1–6.0; 3 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), emergence of the main compression and extension stress axes (black and white dots, respectively); 4 – stationary seismic stations of Yakutsk Branch UGS RAS.

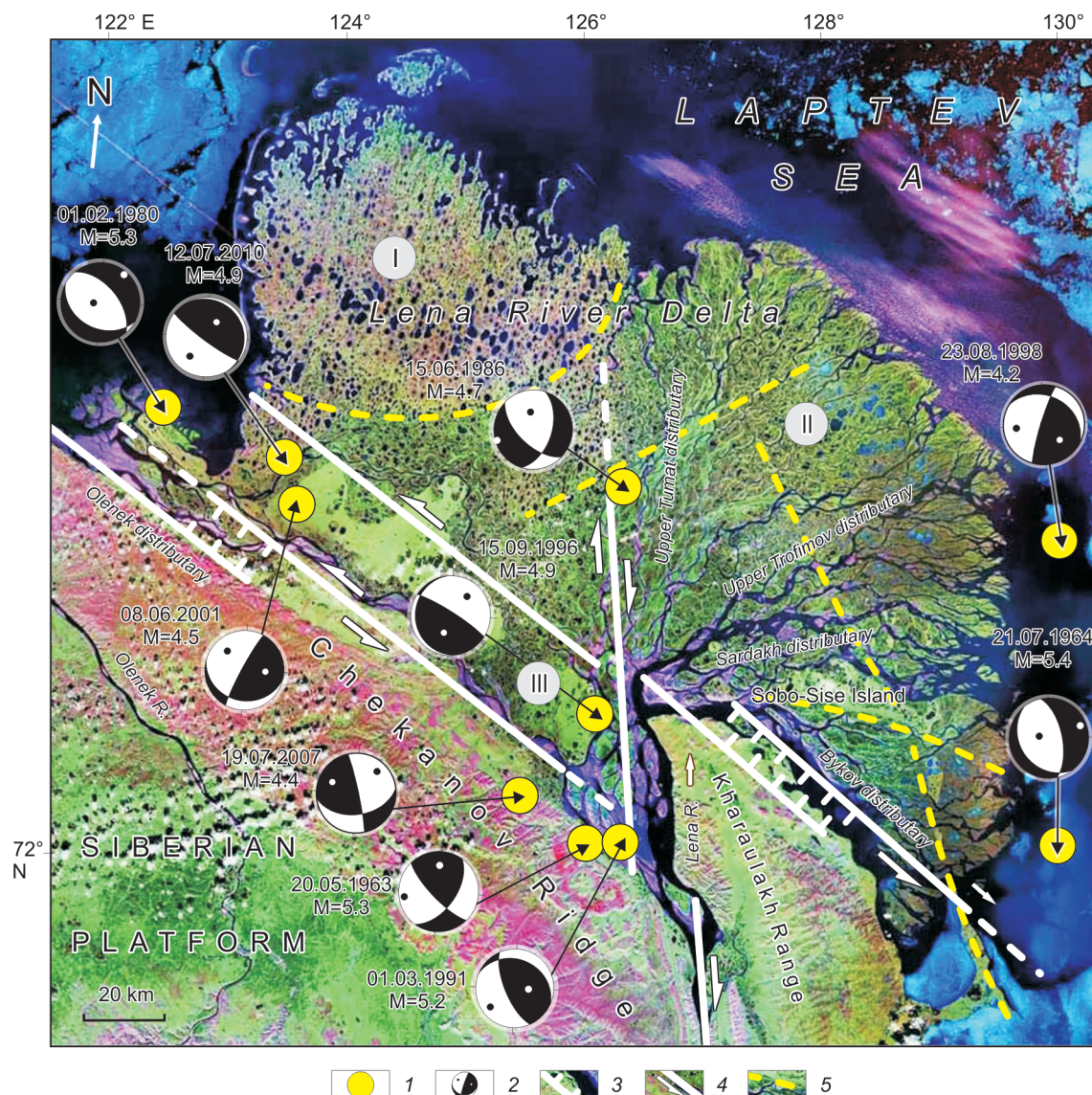


Fig. 11. Landsat-7 satellite image of the Lena River Delta in 2000, showing active tectonic elements (data from [32]). Types of tectonic regimes: I – transpression; II – transtension; III – compression. 1 – earthquake epicenters (data from [6]); 2 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), emergence of the main compression and extension stress axes (black and white dots, respectively); 3 – normal faults, 4 – strike-slip faults; 5 – activated fault structures of Holocene (?) age.

ed by stationary and temporary field seismometers within the delta area and the coastal shelf zone [27]. The database of focal parameters of seismic events of medium magnitude was supplemented with seismic moment tensors, moment magnitudes, mechanisms, and depths of earthquake foci with $M_w = 4.3\text{--}5.5$ [18].

Seismotectonic data and remote images were used to map the active faults and diagnose their kinematics. Such faults are confined to zones influenced by earthquakes, and their focal mechanism solutions

are indicative of the dynamics and directions of neotectonic movement. The structural-kinematic plan of the newest structures in the Lena River Delta was detected from Landsat-7 satellite images (Fig. 11) and confirmed by the geological, geophysical, and morphodynamic features in the present-day relief. The data revealed that the patterns of the main distributaries of the delta are tectonically predetermined and correlate with the strike of the conjugated Lena-Anabar and Kharaulakh segments of the Verkhoysk fold system (Fig. 1, 2).

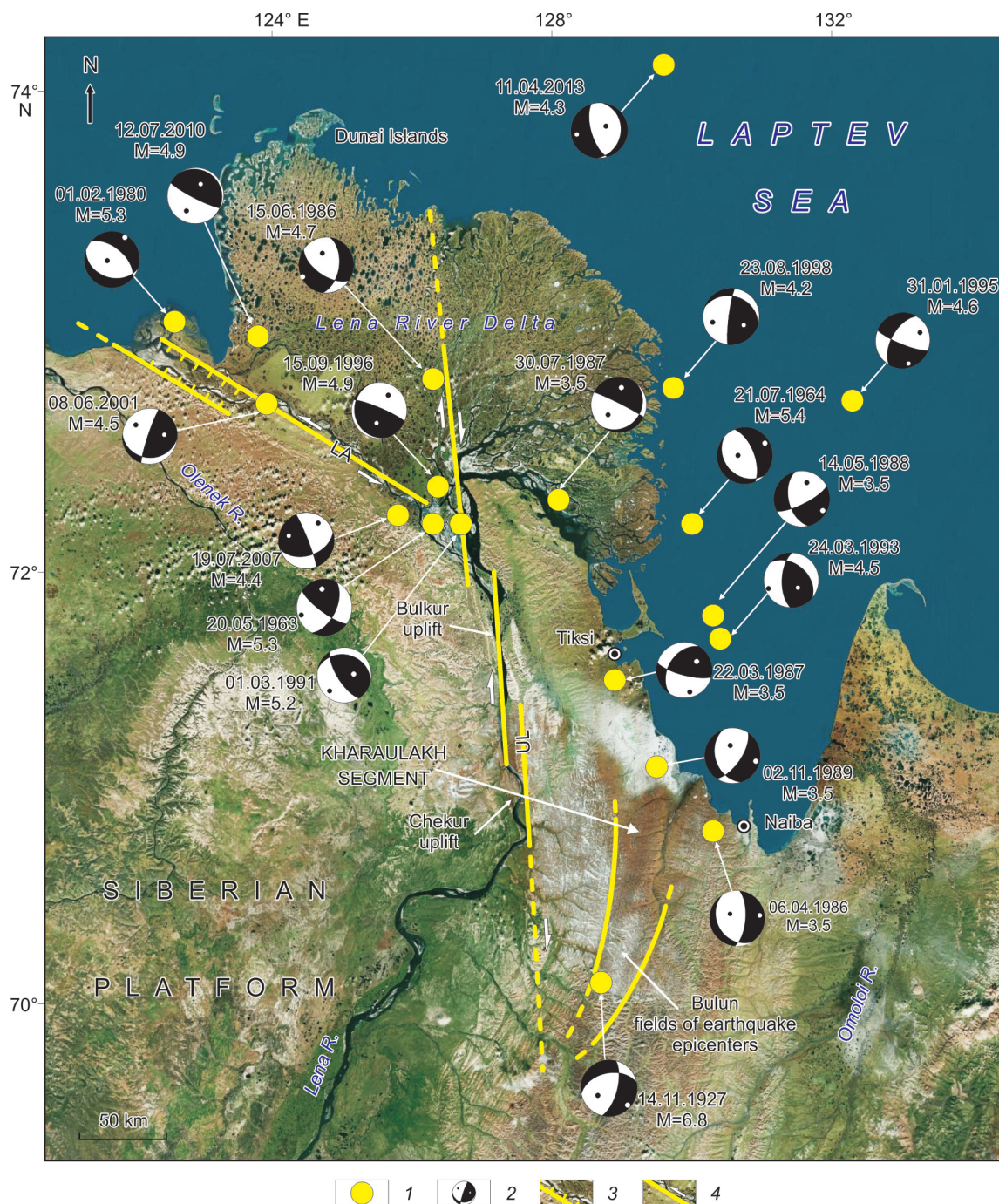


Fig. 12. Geodynamics and active tectonic elements of the northeastern sector of the Verkhoyansk folded system (Google Earth image).

Cenozoic basins: Khorogor (*a*), Kengdei (*b*), Kunga (*c*), Kharaulakh (*d*), Naiba (*e*), Omoloi (*f*). Faults: LA – Lena-Anabar, UL – Ust-Lena.

1 – earthquake epicenters (data from [6]); 2 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), emergence of the main compression and extension stress axes (black and white dots, respectively); 3 – normal faults, 4 – strike-slip faults.

In the satellite image, color differences show that the Ust-Lena right-lateral strike-slip fault divides the Lena River Delta into two main segments. In the western segment, the number of river channels is con-

siderably reduced, and numerous ‘spots’ in the satellite image depict large thermokarst lakes (Fig. 11). It is likely that the delta zones to the west of the fault experience are currently subjected to tectonic uplift-

ing, while subsidence takes place in zones to the east of the fault. This assumption is confirmed by geodetic data [28]. In the western segment, positive velocities of recent vertical tectonic movements amount to 2–4 mm/year and; further to the east, velocities decrease to weakly negative values.

A system of lineaments of left-lateral strike-slip kinematics at the base of the delta is interpreted as belonging to active faults comprising the sublatitudinal branch of the zone of dynamic influence of the Verkhoyansk marginal suture. Near the Bykov distributary, a vast pull-apart zone formed along the system of left-lateral strike-slip faults. This system of lineaments is associated with the main epicentral field, wherein the source depths range from 4–12 to 37–40 km and the earthquake focal mechanism solutions show reverse-fault, transpressional, and thrust displacements.

The above-described observations ascertain the seismotectonic activation of the sublatitudinal segments of the active faults in the zone of dynamic influence of the Verkhoyansk marginal suture. Other lineaments (see satellite image in Fig. 11) are second-order structures resulting from activation of the conjugated main fault systems. The two dynamic segments of the Lena River Delta, which are separated by the Ust-Lena right-lateral strike-slip fault, experience seismotectonic crustal destruction due to transpression (in the west) and transtension (in the east). In the area between the Olenek and Aryn distributaries, the compression strain regime is uniform and associated with active faults comprising the sublatitudinal branch of the zone of dynamic influence of the Verkhoyansk marginal suture.

Discussion

The Ust-Lena system of strike-slip faults has been identified for the first time in this study. It is the main structure-forming element in the kinematic plan of the newest structures in the northern sector of the Verkhoyansk fold system, which controls the parameters of the seismotectonic activation zones. In the small-scale geological and tectonic maps (Fig. 2, 3) and the satellite images (Fig. 11, 12), the Ust-Lena right-lateral strike-slip fault is structurally traced from the Lena River Delta to the Orulgan sector of the Verkhoyansk fold system. The Bulun epicentral field ($M_w = 6.8–7.0$) with a maximum seismic potential is located at the southeastern termination of the fault, where a wide zone of seismic dislocations differing in genesis has been identified (see Fig. 7).

At the northwestern flank of the fault, along the system of the Tumat distributaries in the Lena River Delta, there is a wide and structurally-shaped near-fault extension zone consisting of several depressions that are regularly developed in the northeast direction (Fig. 11). In the Lena River Delta, there are no extension structures typical of rifting that affected the Laptev Sea shelf. The system of Tumat depressions was formed in a transtension–strike-slip regime.

A continuation of the lineament from the Lena River Delta to the south is evidenced by the straight-line channel of the Lena River at the delta base before the river channel is divided into the distributaries. The Bulkur and Chekurov anticlines, where reverse thrusts (both cross-cutting and subparallel to the foliation) are observed in outcrops, can be interpreted as compression blocks at the strike-slip faults (Fig. 3, 12). Taking into account a clearly-revealed structural pattern of compression blocks and extension structures relative to the strike of this lineament, their morphological features, and earthquake focal parameters, the kinematics of the Ust-Lena fault was established as a right-lateral strike-slip fault with a normal component. Table 1 and Figures 7 and 12 show a summary of the focal mechanism solutions from publications on the northern sector of the Verkhoyansk fold system.

Conclusion

1. The present-day morphotectonic plan of the northern sector of the Verkhoyansk fold system has largely inherited the regularities of the tectonic regime of the Late Mesozoic stage. The newest structures are due to the conjugation of the Ust-Lena and Lena-Anabar strike-slip fault systems that differ in strike and reflect the junction zone of the main regional geostructures—the Siberian platform, the Laptev Sea plate, and the Kharaulakh segment of the Verkhoyansk fold system. The structures of the extension zone and the seismic activation of neotectonic structures in the northern sector of the Verkhoyansk fold system and in the Lena River delta are not related to the influence of riftogenic processes on the Laptev Sea shelf.

2. Based on the initial seismogeodynamic analysis, structural-dynamic segments differing in the stress-strain state of the crust (transpression, transtension, and compression) are distinguished in the northern sector of the Verkhoyansk fold system. The data revealed that the seismotectonic destruction regimes change in the areas to the west and east of the

Lena River Delta, and the field of tectonic stresses in the Laptev Sea shelf is mixed. Thus, a unique transition area is identified in the northern sector of the Verkhoyansk fold system, wherein the mid-oceanic and continental crust structures are conjugated and the tectonic stress field of extension is replaced with compression.

3. The potential seismic hazard of the newest structures in the northern sector of the Verkhoyansk fold system was assessed by analogy with the potential seismic hazard assessment carried out in our study of the sectors of the Arctic-Asian seismic belt [5–7, 29 et al.]. These structures are capable of producing seismic events with $M_w = 6.5–7.0$ and intensities up to 8–9 on the MSK-64 scale.

References

1. *Avetisov G.P.* Seismoactive Zones of the Arctic Region. St. Petersburg: VNII Okeangeologia, 1996.
2. *Grachev A.F.* Main problems of neotectonics and geodynamics of Northern Eurasia // *Physics of the Earth*. 1996. No. 12. P. 5–36.
3. *Shkarubo S.I., Zavarzina G.A., Zuikova O.N.* Results of the modern stage of the Laptev Sea shelf investigations: from hypotheses to new facts and problems // *Subsoil Exploration and Protection*. 2014. No. 4. P. 23–30
4. *Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Tishchenko A.* Crustal architecture of the East Siberian Arctic Shelf and adjacent Arctic Ocean constrained by seismic data and gravity modeling results // *Journal of Geodynamics*. 2018. Vol. 119. P. 123–148. DOI: 10.1016/j.jog.2018.03.005.
5. *Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M.* Seismotectonics of Yakutia. Moscow: GEOS Publishing House, 2000.
6. *Seismotectonics of the Northeastern Sector of Russian Arctic*. Imaeva, L.P., Kolodeznikov, I.I. (Eds.), Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2017.
7. *Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Mel'nikova V.I.* Neotectonic activity and parameters of seismotectonic deformations of seismic belts in the Northeast Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017. Vol. 148. P. 254–264. DOI: 10.1016/j.jseas.2017.09.007.
8. *Shebalin N.V., Ulomov V.I., Tatevossian R.E., Trifonov V.G., Yoffe A.I., Kozhurin A.I.* Unified Seismogeological Taxonomy of the Northern Eurasia // IUGG-Abstracts. SB21C-14. Boulder, USA, 1995.
9. *Ulomov V.I., Shumilina L.S.* A set of new general seismic zonation maps for the Russian Federation territory // *Seismically Resistant Construction*. 1998. No. 4. P. 30–34.
10. *Gusev G.S., Mezhelovsky N.V., Imaeva L.P.* Tectonic (geodynamic) processes and settings (Chapter 3) // *Mezhelovsky, N.V.* (Ed.). *Tectonical Code of Russia*. Moscow: GEOS Publishing House GEOKART. P. 59–78.
11. *Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M.* Structural-dynamic model of the Chersky seismotectonic zone (continental part of the Arctic-Asian seismic belt) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. Vol. 116. P. 59–68. DOI: 10.1016/j.jseas.2015.11.010.
12. *Gusev G.S.* Folded Structures and Faults of the Verkhoyansk–Kolyma System of Mesozooids. Moscow: Nauka. 1979.
13. *Prokopiev A.V., Deikunenko A.V.* Deformation structures of thrust fold belts // *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha (Yakutia) Republic* / Parfenov, L.V., Kuz'min, M.I. (Eds.). Moscow: Nauka/Interperiodika, P. 156–198.
14. *Imaev V.S., Imaeva L.P., Smekalin O.P., Chipizubov A.V., Ovsyuchenko A.N., Kolodeznikov I.I.* Neotectonics of the Kharaulakh sector of the Laptev Sea shelf // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. Vol. 59. P. 831–844. DOI: 10.15372/GiG20180707.
15. *Grinenko O.V., Imaev V.S.* Cenozoic thrust faults of Northern Kharaulakh. *Geology and Geophysics*. 1989. Vol. 30. P. 121–123.
16. *Galabala R.O.* New data on the structure of the Lena River Delta // *Quaternary Period of Northeastern Asia / North Eastern Complex Research Institute of the Far East Branch of the USSR Academy of Sciences*. Magadan, 1987. P. 152–172.
17. *Avetisov G.P., Guseva Yu.V.* Deep structure of the Lena River Delta area from seismological data // *Soviet Geology*. 1991. No. 4. P. 73–81.
18. *Seredkina A.I.* Seismic moment tensor of the earthquakes in the northern Verkhoyansk region and Laptev Sea shelf // *Modern Methods of Seismological Data Processing and Interpretation. Proceedings of the XII International Seismological Workshop, Almaty, Kazakhstan, 2017 / UGS RAS. Obninsk, 2017*. P. 338–341.
19. *Fujita K., Kozmin B.M., Mackey K.G., Riegel S.A., Imaev V.S., McLean M.S.* Seismotectonics of the Chersky seismic belt, Eastern Russia (Yakutia) and Magadan district, Russia // *Geology, Geophysics and Tectonics of Northeastern Russia: a Tribute to Leonid Parfenov*. Stephan Mueller Spec. Publ. 2009. Vol. 4. P. 117–145. DOI: 10.5194/smsps-4-117-2009.
20. *Harvard University, Department of Earth and Planetary Sciences, Seismology Harvard*, 2015. Online Bulletin. Available from: <http://seismology.harvard.edu/resources.html> (last accessed 15.01.2015).
21. *Drachev S.S.* On the basement tectonics of the Laptev Sea shelf // *Geotectonics*. 2002. No. 6. P. 60–76.
22. *Geological Map of the Sakha (Yakutia) Republic*. Scale 1:1,500,000. Sheet 1 / Kovalev L.N. (Ed.). St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2006.
23. *State Geological Map of Russian Federation*. Scale 1:1,000,000 (3rd Generation). Laptev–Siberian Sea Series. Sheets S-51 (Olenek Bay), S-52 (Lena River Delta). Explanatory Note / Bol'shiyanov, D.Yu., Vasiliev, B.S., Vinogradova, N.P., Gavrish, A.V. et al. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2014.
24. *Bol'shiyanov D.Yu., Makarov A.S., Shnaider V., Shtof G.* Origin and Evolution of the Lena River Delta. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2013.

25. Grigoriev M.N., Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M., Kunitsky V.V., Larionov A.G., Mikulenko K.I., Skryabin R.M., Timirshin K.V. Geology, Seismicity, and Permafrost Processes in the Arctic Areas of Western Yakutia. Yakutsk: Yakutian Scientific Center SB RAS, 1996.
26. Korotaev V.N. Formation of the Lena River Delta hydrographic network in the Holocene. Bulletin of the Moscow State University. Geography Series. 1984. No. 6. P. 39–44.
27. Tuktarov R.M., Petrov A.F., Shibaev S.V., Koz'min B.M., Timirshin K.V., Geisler V. The first results of local seismicity studies in the Arctic part of Yakutia by the international Russian–German expedition // Geology and Mineral Resources of the Russian Northeast. Proceedings of the VIII All-Russia Science and Practice Conference, 18–20 April 2018, Yakutsk. Vol. 2. Yakutsk: Publishing House of the Northeastern Federal University, 2018. P. 193–196.
28. Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Seismotectonic activation of modern structures of the Siberian Craton // Geotectonics. 2018. Vol. 52 (6). P. 618–633. DOI: 10.1134/S0016852118060031.
29. Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the Zones of Strong Earthquake Epicenters in the Arctic–Asian Seismic Belt // Geosciences. 2019. Vol. 9 (4). P. 168. DOI: 10.3390/geosciences9040168.
30. Parfenov L.M., Oksman V.S., Prokopiev A.V., Timofeev V.F., Tretyakov F.F., Trunilina V.A., Deikunenko A.V. Assemblage of terranes of the Verkhoyansk–Kolyma orogenic zone // Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Territory of Sakha (Yakutia) Republic, Parfenov, L.V., Kuz'min, M.I. (Eds.). Moscow: Nauka/Interperiodika, 2001. P. 199–254.
31. Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Brunni I.E. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // Tectonophysics. 1998. Vol. 298. P. 357–393.
32. NASA, LandSAT, 2018. Available from: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/earthasart/lena.html> (last accessed 01.06. 2018).

Received 12.02.2020

Accepted 05.05.2020

About the authors

IMAEVA Lyudmila Petrovna, candidate of geological and mineralogical sciences, senior researcher, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 128 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-8235-7112>, imaeva@crust.irk.ru;

GUSEV Grigory Stepanovich, doctor of geological and mineralogical sciences, chief researcher, Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements RAS, 15 Veresaev Street, Moscow, 121357, Russia, gusev@imgre.ru;

IMAEV Valery Suleymanovich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, chief researcher, Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, 128 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russia; academic, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenin Avenue, Yakutsk, 677007, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-6510-0526>, imaev@crust.irk.ru.

Citation

Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S. Seismotectonics of the northern sector of the Verkhoyansk fold system (northeast of the Russian Arctic) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, N 2. P. 7–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-1>

Immiscible silica- and iron-rich melts at the Kildyam volcano complex (central Yakutia, Russia)

A.V. Kostin

*Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 39 pr. Lenina, Yakutsk, Russia
a.v.kostin2006@rambler.ru*

Abstract. A Kildyam Volcanic Complex was discovered in the natural outcrops and quarries of the Kangalassky terrace in the left bank of the Lena River 26 km north of Yakutsk. The manifestations of volcanism are represented by magnetite rich lava flows, agglomerate, pyroclastic breccia and tuff of andesites and dacites. Kildyam iron oxide deposit has been interpreted as lava flows and feeder dykes formed from iron-rich pyroxenite magma as a result of liquid immiscibility. Associated with andesitic lavas mineralization occur as massive, tabular bodies and stratified pyroclastic ores. Our research confirmed that tholeiitic trend of iron-rich pyroxenites evolves towards two immiscible liquids – magnetite lava and melilitite matrix. Further evolution leads to the separation of native iron and the transition of lavas to the calc-alkaline trend. Immiscibility of iron- and silica-rich melts during andesitic volcanism led to the formation of exotic varieties of magnetite-rich volcanic rocks. Fe-Ti-spinel mineral group is widespread at the Kildyam Volcanic Complex in the host andesite and in the local magnetite orebodies. The presence of native iron liquids as melt inclusions in clinopyroxene and plagioclase phenocrysts, magnetite- and silica-rich globules in andesite matrix, demonstrates the occurrence of liquid immiscibility in the early stage evolution of tholeiitic magmas. Lava flows saturated with native iron, magnetite, troilite and pyrite, native iron usually spherical in shape. According to microprobe analysis native iron contains Co – 0.04–2.89 %; Ni – 0.01–1.09 %; Pt – up to 1.45 %; Ir – up to 2.97 %; Pyrite contains Au – 0.11–2.25 %; Pt – 0.57–2.88 %; Ag – 0–1.18 %; Troilite contains Au – 0–3.15 %; Pt – 0–2.02 %; Ag – 0–1.68 %. In some parts of lava flows the amount of the magnetic fraction reaches 25–37 % of the total volume. In andesitic variolitic lavas the Pt content determined by the ICP-MS method – 0.11 g/t. A mineral phase enriched in Au (6.85 %) and Hg (2.94 %) was diagnosed in the Fe_2TiO_4 – MgAl_2O_4 spinelide. On the flanks of the volcanic field, alluvial gold is known in the Zolotinka stream (Cape Kangalassky) and in Paleogene sediments, discovered by the Khatyng-Yuryakh quarry 8 km from the center of Yakutsk by A.P. Smelov and A.A. Surnin. Most of the analyzed gold fineness varies from 846 to 996. Among high-fineness gold there is an Ag alloy – electrum which is typical for gold-silver mineralization. Discovered andesite associated iron-oxide ± gold and silver mineralization in Central Yakutia allows to refer it to analogous El Lago deposit in High Andes.

Key words: Kildyam Volcanic Complex, magnetite lava, iron, gold, Central Yakutia.

Acknowledgements. This research was funded by Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project number 0381-2019-004. The author express his gratitude to Dr. Valentin P. Afanasiev for his constructive comments and excellent suggestions that helped to improve the manuscript. I am grateful for the support of the idea of studying the Kildyam Volcanic Complex and numerous discussions on all aspects of volcanism to the Institute colleagues – Vera A. Trunilina, Oleg B. Oleinikov and Vitaliy S. Grinenko. Larisa T. Galenchikova is thanked for excellent chemical analyses of rocks, Anna S. Vasileva – for gold and iron analyses, Nadejda V. Zajakina and Tatyana I. Vasileva – for x-ray analyses of volcanic rocks. Microprobe analyses were provided with the great help of Maria S. Jelonskaya. Sample preparation for microscope and microprobe studies were well done by Vladimir Kurchatov.

Introduction

Volcanic processes occurring in platform areas are of significant interest in modern geology due to their link with many deposit styles [1]. Volcanic

manifestations were noted earlier in the Vilyui syncline and its frame [2]. For all the years of research, a significant number of the outcrops with volcanic tuffs were discovered, and not a single volcanic

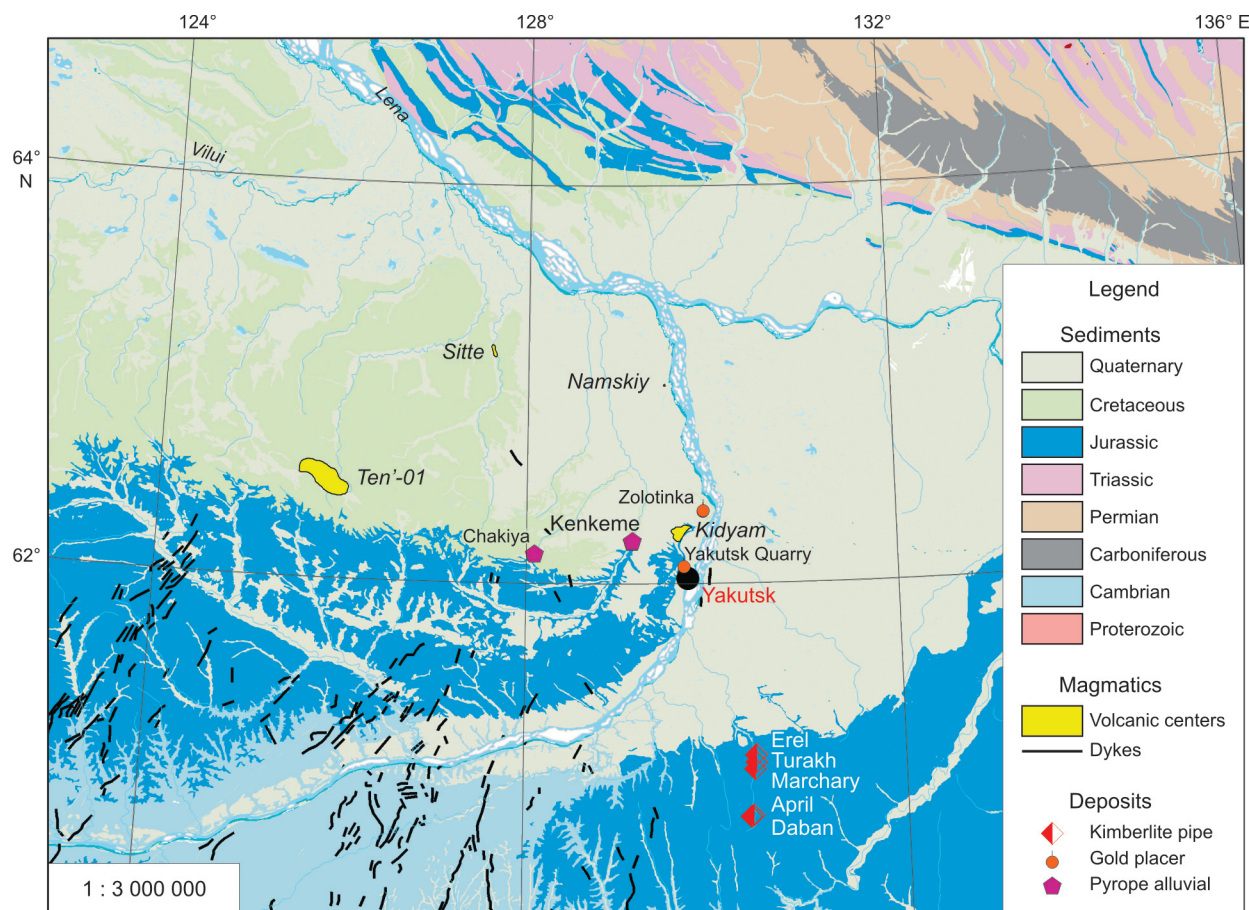


Fig. 1. Geological map of the Lena-Vilyui watershed, showing the location of Ten'-01 and Kildyam volcanic areas (geology simplified from mapping after Grinenko et al. [16]) and close up position to the mafic dyke swarms of the Vilyui rift [20]. Location of alluvial pyrope from lherzolite paragenesis after Afanasiev et al. [21]. Placer gold location from Smelov and Surnin [22]; Kimberlite pipes location from DPMGI SB RAS open-file report <http://diamond.ysn.ru/wp-content/pdf/nir/Otchet-0381-2014-0004-2016.pdf>.

structure was found. To date, the main volcanic centers of the Lena-Vilyui watershed are presented on Figure 1, where Ten'-01 and Kildyam are the discovered volcanic structures [3, 4].

The Sitte manifestation [N63.18°; E127.61°] was first described by Goldbraikh [5] as a 10 m outcrop of tufogenic rocks in Sitte river watershed. The sharply angular, bizarre shape of the pyroclastic material indicates the proximity of the volcanic source. Tuffs contain fern fossils flora of *Coniopteridium* and *Adiantites*, assigned to the Khatyryk Formation of Lower Cretaceous.

In the Namsky well [N63.00°; E129.50°], drilled to a depth of 2136 m [6] described a 4-meter layer of andesitic tuffs at the base of the Khatyryk Formation of Lower Cretaceous.

Volcanic cone Ten'-01 [N62.50°; E125.73°] and the Tyugeninsky Volcanic Complex [N62.56°; E125.76°], discovered by A.V. Kostin et al., in the sources of the p. Tyugene, forms a large volcanic

center elongated in the north – west direction [7]. Andesites lie on the sediments of the Batylykh Formation (145.8–124.5 ma), reduced in Agrafen time (104–93.5 ma) and Chirima time (93.5–86.6 Ma). The dacite volcanic cone breaks through all these sediments.

Volcanic rocks of the Kildyam Volcanic Complex [N62.25°; E129.70°], were first described by A.V. Kostin and V.A. Trunilina [4]. The sediments are represented by sandstones and sand with interlayers and strata of siltstones, mudstones and coals of the Lower Vilyui, Marykchan and Bergein undivided formations of the Upper Jurassic. In the Upper Jurassic stratigraphic section, previously unknown stratified andesite-dacite lava flows with a visible thickness of more than 10 m were discovered. Due to numerous quarries in the Bolshoy Yakutsk area, it became possible to study the volcanic rocks of the Kildyam Volcanic Complex and discover that many fragments of lava are highly mag-

netic. Chemical analysis of magnetic varieties of lavas showed the presence of $\text{FeO}_{\text{total}}$ from 21.46 to 70.8 %. Microprobe analysis confirmed presence of Cu-Co-Ni-bearing magnetite as a main mineral in lavas. Magnetite is associated with ulvospinel and contains impurities of Ag-tetrahedrite, acanthite, galena, sphalerite and chalcopyrite. Immiscibility of silicate liquids in Kildyam andesite lavas are manifested with globules of silica, plagioclase, magnetite and native iron. In different lava flows, globules are surrounded by K-plagioclase and melilite. Phenocrysts in magnetite lava are represented by the pyroxene, with native iron and troilite globules.

Many of the magnetite rich Kildyam lava features are typical for a Kiruna style deposits, which are widely recognized as a part of IOCG clan with prevailing of magnetite mineralization and occurs in a number of locations in the world. They range from Proterozoic to Holocene, and are associated with volcanic rocks or sub-volcanic intrusions [8–10]. Large accumulations of magnetite have been interpreted as having formed by crystal fractionation or by melt immiscibility between a silicate and an iron oxide melts. Philpotts [11, 12], Tornøsen et al., [13] propose that melt inclusions in plagioclase and pyroxene phenocrysts are typical for Kiruna-type deposits and confirms the role of silicate liquid immiscibility in the formation of iron-rich ore. According to this view, iron-oxide ore formed at the same time and by the same processes as the host volcanic rocks.

This paper is devoted to the Kildyam Volcanic Complex in Central Yakutia with high grade iron-oxide ore mineralization within lava flows that have share many common features with a Kiruna-type iron oxide deposit, characterized by a high content of magnetite.

Geological setting

The geology of the Lena-Vilyui watershed has been described in detail by L. M. Parfenov, A. V. Prokopenko, V. V. Gaiduk [14], L. M. Parfenov [15], V. M. Grinenko et al [16–18]. The Lena-Vilyui basin, consisting of the Vilyui syncline and the Pre-Verkhoyansk deflection, is made of the Upper Jurassic – Lower Cretaceous boundary rocks (Laptev and Kitchan subcomplexes of the Verkhoyansk terrigenous complex) within the eastern Siberian platform. Its folded framing was studied both from natural outcrops in the river basins of Vilyui, Lena and Aldan and from deep horizons using samples obtained by core drilling [16]. Based on materials from past geological surveys [16], rocks of the left bank of the river

Lena at Kildyam site [N62.25°; E129.70°] are represented by sandstones and sands with interbeds and stratas of siltstones, mudstones and coals of the Lower Vilyui, Marykchan and Bergein undivided suites of the Upper Jurassic (J_3^{nv-br}). The Marykchan Formation is composed of dark gray and black mudstones and siltstones, often carbonaceous, with thin layers of fine-grained light gray sandstones. The suite includes several lenses and interlayers of brown coal. According to the Bergein Formation, it consists of thick strata of light gray, almost white sandstones interbedded with dark gray siltstones and black carbonaceous mudstones. The suite contains several coal seams.

Until recently, the southeastern flank of the Vilyui Basin did not attract attention of geoscientists in terms of any volcanic activity. Volcanic activity of the southeastern flank of the Vilyui Basin has been first recognized in 2014, after discovering volcanic structure Ten'-01 (volcanic cone coordinates are N62.50°; E125.72°), with dacite lavas and crystalloclastic tuffs in the Upper Jurassic section of primary sedimentary terrigenous continental rocks at the boundary with the Lower Cretaceous continental terrigenous sediments [3].

In 2016–2019, the Diamond and Precious Metal Geology Institute (Yakutsk, Russia) conducted geological survey at the left bank of the Lena River at the slope of the Kangalassky terrace 26 km north of Yakutsk (the Bolshoy Yakutsk area). A numerous previously unknown outcrops with wide spread of andesitic and dacitic lavas and subvolcanic rocks at Kildyam site were discovered [4]. Geological map (Fig. 1) showing the location of main volcanic centers and spatially associated alluvial placer pyrope and gold manifestations. Recently discovered kimberlite pipes Erel, Turakh, Manchary, April and Daban [19] are located southeast from Yakutsk.

Methods and analytical techniques

Ninety-six representative surface samples of igneous rocks including different rock textures styles were collected during field works of 2016–2020. Samples of unaltered andesite from the Kildyam site were prepared for standard petrographic study and examined in polished thin sections, using reflected and transmitted light microscopy. The following methods were used during the study of the Kildyam Volcanic Complex.

First, detailed field mapping was performed using ArcGis images to identify rock location in regional structures. Volcanic flows morphologies were

Representative chemical analyzes of major oxides (wt. %) and results

Sample	1033/3	1037/2	1042/2	1033/5	1044/4	1044/5
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	70.29	73.27	71.31	66.34	63.9	64.88
TiO ₂	0.9	0.12	0.15	1.03	0.92	0.7
Al ₂ O ₃	15.72	15.35	15.74	17.81	19.05	16.58
Fe ₂ O ₃	1.97	0.12	1.74	4.54	0.71	4.14
FeO	0.57	1.53	0.83	0.42	5.51	3.73
MnO	0.06	0.08	0.02	0.1	0.13	0.15
MgO	0.78	0.75	0.95	1.41	1.84	1.34
CaO	2.07	1.17	1.34	1.86	1.36	1.47
Na ₂ O	3.06	3.19	3.36	2.52	2.3	2.94
K ₂ O	2.88	3.56	3.72	2.94	3.61	3.44
P ₂ O ₅	0.35	0.12	0.13	0.42	0.22	0.24
H ₂ O ⁺	1.1	0.47	0.04	0	0.23	0
H ₂ O ⁻	0.78	0.04	0.12	0.42	0	0.1
CO ₂	0.44	0.23	0.26	0.22	0.38	0.23
S	0.12	0.01	0.02	0.03	0.1	0.06
LOI	0	0	0.27	0.42	0	0
Total	99.53	99.93	99.76	99.64	100.26	99.80
La	70.71	56.69	50.18	48.47	66.37	59.20
Ce	137.44	102.24	95.81	99.32	119.71	106.07
Pr	15.02	11.01	10.56	11.23	13.97	12.44
Nd	54.72	41.52	35.86	40.22	53.06	50.35
Sm	8.47	5.35	5.67	5.64	7.96	6.97
Eu	1.59	1.25	1.28	1.42	1.78	1.41
Gd	7.56	4.87	5.25	5.82	7.05	6.65
Tb	0.85	0.61	0.66	0.68	1.05	0.79
Dy	4.92	3.28	2.87	3.62	5.37	4.13
Ho	0.80	0.52	0.54	0.65	1.05	0.78
Er	2.12	1.47	1.48	1.54	2.82	1.99
Tm	0.29	0.18	0.21	0.20	0.41	0.27
Yb	1.97	1.22	1.14	1.30	2.37	1.67
Lu	0.33	0.18	0.23	0.20	0.43	0.28
Cs	1.19	0.97	1.11	1.77	3.93	2.31
Hf	3.11	1.93	1.75	2.26	3.47	2.68
Ta	1.93	1.18	1.40	1.19	1.46	1.28
Th	16.22	12.44	10.98	10.62	25.29	14.56
U	2.56	1.70	1.82	2.34	4.77	2.92
Ba	1206.54	1372.39	1233.14	1249.43	1232.95	1314.02
Rb	89.28	93.86	89.17	104.08	122.14	99.36
Sr	376.85	375.81	378.46	348.31	262.99	308.17
Y	22.66	13.61	13.82	14.97	25.91	18.59
Zr	70.40	46.02	32.49	42.20	90.33	61.71
Nb	20.35	12.43	14.71	13.20	16.86	14.92
Pt	—	—	—	—	—	—

Samples: 1033/3 – Yellow tuff sandstone. 1037/2 – Coarse-grained gray volcanic tuff. 1042/2 – Red volcanic tuff. Dacite series: 1033/5 – Banded dark gray lava-breccia. 1044/4 – Volcanic tuff with the remains of flora. 1044/5 – Black pumice. 1031/1 – Banded lava-breccia. 1031/2 – Partially altered black and red lamellar breccia. 1044/2A – Porous lava. Andesite series: 1030/4A and

Table 1

for trace elements (g/t) for the rocks of Kildyam Volcanic Complex

1031/1	1031/2	1044/2A	1030/4A	1030/8	1039	1042/3
7	8	9	10	11	12	13
69.02	63.38	67.25	56.02	56.38	40.17	0.65
0.16	0.14	0.84	0.69	0.16	0.19	0.07
16.18	15.72	17	13.45	12.98	8.58	0.62
0.31	9.68	1.23	1.57	0.65	14.19	93.66
3.38	0.86	2.71	7.2	4.93	18.23	0.42
0.07	0.3	0.13	0.35	0.3	1.6	3.06
1.15	1.1	1.6	2.03	2.62	1.69	0.9
1.43	1.25	1.53	12.12	16.32	13.01	0.51
3.2	2.77	3.06	1.9	2.16	0.26	0.09
3.44	3.24	3.41	2.05	2.05	0.18	0.03
0.28	0.21	0.28	0.14	0.07	0.01	0.09
0.62	0.74	0.66	0.39	0.46	0.84	0.05
0.18	0.12	0.12	0.48	0.14	0.5	0.06
0.09	0.13	0.31	0.27	0.2	0.78	0
0	0.04	0.04	0.35	0.3	0.35	0.03
0.35	0.1	0	0.8	0.07	0	0
99.5	99.54	99.93	98.85	99.51	100.08	100.18
49.52	62.59	62.73	69.35	69.23	34.53	9.73
100.76	119.93	129.39	131.07	136.00	58.71	19.19
11.48	13.47	14.75	15.61	16.90	6.55	2.53
42.25	49.49	50.64	66.98	71.05	23.12	10.88
6.17	7.59	7.51	11.90	11.12	4.12	2.08
1.48	1.42	1.73	2.57	2.99	0.80	0.69
5.59	6.69	7.07	13.75	13.93	4.69	3.27
0.72	0.89	0.90	1.99	2.00	0.68	0.69
3.89	4.35	4.68	12.85	13.34	4.66	5.22
0.61	0.76	0.73	3.04	2.90	0.98	1.28
1.66	2.12	2.01	8.78	8.44	2.43	4.73
0.24	0.31	0.30	1.26	1.26	0.40	0.77
1.54	1.41	1.74	9.20	8.93	2.44	5.80
0.21	0.23	0.25	1.53	1.45	0.47	0.90
1.77	2.04	2.12	1.14	1.32	0.32	0.03
1.99	1.66	2.64	9.92	9.46	10.38	1.22
1.35	1.12	1.61	1.28	1.31	1.33	0.17
10.70	12.63	16.49	16.42	15.79	17.36	3.79
2.56	2.67	3.29	5.99	6.14	4.60	0.80
1274.78	1242.82	1129.17	4562.00	4199.34	3026.24	77.00
100.25	94.74	98.76	48.96	54.65	7.91	2.16
390.16	327.87	310.46	2693.85	2653.61	2078.70	30.72
17.02	19.85	18.92	103.79	103.21	27.78	34.39
45.94	42.88	55.82	313.57	295.24	313.92	85.59
15.85	12.74	18.44	16.14	15.84	14.50	1.87
–	–	–	0.11	0.11	–	–

1030/8 – Variolitic bubbly gray lava with native iron. Ultramafic series: 1039 – Subvolcanic pyroxenite. Magnetite series: 1042/3 – Magnetite ore in lava.

described, and the lateral or vertical successions of lithofacies were used to identify volcanic units. Then sample collection of the leaf flora fossils in the red and reddish-brown crystalloclastic volcanic tuffs and an age determination by V.S. Grinenko in DPMGI SB RAS and A. Kirichkova in St. Petersburg, VNIGRI [23].

Second, a field collection of rock samples was created to characterize lithotype, textural, and structural features. All chemical analyses of volcanic rocks were carried out at the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS). The major oxides compositions were analyzed using methods of spectrometry, atomic emission spectrometry, ionometry with ion-selective electrode, gravimetry and titrimetry. The major analyzed oxides were: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O and P_2O_5 . The loss on ignition (LOI) values ranges from 0 to 0.8 %. Trace elements were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP MS) in the chemical analytical center «Plasma», Tomsk, Russia. Analyzed trace elements were: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Cs, Hf, Ta, Th, U, Ba, Rb, Sr, Y, Zr, Nb and Pt.

Third, microscopic petrography and microprobe analysis of 77 polished sections was conducted to provide detailed data to confirm the phenocrysts and glass chemistry, presence of magnetite and other ore minerals. All microprobe and x-ray analyses were carried in the Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (DPMGI SB RAS). Samples were prepared from polished sections with a sprayed thin conductive layer of carbon. Back-scattered electron (BSE) images and spot analyses of minerals were done using scanning electron microscope JSM-6480LV with energy spectrometer INCA-Energy, accelerating voltage at the cathode 20 kV. Major minerals in lavas were determined by x-ray phase analysis using D2 PHASER diffractometer.

Fourth, sampling of a magnetic fraction from a lava sample weighing 30 kg showed that at least 30 % of the sample weight is magnetic. For magnetic and non-magnetic varieties of lavas, a chemical analysis was performed. Polished samples were prepared from magnetic varieties of rocks for microscope and microprobe studies. For magnetite lavas, the chemical composition of the matrix was obtained by areal microprobe scanning.

Volcanic formations

A Kildyam is a Late Jurassic–Early Cretaceous volcanic complex in the transition zone between the Siberian platform and the Verkhoyansk-Kolyma folded region in Central Yakutia [3, 23]. It consists of several small eruptive centers with a conical morphology and fissure outpourings of lavas. The outcrops showing that dacite lavas first penetrate through Late Jurassic sandstones (3.0 m) along a fissure conduit and then cover the sandstones with 2–5 m layer. Lava flow is covered with a layer of crystalloclastic tuffs, about 1.5 m thick, which is brecciated by the next lava flow (Fig. 2). The Kildyam volcanic field covers 53.65 km² and has a lava volume at least 0.53 km³. The chemical compositions of the main varieties of volcanic rocks are shown in the Table 1. They include volcanic tuff, pumice, lava, lava-breccia, ignimbrites of dacite series, lava and lava-breccia of andesite series, sub-volcanic pyroxenite and magnetite lava.

Volcanic tuffs. The recognition that some of the inter-lava red beds are tuffs rather than laterites may imply complex volcanic lava successions within the Lena-Vilyui watershed. Volcanic tuffs are characterized by rough layering, their color varies from pale red to brick. They contrast with the dark-coloured lava and stand out well in ArcGis, Google and other space images among rocks of other colors (Figure 3, A and B). The same color of volcanic tuff characterizes many volcanic regions of Kamchatka, Armenia, Lassen National Park in Northern California, etc. It is assumed that the color of red tuffs is the result of temperature and fluid exposure to volcanic ash during volcanic eruptions [24] and later weathering [25]. Selective weathering changes iron oxidation state in volcanic tuffs from Fe^{+2} to Fe^{+3} form and tuffs color changes from dark-grey to reddish (Fig. 3, C).

Tuffs of the Kildyam Volcanic Complex have a lithocrystalline structure with ash cement. From 0.2 to 1 mm sized phenocrysts and angular fragments of crystals of plagioclase, weakly pelitized potassium feldspar and quartz, irregularly separated porphyry andesite and glass fragments are cemented by fine pyroclastic material saturated with iron hydroxides. The red and reddish-brown crystalloclastic volcanic tuffs of the Upper Jurassic flora contain fossils of leaf flora (Fig. 4) typical of the Bergeya Formation in the Aldan River basin. The age of the leaf flora was determined as Late Jurassic by A. Kirichkova in St. Petersburg, VNIGRI [23].

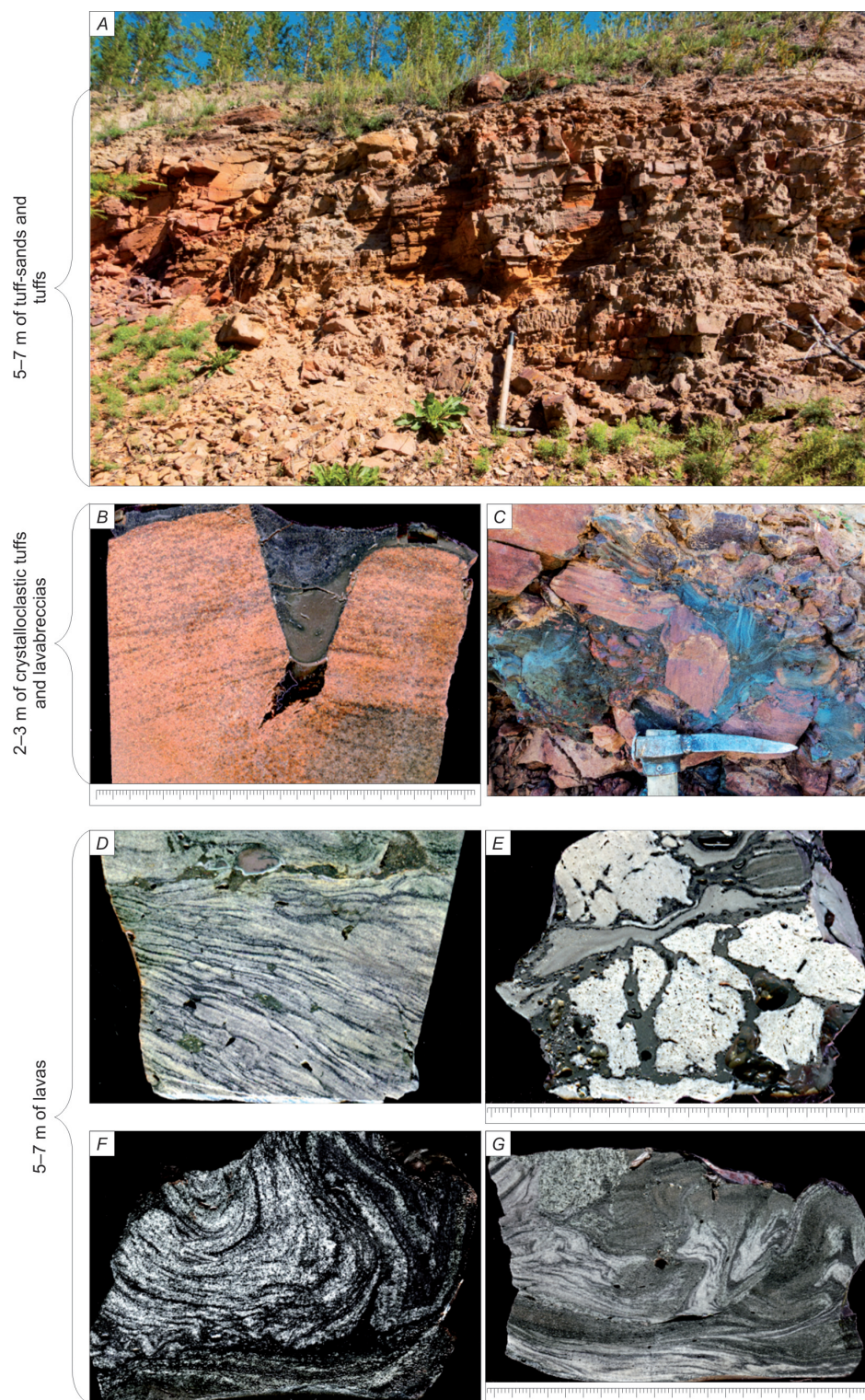


Fig. 2. Field photographs from the outcrop of volcanic formations in Kildyam Volcanic Complex (left side of the Lena River) and rock samples.

A – Outcrop of tuff-sands (yellow) and tuffs (reddish). B – Crack in crystalloclastic tuffs filled with lava. C – Lava flow brecciating a layer of crystalloclastic tuffs with leaf flora. D – Ignimbrites (sample 1044/3) were light – fragments of porous lava with crystallites, black – glass fragments and lenses elongated and flattened parallel to the surface of light porous lavas, brown – fayalite (Fa) segregations saturated with melted interspersed spinel and hematite. E – Brecciated lava with crystallites, dark – obsidian cement. F – Wavy lava (sample 1033/5) were light – lava with crystallites, dark – obsidian. G – Autobrecciation in the lava flow.

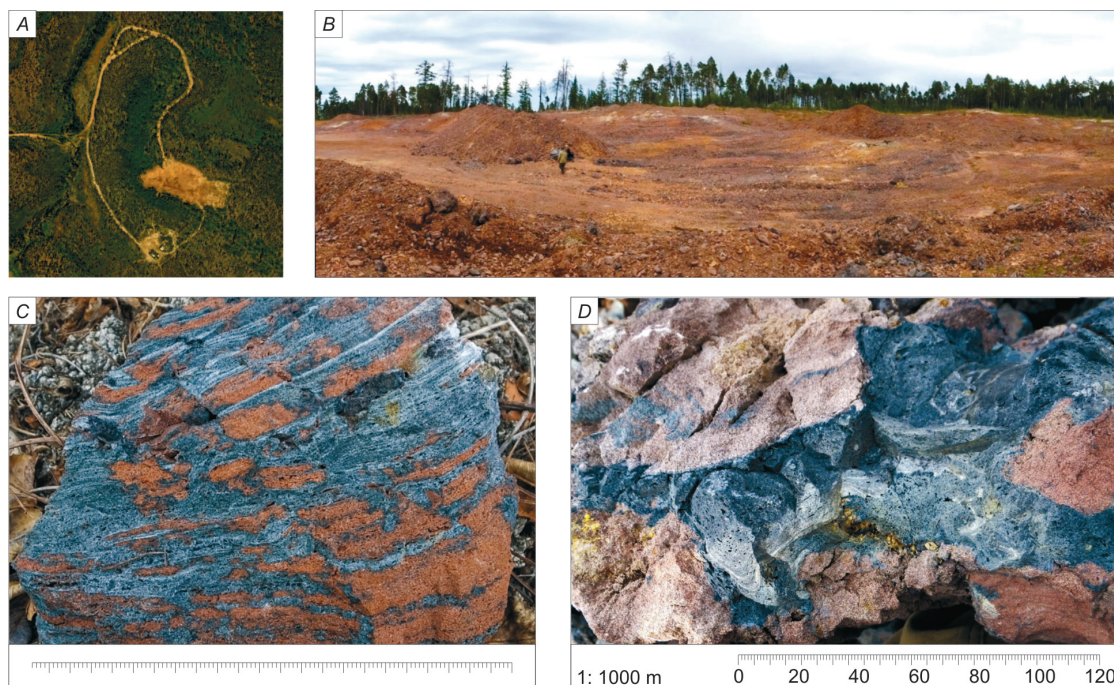


Fig. 3. One of the quarries on the Lena-Vilyui watershed where red tuffs are mined for road works.

A – ArcGis satellite image of a quarry and B – A photo of the open pit showing that red tuff color is a reliable prospecting tag. C – Selective weathering of volcanic tuff at Kildyam lava successions. D – The later lava flow (dark grey) brecciate red tuffs.

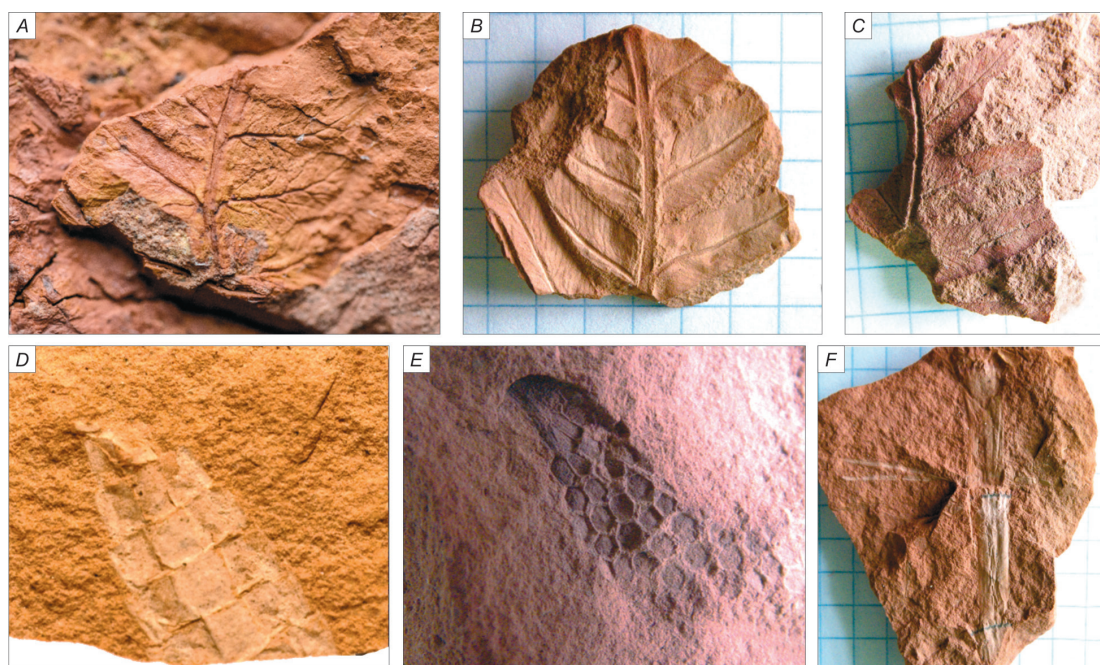


Fig. 4. The fossils of Late Jurassic flora in brick-red crystalloclastic tuffs from Kildyam volcanic field [23].

A–C – *Cladophlebis aldanensis* Vachr; D – *Cycadales megastrobil* imprint; E – *Coniferales megastrobil* imprint; F – *Equisetites* cf. *acmophyllus* Kiritch.

Lava breccias. Breccia facies are common at Kildyam Volcanic Complex and usually observed between sections of differing lava flow orienta-

tions. An 1–4 m wide breccia zone consist of angular fragments of hyalopilitic andesites or variolitic andesibasalts and reddish-brown crystallo-

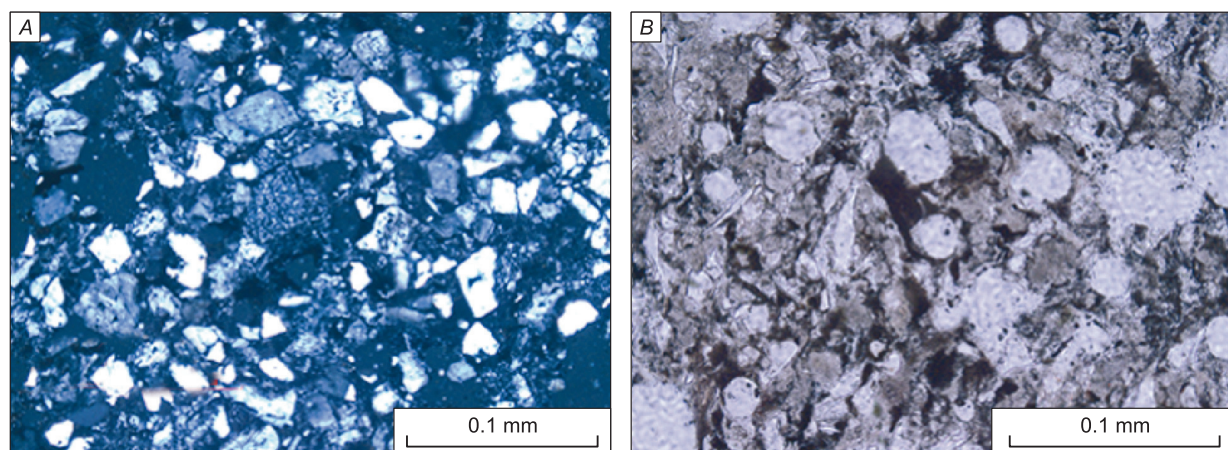


Fig. 5. Photomicrographs of dacite lava facies.

A – Dacite of vent facies, sample 1042/1. B – Dacite of lava facies, sample 1044/3.

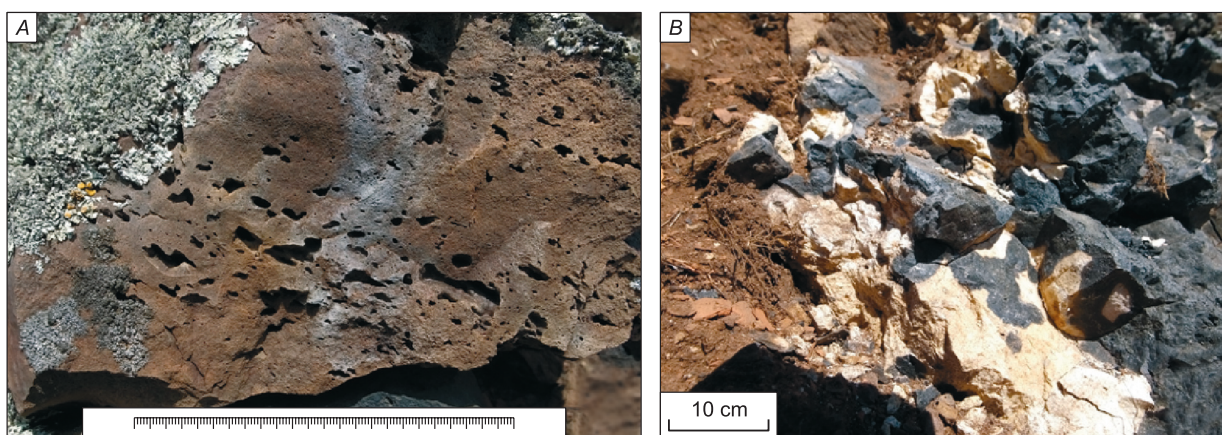


Fig. 6. Photographs of vesicles in the dacite lava flows. Spherical vesicle (A) elongated vesicle (B) with no filling showing that gas release from melt caused the formation of primary porosity, while secondary hydrothermal alteration is absent.

clastic volcanic tuffs in bubble dacite-rhyodacite glass containing tiny feldspar microlites. The boundaries between the inclusions of rocks and glass are quite clear which is typical for sintered tuffs or ingimbrites (Fig. 2 B–E). A small amount of host sandstone in lava breccias is typical for Kildyam fractured lava outflows. The number of fragments of the host rock is higher in small dacite extrusions.

Dacites. Dacites are present in the extrusion of the Kildyam Volcanic Complex and in the outcrops in the walls of the quarries of the Namtsyrsky road. The first is dominated by dacites of the volcano vent facies, where the glassy felsitic bulk rock is overflowed with crystals and crystal fragments (prevail) of polysynthetically twinned oligoclase-andesine, pelitized sanidine and quartz (Fig. 5, A). Lava facies dacites are bubbly to foamy, with feldspar and quartz crystals in a glassy to microfelsitic matrix

with feldspar and light-colored amphibole microcrystallites (Fig. 5, B).

The formation of banded and undulating lavas is typical for the lava flows on the slopes of the Kildyam volcano. Lavas are characterized by the alternation of 1–15 mm thick light and dark stripes. The crystalline phase predominates in light finely porous bands, and is represented by feldspar and quartz. Dark bands are represented by obsidian or by bubbly riodacite with size of the voids larger than in the light bands and with the predominance of the glassy matrix over the crystalline phase (Fig. 2, F and G).

Bubble textures and shape in the Kildyam lava flows suggest two styles of solidification. In the first case, when the lava fills depressions in the relief and solidifies without movement, the major bubbles have round shapes. In the second case, when the lava flow was moving along the slope, the shape of the bubbles is elongated (Fig. 6).

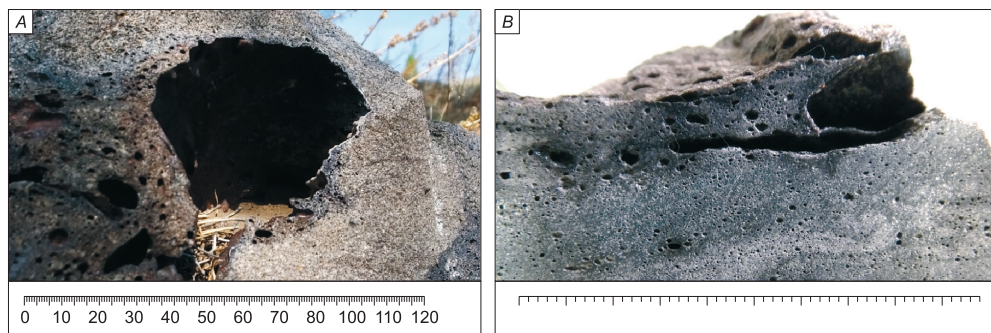


Fig. 7. The natural outcrops of the Kangalassky terrace with different styles of vesicles in Kildiam lavas:
A – Empty stretched vesicles in dacite. B – Complex shape of vesicles in dacite (black) filled with cristobalite (white).



Fig. 8. One of the quarries with red tuffs at the Kangalassky terrace in the left bank of the Lena River (location N 62.18°; E 129.49°).

A – Sand, coal, red volcanic tuff with fossils of Late Jurassic flora and andesitic lava flow, mined from top to bottom in the quarry. B – Andesitic lava flow and related feeder dykes in steeply falling cracks discovered in the roof of a sandstone layer, covered with an andesitic lava flow. C – Feeder dyke-1 with porous andesite lava and pumice (black) in sandstone (light) crack. Close up to contact with the andesitic lava, sandstone is high temperature altered and changes color to pink. D – In the feeder dyke-2, close to the bottom of andesitic lava flow, lava is altered and weathered.

Detailed observations confirmed that vesicles in Kildiam dacites are empty or filled with a vapor-phase cristobalite (Fig. 7) that proves a local silica redistribution and magmatic degassing. The presence of cristobalite in volcanic rocks is considered an evidence of redistributed silica within the magmatic system [26–28]. We suggest that the presence of large clusters of cristobalite indicates a close proximity to the lava exit paths and empty bubbles indicate the distant lava flows.

Andesite. Volcanic structures, composed of andesite lavas, are represented by a series of small shafts with a flat outer and steep inner surface. Andesite lava eruptions of the Kildyam Volcanic Complex are confined to 0.2 to 1 m wide cracks (Fig. 8). Andesite is of variolitic texture lava with ovoidal

segregations, submerged in a glassy or microcrystalline matrix, composed of intergrowths of needle-shaped clinopyroxene – diopside, wollastonite, less commonly hedenbergite, rarely augite and labrador crystals, with brown altered glass, Fe-rich olivine – fayalite is relatively less common. Andesitic lava has a density of 2.88–2.92 g/cm³ and the Pt content of 0.11 g/t (determined by the ICP-MS method).

Petrographic and microprobe studies confirmed the liquid immiscibility in silicate melt during crystallization. Immiscible liquids are preserved as globules of one glass in another in andesites and as melt inclusions of native iron in matrix (Fig. 9).

Pyroxenite. Abundant pyroxenite xenoliths are discovered in a Kildyam dacite lava flow only from a single location at the N 62.29°; E 129.80°. The

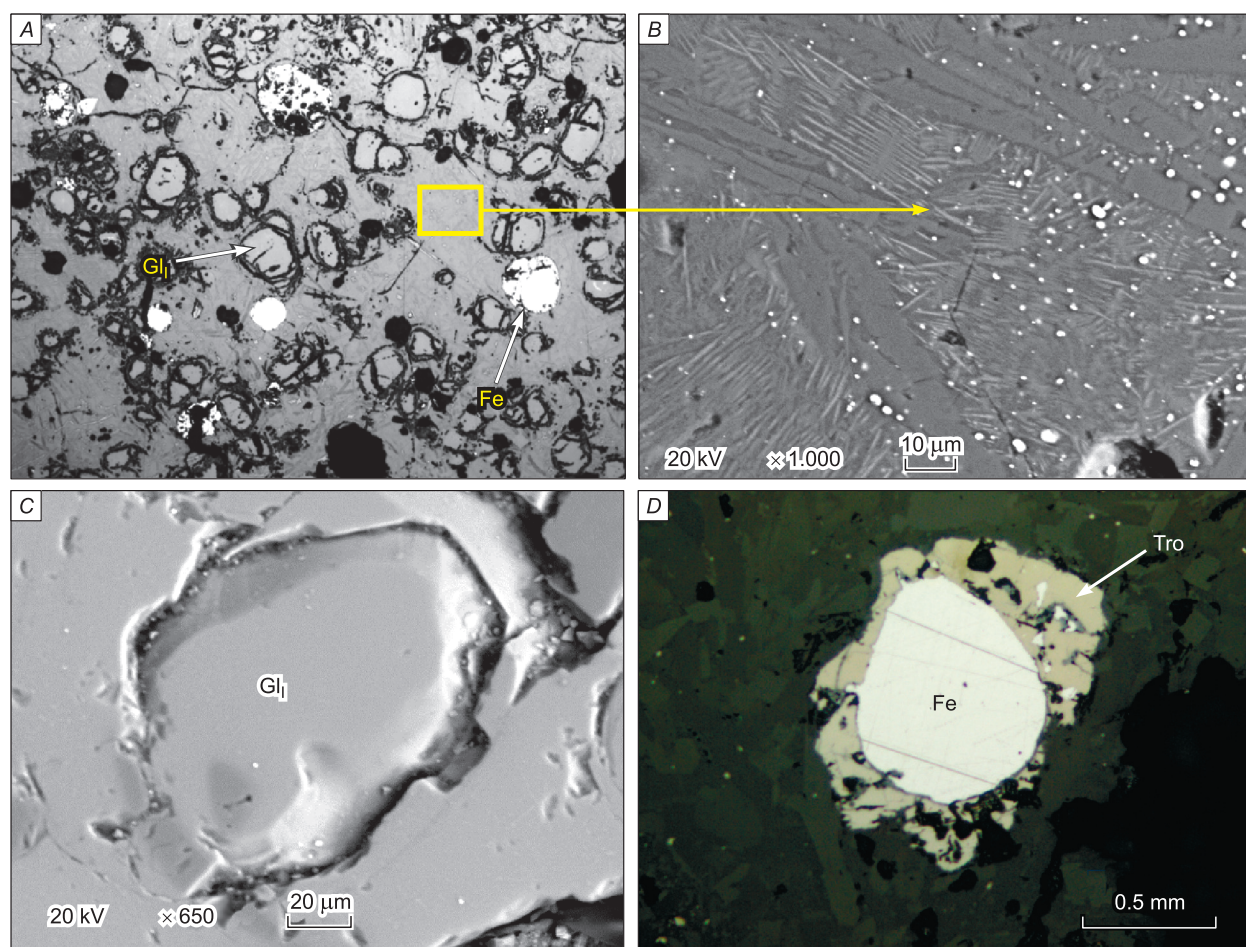


Fig. 9. A backscattered electron images (A–C) and photomicrograph (D) of variolitic andesite (sample 1030).

A – An overview shot showing the relationship of variolies, glass and native iron globules with microcrystalline matrix. Yellow rectangle shows the location of figure 9B. B – Microcrystalline matrix with early-crystallized dendritic pyroxene forms and native iron melt inclusion in plagioclase-made glass is composed (in %) of: SiO₂–55.37, TiO₂–1.28, Al₂O₃–18.06, FeO_{total} – 13.21, CaO – 2.31, Na₂O – 4.74, K₂O – 4.7. C – Spherical globule [Γλ₁] of glass is composed (in %) of SiO₂ – 56.54, TiO₂ – 0.78, Al₂O₃ – 14.37, FeO_{total} – 5.11, MgO – 2.28, CaO – 17.56, Na₂O – 2.24, K₂O – 1.33. D – Andesitic microcrystalline matrix with a drop of native iron in troilite surrounding. Abbreviations: Gl_I – Globule-I; Fe – native iron, Tro – troilite.

edges of the pyroxenite fragments are slightly melted, and the crystalline structure of the rock is preserved inside completely. The melted reaction rim with the width of 1–5 mm on xenolite margin is dark colored as host dacites and can be recognized only in the polished sections. Pyroxenite is heavy (3.41 g/cm^3), fine-grained black rock of allotriomorphic and rarely panidiomorphic structure with $\text{FeO}_{\text{total}}$ content $> 32 \%$ (sample 1039, Table 1).

Much attention needs to be paid to a relationship between the pyroxenite xenoliths brought to the surface by volcanic eruption and lava style. Studies of pyroxenite xenoliths derived from lavas offer unique glimpses into the properties of the deep continental crust. The P – T conditions for magma generation level of the deep-seated xenoliths in lavas from the Lena-Vilyui watershed have been previously estimated as 12–8 kbar and 1200°C [29]. All found py-

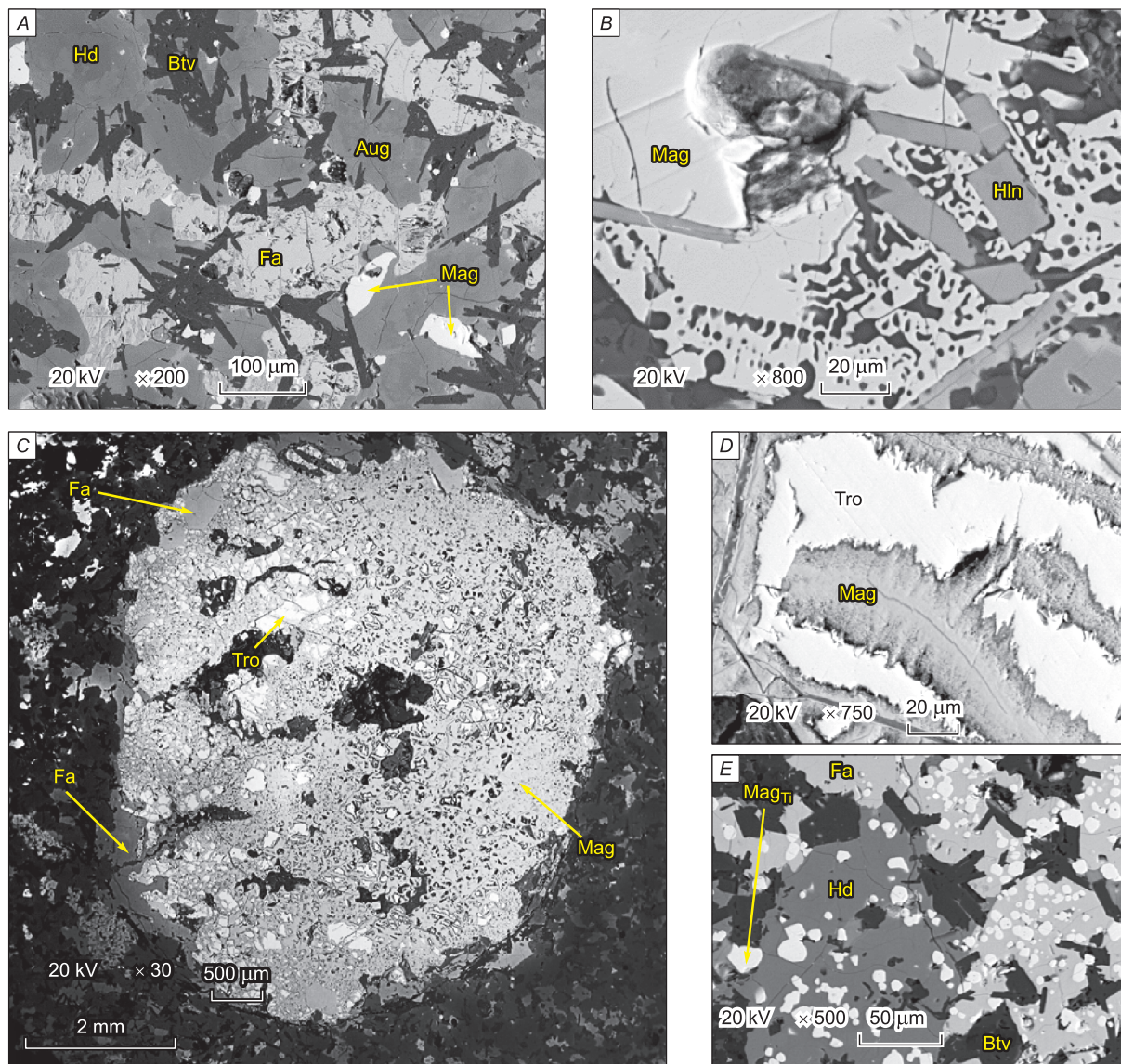


Fig. 10. A backscattered electron images showing ore minerals assemblages in pyroxenite matrix (sample 1039).

A – The relations between pyroxene, olivine, plagioclase and magnetite in pyroxenite xenolith. Magnetite is composed (in %) of: $\text{FeO}_{\text{total}} - 85.38$, $\text{TiO}_2 - 11.16$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2.54$, $\text{MnO} - 0.9$. B – Intergrowth of magnetite crystal with rapid growth texture in the border and hyalophane. Hyalophane is composed (in %) of: $\text{SiO}_2 - 51.71$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 21.94$, $\text{FeO}_{\text{total}} - 1.5$, $\text{CaO} - 1.9$, $\text{BaO} - 16.35$, $\text{K}_2\text{O} - 5.9$. C – Ore globule in pyroxenite matrix is composed of fayalite, troilite and magnetite. D – Fragment of ore globule showing the intergrowth of troilite and magnetite. E – Fragment of ore globule-bearing matrix showing the high degree magnetite saturation of fayalite and hedenbergite. Abbreviations: Aug – augite, Fa – fayalite, Tro – troilite, Mag – magnetite, Hln – hyalophane, Hd – hedenbergite, Btv – bitownite.

roxenite samples are from 5 to 40 cm fragments in a dacite lava with cristobalite in vesicles (Fig. 7, B). There is reason to believe that this site is one of the local volcanic centers.

Based on mineral assemblage xenoliths can be referred to olivine clinopyroxenite. The rock composition includes 48.1 % of pyroxene (augite, rarely hedenbergite), 23.6 % of plagioclase (bitownite-anorthite), 16.8 % of olivine (average $\text{Fo}_{0.105} \text{Fa}_{0.895}$), 6.07 % of magnetite, 1.79 % of calcite and 0.75 % of troilite. Less common minerals are Ba-feldspar celsian and K-Ba-feldspar hyalophane. Ore minerals are concentrated in up to 0.7 cm in size globules, surrounded by olivine rims. Ore globules are composed of magnetite and troilite in equal proportions.

Magnetite lavas. Immiscibility of iron- and silica-rich melts during andesitic volcanism led to the formation of exotic varieties of magnetite-rich volcanic rocks. Fe–Ti-spinel minerals group is widespread at the Kildyam Volcanic Complex in the host andesite and in the local magnetite orebodies. The iron-rich lava can be identified as two main types.

1. **Titaniferous magnetite iron ore.** There is abundant (up to 2 % by volume) iron mineralization disseminated in the andesite matrix. Fe-rich andesitic lava (type-1) includes native iron, troilite and mixture of ulvospinel (Fe_2TiO_4) with spinel (MgAl_2O_4). This spinel group includes Au-Hg mineral phase (Table 2, Fig. 9). Matrix is composed (in %) of: SiO_2 – 54.73, TiO_2 – 1.49, Al_2O_3 – 19.0, $\text{FeO}_{\text{total}}$ – 12.79, CaO – 2.31, Na_2O – 5.17, K_2O – 4.52.

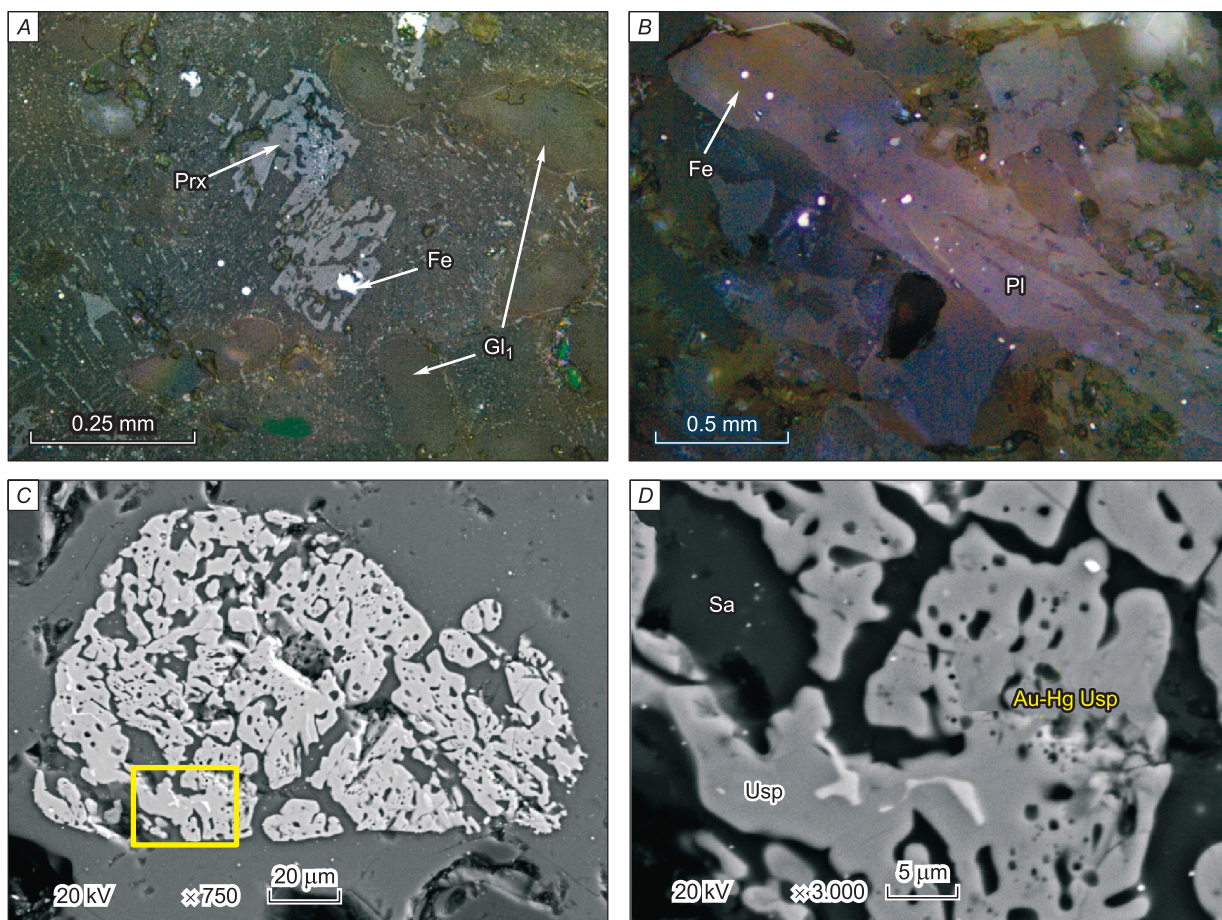


Fig. 11. A – Close-up photomicrograph of skeletal clinopyroxene phenocryst with melt inclusion of native iron. Matrix is a variolitic andesite (sample 1044).

B – Close-up photomicrograph of plagioclase phenocryst with melt inclusion of native iron. Matrix is a variolitic andesite (sample 1044). C – Back-scattered electron image showing titaniferous magnetite skeletal crystal in glass matrix (microprobe analysis in table 2). Yellow rectangle shows the location of figure 11D. D – Detail back-scattered electron image of figure 11C, showing Au-Hg phase in titaniferous magnetite. Abbreviations: Gl_1 – Globule-1; Fe – native iron; Prx – Pyroxene; Pl – Plagioclase; Sa – Sanidine; Usp – Ulvospinele.

Table 2

Microprobe analysis of the spinel-group minerals in titaniferous magnetite iron ore

MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO _{tot}	Au	Hg	Total
5.84	4.67	70.2	17.53	—	—	98.24
6.06	4.16	69.62	19.16	—	—	99.00
5.81	3.88	69.92	19.13	—	—	98.74
3.92	1.89	75.71	18.25	—	—	99.77
4.34	4.98	71.43	17.99	—	—	98.74
6.49	5.9	73.73	13.37	—	—	99.49
5.57	7.28	68.83	16.44	—	—	98.12
1.29	3.26	76.36	7.46	6.85	2.91	98.13
2.8	2.13	75.17	3.2	3.54	3.49	90.33

2. **Magnetite lava** contains of the magnetic fraction from 25 to 37 % of the total volume. In magnetite-rich lavas the FeO_{tot} content can reach 70.8 %, and ultra-rich magnetite lava (sample 1042/3, Table 1) shows 94.08 % of FeO_{tot}. According to the total composition (in %): SiO₂ – 36.32, TiO₂ – 0.62, Al₂O₃ – 11.83, Fe₂O₃ – 16.99, FeO – 4.47, MnO – 0.66, MgO – 1.95, CaO – 17.08, Na₂O – 0.54, K₂O – 1.16, H₂O[–] – 1.21, H₂O⁺ – 1.8, LOI – 2.14, P₂O₅ – 0.03, CO₂ – 1.62, S – 1.55 lava corresponds to melilitic and melilite-bearing volcanic rock. The lava mineral assemblage made up of melilite (prevail) + clinopyroxene + feldspathoids + hyalophane or celsian. All magnetite crystals trapped in the silicate matrix, composed (in %) of: SiO₂ – 35.5, TiO₂ – 0.9, Al₂O₃ – 7.5, FeO_{total} – 13.96, MgO – 3.91, CaO – 37.38, Na₂O – 0.45, K₂O – 0.75.

This type of magnetite comprises that of the main massive magnetite mineralization at Kildyam. Magnetite-A (Table 3) and is dominated by the (Mg–Al–Ti–Mn)-poor compositions. This depletion in MgO, Al₂O₃, TiO₂ and MnO is much more pronounced if compared to the magnetite-B (Figure 12, D).

Discussion

Field evidence from Kildyam Volcanic Complex is interpreted to show important role of fracture tectonics for the penetration of magmatic melts. Due to the fracture nature of the outpouring lavas and fluid-magmatic differentiation of the melts, volcanic formation is separated to dacitic and andesitic. A microprobe area scan of the matrix of magnetite lavas allowed to determine its chemical composition (Table 4) in addition to the table 1.

The combined plot of chemical makeup and microprobe areal scanning of the lavas (Fig. 13, A)

Table 3

Microprobe analysis of the spinel-group minerals in magnetite lava

MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	FeO _{tot}	Total
Magnetite-A – main mineral phase					
—	3.05	2.2	1.58	92.63	99.7
—	2.28	4.01	2.87	91.04	98.86
—	2.32	3.22	2.81	91.35	100.21
—	2.52	2.44	1.86	92.04	99.64
—	2.88	1.27	1.63	94.43	100.21
2.37	4.08	0.98	1.24	90.97	99.64
2.14	3.49	0.95	1.32	89.58	97.48
0.6	2.71	1.87	1.85	92.37	99.4
1.0	3.79	1.02	1.49	92.1	99.4
3.99	10.86	—	—	85.6	100.45
4.77	11.3	—	—	83.67	99.74
3.78	11.72	—	—	83.83	99.33
2.58	9.58	—	—	86.87	99.03
Magnetite-B – inclusions in the main mineral phase					
—	8.84	16.74	1.62	69.32	96.52
—	8.07	16.4	1.46	68.73	94.66
—	5.76	20.97	1.95	68.29	96.97
—	4.14	21.6	2.13	69.96	97.83
—	5.75	21.73	1.85	69.87	99.2
11.15	—	—	27.8	59.32	98.27
8.57	—	—	29.19	58.59	96.35
11.39	—	—	28.37	58.74	98.5
14.28	—	—	25.3	60.87	100.45
12.01	—	—	24.67	60.98	97.66
11.62	—	—	24.76	61.23	97.61
13.6	—	—	24.89	60.71	99.2
13.05	—	—	24.8	60.69	98.54
11.71	—	—	23.9	62.52	98.13
13.26	—	—	25.72	59.4	98.38

shows the basic trend defined by the composition of the Kildyam volcanic rocks. The low silicate iron-enriched pyroxenites and iron-depleted melilitites are particularly interesting. Olivine-clinopyroxenite includes about 6.07 % of magnetite that makes it similar to kosvite and looking alike the deposits of Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) style close to the Kiruna-type. It can be assumed that the pyroxenite melt was divided into magnetite lavas and melilitites, as a result of fractionation. Further melt differentiation led to the isolation of native iron and trachyandesite glass from the andesitic melt.

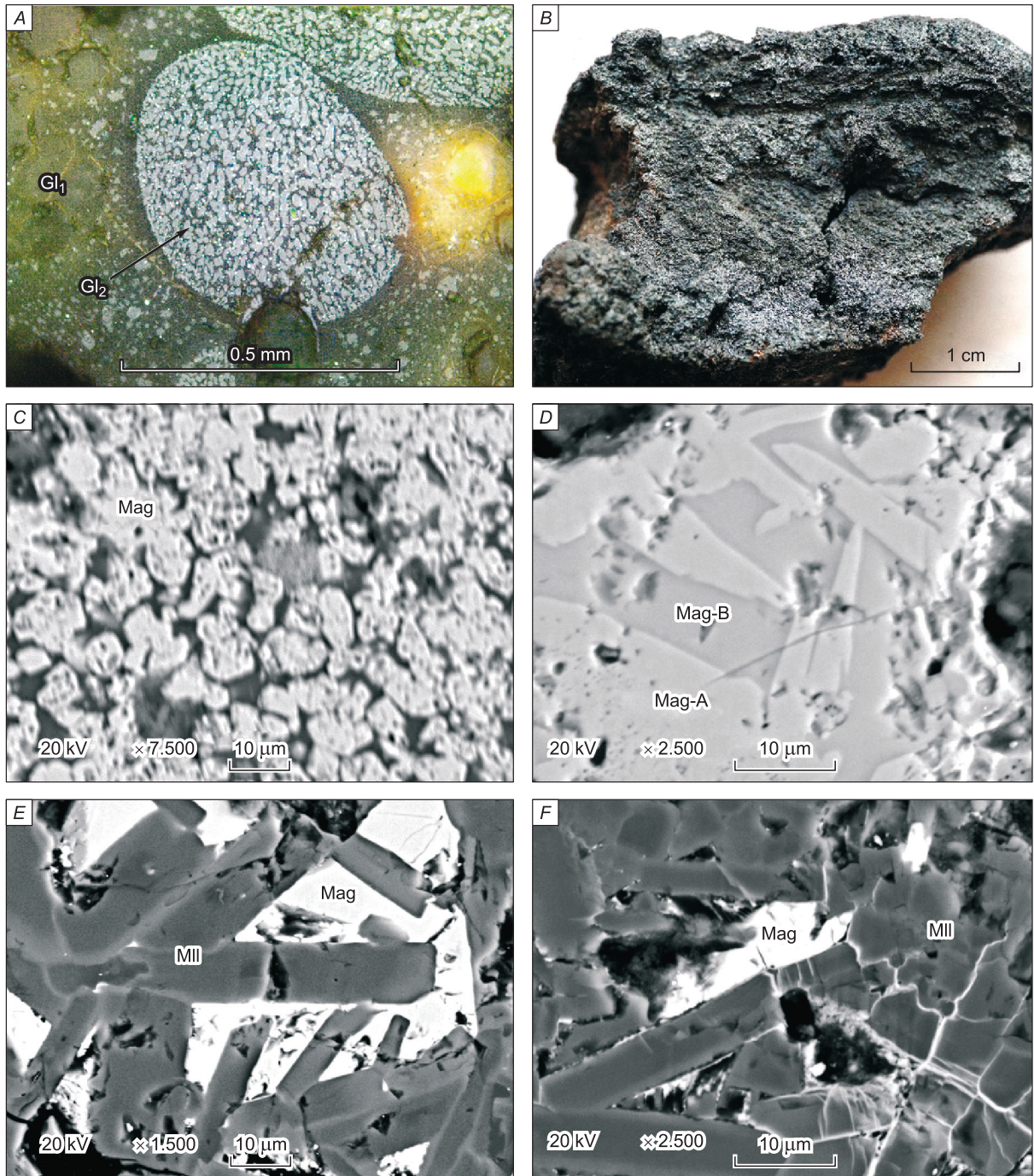


Fig. 12. Magnetite lava minerals assemblage.

A – Magnetite globule (Gl_2) with melilitite matrix in variolitic lava (sample 1044). B – High grade magnetite-lava (sample 1042/3, Table 1). C – Back-scattered electron image, showing magnetite-A – main mineral phase (microprobe analysis in table 3). D – Detail back-scattered electron image of fig. 12, C, showing Mn- and Al-Ti-rich phases in magnetite. E and F – Back-scattered electron images of melilitite matrix filled with magnetite and depleted with magnetite. Abbreviations: Gl_1 – Globule-1; Mag – Magnetite; Mag-A – Magnetite-A; Mag-B – Magnetite-B; MII – Melilitite.

The behavior of iron defines the calc-alkaline and tholeiitic trends. Chin E.J. et al illustrated [30] that magmas evolving along the calc-alkaline trend move towards Fe-depletion, whereas magmas evol-

ing along the tholeiitic trend become Fe-enriched. Our research confirmed that tholeiitic trend of iron-rich pyroxenites evolves towards two immiscible liquids – magnetite lava and melilitite matrix. Fur-

Table 4

Microprobe areal scanning analysis of variolitic lavas (in %)

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{tot}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Pt	Total
Glassy variolitic matrix									
61.48	0.61	12.05	8.65	1.26	11.38	3.25	1.96	–	100.64
56.54	0.78	14.37	5.11	2.28	17.56	2.24	1.33	–	100.21
56.21	0.73	14.41	3.8	2.45	17.01	2.37	1.6	–	98.58
58.69	0.84	15.66	3.76	1.08	16.31	2.61	1.95	–	100.9
58.68	0.89	13.68	4.01	2.35	16.5	2.49	1.66	–	100.26
Microcrystalline matrix with iron and troilite globules									
54.73	1.49	19	12.79	–	2.31	5.17	4.52	0.67	100.68
55.37	1.28	18.06	13.21	–	2.31	4.74	4.7	0.62	100.29
56.17	1.32	18.21	11.97	–	2.02	4.94	4.71	0.95	100.29
Melilitic matrix in magnetite lavas									
35.5	0.9	7.5	13.96	3.91	37.38	0.45	0.75	–	100.35
36.37	–	6.43	10.95	2.22	43.88	0.5	0.21	–	100.56
35.24	0.98	7.98	12.77	3.3	36.9	0.94	0.73	–	98.84
34.73	–	10.14	9.08	5.05	37.96	0.61	0.2	–	97.77

Table 5

Microprobe analysis of ore minerals in variolitic andesites, %

Sample	Fe	Co	Ni	Au	Ag	Pt	Ir	S	Total
Iron native									
1030/4	97.23	2.24	–	–	–	0.11	–	–	99.58
1030/4	98.57	2.23	–	–	–	–	–	–	100.8
1030/4	96.08	1.98	1.09	–	–	–	–	–	99.15
1030/4	97.32	1.77	0.47	–	–	0.53	–	–	100.09
1030/4	94.96	1.24	–	1.31	–	–	0.28	–	97.79
1030/4	96.97	1.03	0.12	0.95	–	–	–	–	99.07
1030/4	95.05	0.89	–	2.52	–	–	2.1	–	100.56
Troilite									
1030/1	60.35	–	–	1.47	–	1.31	0.57	34.76	98.46
1030/4	59.72	–	–	1.4	–	0.53	–	36.36	98.01
1030/1	60.31	–	–	1.33	–	0.46	0.81	36.67	99.58
1030/4	61.17	–	–	1.12	–	–	–	36.31	98.6
Pyrite									
1030	48.37	–	–	2.71	0.28	1.22	1.64	44.33	98.55
1030	47.79	–	–	0.83	–	0.79	–	47.23	96.64
1030	49.52	–	–	0.69	–	1.61	–	47.49	99.31

ther evolution leads to the separation of native iron and the transition of lavas to the calc-alkaline trend (Fig. 13, B).

REE element data is reported in table 1. The Σ REE is low variable, ranging from 225.54 ppm to 329.43 ppm in red tuffs, from 235.29 ppm to 309.3

ppm in dacites, from 453.69 ppm to 462.77 ppm in andesites, 172.36 in pyroxenite and 102.12 in magnetite lava. Europium anomaly Eu/Eu^* is ranging from 0.2 to 0.24 in red tuffs, from 0.2 to 0.25 in dacites, from 0.2 to 0.24 in andesites, 0.18 in pyroxenite and 0.26 in magnetite lava. Rare-earth geo-

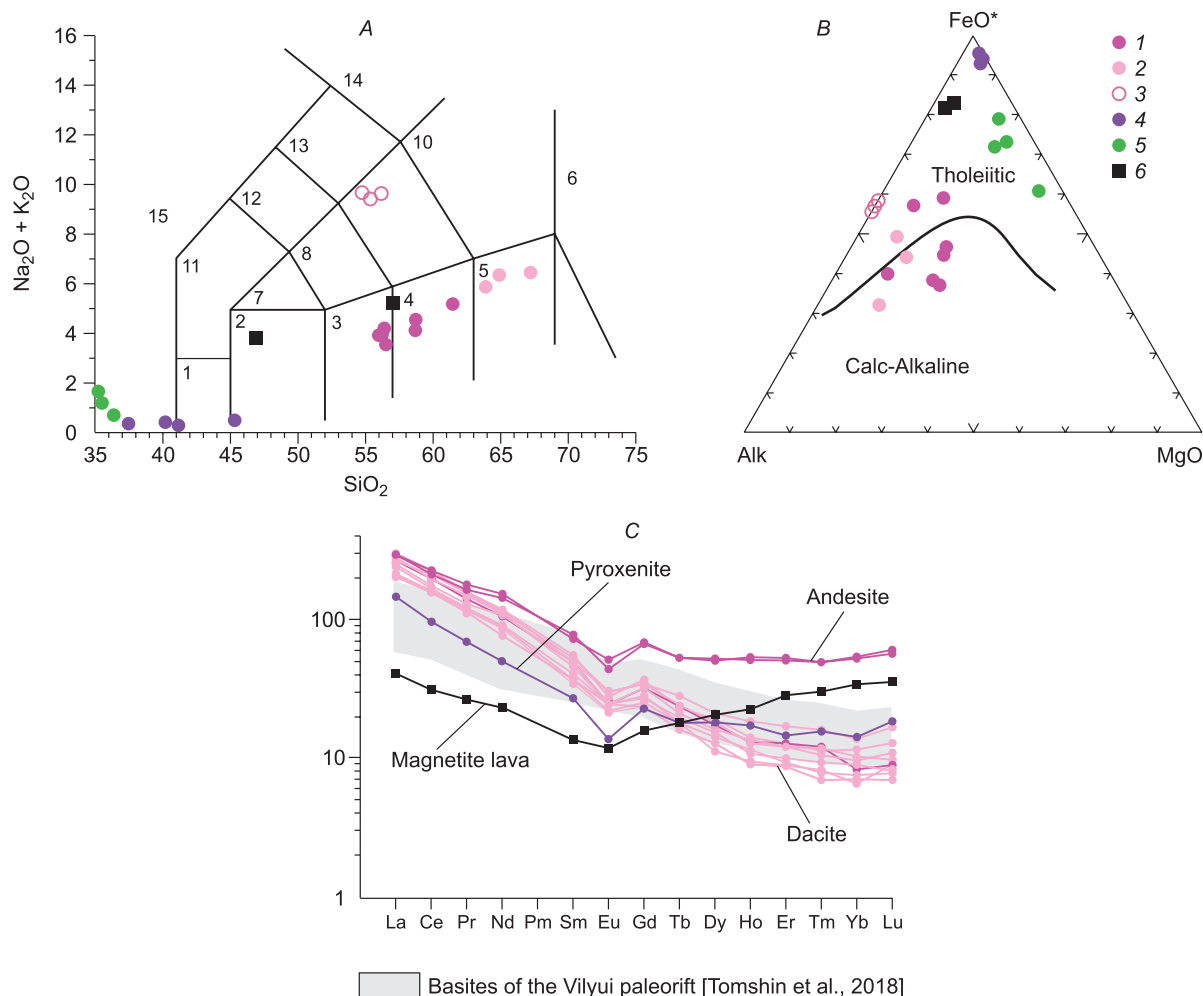


Fig. 13. Variation diagrams for the Kildyam volcanic rocks associated with iron-rich mineralization:

A – SiO₂ – K₂O+Na₂O TAS diagram after LeBas et al. [31] showing the trend defined by the composition of Kildyam volcanic rocks. Areas on the graph: 1 – Picrobasalt, 2 – Basalt, 3 – Basaltic andesite, 4 – Andesite, 5 – Dacite, 6 – Rhyolite, 7 – Trachybasalt, 8 – Basaltic trachyandesite, 9 – Trachyandesite, 10 – Trachyte-trachydacite, 11 – Tephrite Basanite, 12 – Phonotephrite, 13 – Tephriphonolite, 14 – Phonolite, 15 – Foidite. B – AFM-diagram after Irvine and Baragar [32] for the Kildyam volcanic rocks, showing the relative proportions of the oxides Na₂O + K₂O (Alk), FeO + Fe₂O₃ (FeO*) and MgO. C – Chondrite normalized REE diagram for the Kildyam volcanic rocks after Sun and McDonough [33]. Legend for volcanic rocks: 1 – dacite bulk, 2 – andesite bulk, 3 – andesitic matrix with native iron globules, 4 – pyroxenite, 5 – melilitite matrix in magnetite lava, 6 – magnetite lava.

chemical system of the Kildyam volcanic rocks is characterized by behavior close to the CHARAC (CHARGE-and-RADIUS-Controlled)-system ($26 < \text{Zr}/\text{Hf} < 46$ и $24 < \text{Y}/\text{Ho} < 34$) where H/Ho – Zr/Hf ratios of the pair show the distribution close to chondrite ($\text{Zr}/\text{Hf} = 36.6$ and $\text{Y}/\text{Ho} = 27.7$) [34]. The distribution of Zr/Hf ratio in red tuffs differs from 18.59 to 23.87 and Y/Ho – from 25.38 to 28.48. The distribution of Zr/Hf ratio in dacites differs from 18.71 to 26.04 and Y/Ho – from 22.98 to 27.83. The distribution Zr/Hf ratio in andesites of differs from 31.22 to 31.62 and Y/Ho – from 34.14 to 35.61. The distribu-

tion of Zr/Hf ratio in pyroxenite is 30.24 and Y/Ho – 28.25. The distribution of Zr/Hf ratio in andesites differs from 31.22 to 31.62 and Y/Ho – from 34.14 to 35.61. The distribution of Zr/Hf ratio in pyroxenite is 70.27 and Y/Ho – 26.91.

Chondrite normalized REE diagram for the Kildyam volcanic rocks (Fig. 13, C) with included data after M.D. Tomshin et al., [35] for the basites of Vilyui paleorift (see Fig. 1) showing similar REE geochemistry. This may indicate the unified nature of the source of Kildyama lavas and basitic magma.

Table 6

**Microprobe analysis
of ore minerals in pyroxenites, %**

Fe	S	Au	Ag	Pt	Total
Troilite					
63.28	36.14	1.54	–	–	100.96
61.61	36.27	0.48	–	0.85	99.21
61.39	36.58	–	–	1.28	99.25
60.68	36.45	–	–	0.52	97.65
60.26	38.01	1.23	–	1.32	100.82
60.2	37.68	–	–	1.23	99.11
60.08	36.85	1.74	–	1.57	100.24
58.66	38.51	1.07	0.15	2.04	100.43
58.54	36.81	3.15	1.68	0.73	100.91
58.48	37.09	0.38	–	0.97	96.92
Pyrite					
48.12	48.03	0.21	–	2.16	98.52
47.52	48.47	–	0.31	0.88	97.18
46.65	51.56	–	–	1.56	99.77
46.1	49.57	0.97	–	0.57	97.21
45.85	52.38	2.25	–	–	100.48
45.69	47.88	–	–	2.88	96.45
44.9	50.61	0.51	–	1.87	97.89
44.73	50.05	–	1.18	1.1	97.06
44.55	52.45	0.86	–	1.52	99.38

In addition to magnetite variolitic andesites and pyroxenites are saturated Fe-minerals, the main ones are native iron, troilite and pyrite. According to microprobe analysis (Table 5 and Table 6) minerals contain impurities of Co, Ni, Pt, Ir, Au and Ag. Ag-bearing tetrahedrite (Table 7) inclusions detected in magnetite lava that fill the vesicles together with cristobalite.

Conclusions

Kildyam iron oxide deposit has been interpreted as lava flows and feeder dykes formed from iron-rich pyroxenite magma as a result of liquid immiscibility. Associated with andesitic lavas mineralization occur as massive, tabular bodies, stratified, pyroclastic ores. Our research confirmed that tholeiitic trend of iron-rich pyroxenites evolves towards two immiscible liquids – magnetite lava and melilitite matrix. Further evolution leads to the separation of native iron and the transition of lavas to the calc-alkaline trend. Petrographic and microprobe studies confirmed the liquid immiscibility in silicate melt during crystallization. Immiscible liquids are preserved as globules of one glass in another in andesites and as melt inclusions of native iron in matrix, clinopyroxene and plagioclase phenocryst.

Immiscibility of iron- and silica-rich melts during andesitic volcanism led to the formation of ex-

Table 7

Microprobe analysis of Ag-bearing tetrahedrite in vesicles from magnetite lava, %

Sample	Cu	Ag	Fe	Zn	Sb	As	S	Total
1064-1	31.69	7.16	5.23	5.55	25.28	2.16	23.89	100.96
1064-1	31.71	6.1	5.72	4.07	25.96	2.39	23.41	99.36
1064-1	31.71	6.19	5.08	5.82	24.72	1.74	24.45	99.71
1064-1	32.31	6.06	5.64	5.33	24.27	2.14	23.84	99.59
1064-1	31.59	7.06	5.87	5.92	24.78	1.26	23.93	100.41
1064-1	31.33	6.35	6.44	4.48	22.75	2.2	24.71	98.26
1064-1	32.48	6.6	5.37	5.77	24.43	1.95	24.04	100.64
1064-1	32.26	6.33	6.07	5.17	24.37	1.48	24.87	100.55
1064-1	33.76	6.53	5.73	4.04	24.56	2.28	24.02	100.92
1064-1	30.29	8.38	5.54	5.04	24.5	2.65	24.48	100.88
1064-1	31.58	5.73	5.03	4.07	25.34	1.44	24.11	97.3
1064-1	32.13	5.56	4.51	5.4	27.74	1.49	23.39	100.22
1064-1	32.79	5.71	5.28	5.97	26.17	1.46	22.01	99.39
1064-1	30.6	5.55	7.06	5.49	27.51	1.54	23.07	100.82
1064-1	32.1	5.47	4.73	5.94	29.27	1.81	21.32	100.64
1064-1	33.36	4.54	4.12	6.06	26.61	1.97	23.46	100.12
1064-1	32.37	5.72	5.41	3.56	25.78	1.43	24.77	99.04

otic varieties of magnetite-rich volcanic rocks. They have a lot of common features with the Kiruna type Pliocene El Laco volcano hosted iron oxide deposit. The good news for the project's economics is the proximity of the discovered iron-oxide ores in Mesozoic andesite-dacite lava flows to the city of Yakutsk.

This is only a beginning and there is lots of work to do. Further research should be associated with a detailed study of satellite imagery and characterization of the alteration of volcanic facies at regional to deposit scale, prospecting and mineralogy of associated Au, Ag, Cu, Fe, and REE ores.

References

1. *Kepezhinskas V.V., Luchitsky I.V.* Continental volcanic associations of Central Mongolia. 1974.
2. *Maslov V.K.* Gold in Jurassic deposits of the Vilyui syncline // *Geology and geophysics*. 1995. Vol. 36(1).
3. *Kostin A.V., Grinenko V.S., Oleinikov O.B., Jelonkina M.S., Krivoschapkin I.I., Vasiljeva A.E.* The first data about the manifestation of the Upper Cretaceous volcanism of transition zone «Siberian platform – Verkhoyansk-Kolyma folded area» // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2015. Vol. 1(77). P. 30–36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23457540>
4. *Kostin A.V., Trunilina V.A.* Volcanogenic creations of Kangelassky terrace (left bank of the Lena river. Central Yakutia) // *Advances in Current Natural Sciences*. 2018. Vol. 5. P. 92–100. <https://doi.org/10.17513/use.36761>
5. *Goldbraikh G.I., Todorovskaya V.N.* On the discovery of tufogenic rocks in the Lower Cretaceous sediments of the river basin. Sitte // *Geology and oil and gas potential of Western Yakutia*. Leningrad: Proceedings VNIGRI. 1966. Is. 249. P. 182–185.
6. *Kossovskaya A.G., Shutov V.D., Muravyov V.P.* Mesozoic and Upper Paleozoic sediments of the Western Verkhoyansk and Vilyui depression // *Transactions of Geol. Institute of Academy of Sciences of the USSR*. 1960. Vol. 34. 276 p.
7. *Kostin A.V.* A new geological feature of volcanic origin in the Lena-Vilyui watershed (East of Siberian platform) // *Advances in Current Natural Sciences*. 2017. Vol. 2. P. 100–105. <https://doi.org/10.18411/a-2017-049>
8. *Frietsch R.* On the magmatic origin of iron ores of the Kiruna type // *Economic Geology*. 1978. Vol. 73(4). P. 478–485. <http://doi.org/10.2113/gsecongeo.73.4.478>
9. *Hitzman M.W., Oreskes N. and Einaudi M.T.* Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu–U–Au–REE) deposits // *Precambrian Research*. 1992. Vol. 58. P. 241–287. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90121-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90121-4)
10. *Hou T., Charlier B., Namur O., Schütte P., Schwarz-Schampera U., Zhang Z., Holtz F.* Experimental study of liquid immiscibility in the Kiruna-type Vergenoeg iron–fluorine deposit. South Africa // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. Vol. 203. P. 303–322. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.01.025>
11. *Philpotts A.R.* Liquid immiscibility in silicate melt inclusions in plagioclase phenocrysts // *Bulletin de Minéralogie*. 1981. Vol. 104. P. 317–324.
12. *Philpotts A.R.* Compositions of immiscible liquids in volcanic rocks // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1982. Vol. 80. P. 201–218.
13. *Tornos F., Velasco F., Hanchar J.M.* Iron-rich melts, magmatic magnetite, and superheated hydrothermal systems: The El Laco deposit. Chile // *Geology*. 2016. Vol. 44. P. 427–430. <https://doi.org/10.1130/G37705.1>
14. *Parfenov L.M., Prokopiev A.V., Gaiduk V.V.* Cretaceous frontal thrusts of the Verkhoyansk fold belt, eastern Siberia // *Tectonics*. 1995. Vol. 14(2). P. 342–358.
15. *Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Eds.)* Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia) Territory. Moscow, MAIK Nauka/Interperiodika: Russia. 2001. 571 p. ISBN 5-7846-0046-X. <https://elibrary.ru/item.asp?id=22399198>
16. *Grinenko V.S., Kamaletdinov V.A., Shcherbakova O.I.* Section correlation scheme // *Geological map of Yakutia on a scale of 1: 500.000*. Central Yakutsk block. Sheet P-51-A. B. SPb.: St. Petersburg Card Factory, VSEGEI. 2000.
17. *Grinenko V.S.* Cretaceous continental formations of the east of the Siberian platform // *Otechestvennaya Geologiya*. 2007. Vol. 1. P. 110–118.
18. *Grinenko V.S., Knyazev V.G.* New data on stratigraphy and zoning of Jurassic deposits of the western periphery of the Verkhoyansk-Kolyma folded region // *Bulletin of the State Committee for Geology. Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia)*. 2010. Vol. 1 (9). P. 26–38.
19. *Smelov A.P., Andreev A.P., Altukhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenev K.A., Zaitsev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Oleinikov O.B., and Surnin A.A.* Kimberlites of the Manchary pipe: a new kimberlite field in Central Yakutia // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. Vol. 51(1). P. 153–159.
20. *Polyansky O.P., Prokopiev A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Babichev A.V., Sverdlova V.G., Vasiliev D.A.* The nature of the heat source of mafic magmatism during the formation of the Vilyui rift based on the ages of dike swarms and results of numerical modeling // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. Vol. 59. P. 1217–1236. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.003>
21. *Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P., Grinenko V.S., Kostin A.V., Malkovets V.G., Oleinikov O.B.* Kimberlitic magmatism in the south-western flank of the Vilui basin // *RAS reports. Earth sciences*. 2020. Vol. 490(2). P. 5–9. <http://dx.doi.org/10.7868/S2686739720020036>
22. *Smelov A.P., Surnin A.A.* Gold of the city of Yakutsk // *Science First Hand*. 2010. Vol. 4(34). P. 16–19.

23. Grinenko V.S., Kostin A.V., Kirichkova A.I., Zhe-lonkina M.S. Boundary Upper Jurassic-Lower Cretaceous rocks in the eastern Siberian craton: New data // Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser.: Geologiya. 2018. Vol. 2. P. 48–55. <https://doi.org/10.18411/vgu-sg-2018-2-48-55>
24. Silber A., Bar-Yosef B., Singer A., Chen Y. Mineralogical and chemical composition of three tuffs from northern Israel // Geoderma. 1994. Vol. 63(2). P. 123–144. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90002-7)
25. Stück H., Forgó L.Z., Rüdrieh J., Siegesmund S., Török A. The behaviour of consolidated volcanic tuffs: weathering mechanisms under simulated laboratory conditions // Environmental geology. 2008. Vol. 56(3-4). P. 699–713. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1337-6>
26. Horwell C.J., Williamson B.J., Llewellyn E.W., Damby D.E., Le Blond J.S. The nature and formation of cristobalite at the Soufrière Hills volcano. Montserrat: implications for the petrology and stability of silicic lava domes // Bulletin of Volcanology. 2013. Vol. 75(3). 696 p. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0696-3>
27. Reich M., Zúñiga A., Amigo Á., Vargas G., Morata D., Palacios C., Parada A.M., Garreaud R.D. Formation of cristobalite nanofibers during explosive volcanic eruptions // Geology. 2009. Vol. 37(5). P. 435–438. <https://doi.org/10.1130/G25457A.1>
28. Schipper C.I., Castro J.M., Tuffen H., Wadsworth F.B., Chappell D., Pantoja A.E., Simpson M.P., Le Ru E.C. Cristobalite in the 2011–2012 Cordón Caulle eruption (Chile) // Bulletin of Volcanology. 2015. Vol. 77(5). P. 5–34. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0925-z>
29. Kostin A.V., Trunilina V.A., Grinenko V.S. Geological model of the Tyugeninsky field of volcanic rocks (east of the Siberian platform) // Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the VII All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Noble Metals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. April 5–7 2017: in 2 volumes. Yakutsk: SVFU Publishing House. 2017. V. 2. P. 154–160. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30628694>
30. Chin E.J., Shimizu K., Bybee G.M., Erdman M.E. On the development of the calc-alkaline and tholeiitic magma series: A deep crustal cumulate perspective // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 482. P. 277–287. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.016>
31. LeBas M.J., LeMaitre R.W., Streckeisen A. and Zanettin B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram // J. Petrol. 1986. Vol. 27. P. 745–750.
32. Irvine T.N., Baragar W.R. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Canadian Journal of Earth Sciences. 1971. Vol. 8. P. 523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
33. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. London. Special Publications. 1989. Vol. 42(1). P. 313–345.
34. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contributions to Mineralogy and Petrology 1996. Vol. 123(3). P. 323–333. <https://doi.org/10.1007/s004100050159>
35. Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Basites of the Vilyui paleorift: geochemistry and sequence of intrusive formation // Russian Geology and Geophysics. 2018. Vol. 59(10). P. 1204–1216. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.09.002>

Received 26.02.2020

Accepted 18.05.2020

About the authors

KOSTIN Aleksey Valentinovich, doctor of geological and mineralogical sciences, head of laboratory, Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk, 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-5778-6505>, a.v.kostin2006@rambler.ru

Citation

Kostin A.V. Immiscible silica- and iron-rich melts at the Kildyam volcano complex (central Yakutia, Russia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, N 2. P. 27–46. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-2>

Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Накынское кимберлитовое поле, Западная Якутия, Россия)

Д.В. Коногорова^{1,2,*}, О.Е. Ковальчук¹, Л.Д. Бардухинов¹

¹НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*KonogorovaDV@alrosa.ru

Аннотация. Впервые в мире обнаружен уникальный алмаз, внутри которого, в полости, свободно перемещается алмаз меньшего размера. Кристаллы детально изучены методом рентгеновской микротомографии, что позволило построить их трехмерные модели, детально установить морфологические особенности как алмаза-хозяина, так и алмаза-узника, а также определить вес каждого из них. На диаметрально противоположных поверхностях алмаза-хозяина имеются два сквозных канала, которые ведут в полость, внутри которой находится алмаз-узел. В каналах содержится барит, причем один из каналов герметично закупорен этим минералом. На входе в полость оба канала сужаются и имеют диаметр около 0,1 мм. Морфология внутренних стенок полости приблизительно соответствует морфологии поверхности внутреннего алмаза. Согласно результатам инфракрасной спектроскопии, алмаз имеет высокое содержание структурной примеси азота 1 250 at. Ррт. С помощью рамановской конфокальной спектроскопии проведено интегральное объемное картирование, в результате которого послойно реконструировано внутреннее строение алмаза. При исследовании люминесценции с помощью лазера с длиной волны возбуждения 337 нм установлено, что оба алмаза имеют однородное розово-сиреневое свечение.

Ключевые слова: Алмаз, Накынское поле, трубка Нюрбинская, инфракрасная спектроскопия, кимберлит, матрешка, зеленый алмаз, включение алмаза, рентгеновская микротомография.

Благодарности. Авторы благодарят за обсуждение полученных материалов и помощь в написании статьи сотрудников НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) – Мальковца Владимира Григорьевича, Богуш Ирину Николаевну, Кедрову Татьяну Владимировну, Баранова Леонида Николаевича, Шишмарева Романа Алексеевича, Зайцевского Федора Константиновича, а также сотрудников МГУ им. М.В. Ломоносова – Гаранина Виктора Константиновича и Криулину Галину Юрьевну.

Введение

Уникальный полый алмаз, в котором свободно перемещается алмаз меньшего размера (рис. 1) был найден в Якутии в середине августа 2019 г. Данная находка является первым зафиксированным случаем в мировой истории алмазодобычи. Из-за сходства особенностей внутреннего строения с детской игрушкой алмаз получил название «матрешка». Внешний алмаз – алмаз-хозяин с зеленым нацветом имеет вес 0,62 кар. Внутренний алмаз – алмаз-узел бледно-желтого цвета и, по расчетам, имеет вес 0,02 кар. Оба алмаза имеют октаэдрический габитус.

Исследованием «алмаза-матрешки» занимались сотрудники НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) и сотрудники Геммологического института Америки (GIA). Гипотезы о его происхождении выд-

вигали выдающиеся ученые, такие как Майк Форстер (научный сотрудник экспериментальной петрологии, Университет Маккуори, Австралия), Уи Ван (вице-президент по исследованиям и развитию GIA, США), Томас Стэйчел (минералог Университета Альберты, Канада) и другие. О нем писали в средствах массовой информации.

Похожий случай был описан в работе В.К. Гаранина [1]. В трубке Мир был найден алмаз с полостью, в которой внутренний и внешний алмаз частично отделены друг от друга полостью, выполненной хромитом (рис. 2). В этом случае алмаз не перемещается свободно в полости, а зафиксирован в ней хромитом.

«Алмаз-матрешка» был добыт компанией «АЛРОСА» на обогатительной фабрике № 16

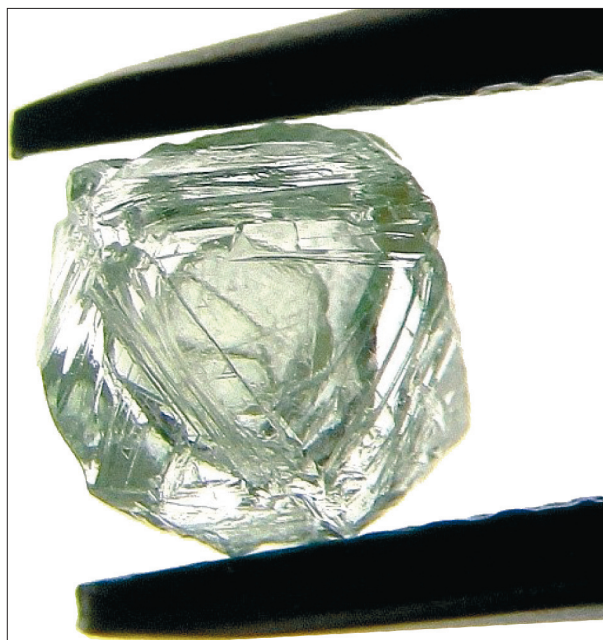


Рис. 1. Фотография «алмаза-матрешки».

Fig. 1. General view of the diamond-matryoshka.

при обогащении руды трубки Нюрбинская, которая расположена в Накынском кимберлитовом поле. Разработкой этого месторождения занимается Нюрбинский горно-обогатительный комбинат «АЛРОСА». Фабрика № 16 является одной из самых современных в мировой алмазодобывающей промышленности по уровню примененных технологий и автоматизации процессов.

В кимберлитовой трубке Нюрбинская преобладают алмазы I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [2], однако, особенность трубок Накынского поля – высокое содержание алмазов IV разновидности, которые являются алмазами в оболочке (до 9 % в трубке Нюрбинская). По формам преобладают алмазы переходной формы октаэдр–ромбододекаэдр (34 %), реже встречаются октаэдры (28 %) и ромбододекаэдры (19 %) [3]. Среди кристаллов I разновидности [2] доля окрашенных алмазов составляет примерно 27 %, наиболее распространена лилово-коричневая (10 %) и дымчато-коричневая (2,2 %) окраска, реже кристаллы имеют однородную соломенно-желтую, зеленую, серую и черную окраску. Среди других разновидностей алмазов наиболее распространена желтая и желто-зеленая до грязно-зеленой окраска, характерная для алмазов IV разновидности [4].

Характерной особенностью алмазов из трубок Накынского поля является высокое содержа-

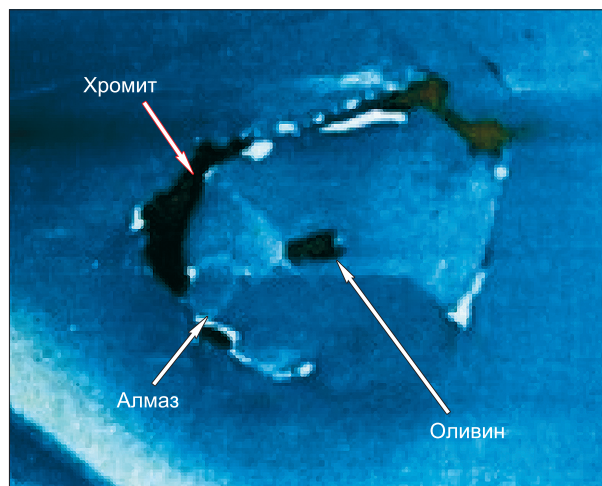


Рис. 2. Алмаз с полостью, заполненной черным хромитом и кристаллом алмаза с включением оливина [1].

Fig. 2. Diamond with a cavity filled with black chromite and a diamond crystal with olivine [1].

ние кристаллов с признаками природного травления, среди которых наиболее распространены шрамы (19,4 %), коррозия (7,5), каверны (2,9), полосы пластической деформации (2,3), матировка (1,9), треугольные впадины (1,8) [4].

Среди сингенетических включений в алмазах трубки Нюрбинская преобладают минералы эклогитового парагенезиса. Около половины кристаллов (46 %) имеют включения графита или графита в ассоциации с сульфидами. Отметим, что включение «алмаз в алмазе» не является типичным для кристаллов данной трубки [3].

Методы исследования

Исследование проводилось в Научно-исследовательском геологическом предприятии АК «АЛРОСА» (ПАО). Минералогическое описание алмаза выполнено под биноклями Leica Wild M420. Фотографирование алмаза проводилось с помощью биноклярного микроскопа Leica M205 с высокочувствительной цифровой видеокамерой Leica DFC 495 под управлением фирменного ПО LAS (Version 4.1.0 (Build 1264)). Для возбуждения фотолюминесценции при характеристике цвета свечения использован лазер АИЛ-3 с длиной волны 337 нм.

Изучение включений в алмазах проводилось на конфокальном рамановском микроскопе InVia фирмы RENISHAW, оснащенном программным пакетом Wire 3. Возбуждение колебаний решетки осуществлялось с помощью лазерного излучения с длиной волны 532 нм, при этом были

выбраны дифракционная решетка 1 200 1/мм и CCD-детектор. Рамановский спектрометр имеет разрешение 1–2 см⁻¹. Идентификация минеральных сингенетических включений в алмазах осуществлялась с использованием библиотеки рамановских спектров RENISHAW и программного обеспечения под названием CrystalSleuth.

Съемка спектров фотолюминесценции кристаллов алмазов выполнена с использованием возможностей КР-микроскопа InVia. Все спектры были сняты при температуре жидкого азота (77 K). Источник возбуждения – лазер КР-микроскопа, λ 325 нм, мощность 20 мВт.

Регистрация спектров ИК-поглощения в волновом диапазоне 600–4 500 см⁻¹ проводилась методом двухмерного картирования по всей площади алмаза (сетка до 2 500 точек) с шагом 50 мкм и с разрешением 2–4 см⁻¹ на Фурье-спектрометре Tensor-27 фирмы Bruker с микроскопом Hyperion 3000. В качестве внутреннего стандарта было принято собственное поглощение алмаза [5]. Концентрации дефектов пересчитывались в соответствии с работами [6–8].

Проведена съемка на рентгеновском микро-томографе SkyScan 1272. Реконструкция полученных изображений выполнялась программой Nrecon. Для обработки и анализа 3D-изображений использовалась программа CTAnalyser.

Образец и результаты исследования

Минералогическое описание. Алмаз представляет собой сложный двойник по шпинелевому закону переходной формы октаэдр–додекаэдронид со ступенчато-пластинчатым характером развития граней и расщеплением вершин (рис. 3). Максимальные размеры внешнего алмаза – алмаза-хозяина составляют 4,8×4,9×2,8 мм. На поверхности алмаза-хозяина преобладает сноподобная штриховка. На ребре, в зоне контакта двух крупных сдвойникованных индивидов, присутствует небольшой клиновидный двойниковый росток в виде пластины.

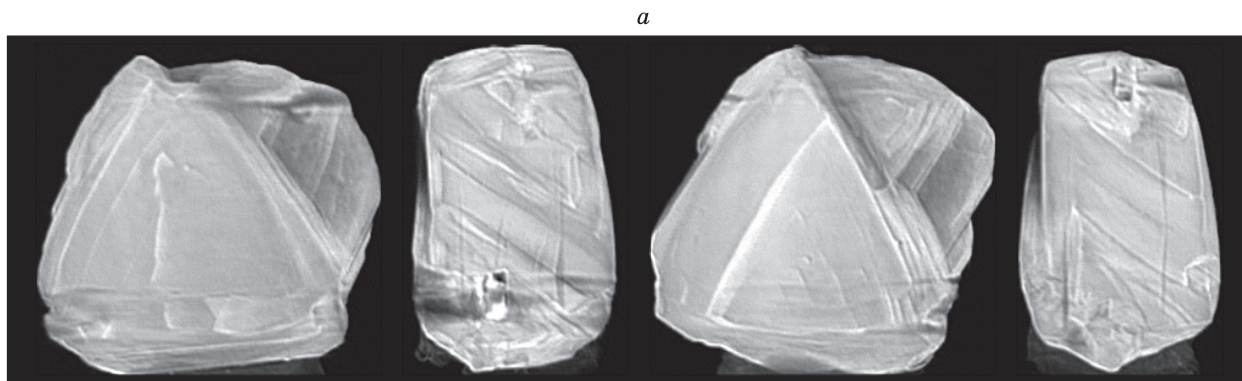
На поверхности алмаза-хозяина наблюдаются скульптуры травления в виде треугольных впадин, а также узкие и глубокие каналы травления, два из которых проникают в полость алмаза (рис. 4).

По результатам рентгеновской микро-томографии установлено, что объем внутренней полости составляет 6 мм³. Полость представляет со-



Рис. 3. Алмаз-хозяин: *a* – Внешний вид кристалла с четырех сторон. Реконструкция в виде 3D-изображения, полученная на рентгеновском микро-томографе SkyScan 1272; *б* – Фотография алмаза-матрешки, демонстрирующая цвет и внешний вид алмаза-хозяина. Фотография получена с помощью бинокулярного микроскопа Leica M 205.

Fig. 3. The diamond-owner: *a* – Reconstruction in the form of a 3D image of a diamond-matryoshka, illustrating the appearance of the crystal from four sides. The image was obtained on an X-ray microtomograph SkyScan 1272; *b* – Photo of a diamond-matryoshka illustrating the color and appearance of the diamond-owner. Photo taken with a Leica M 205 binocular microscope.



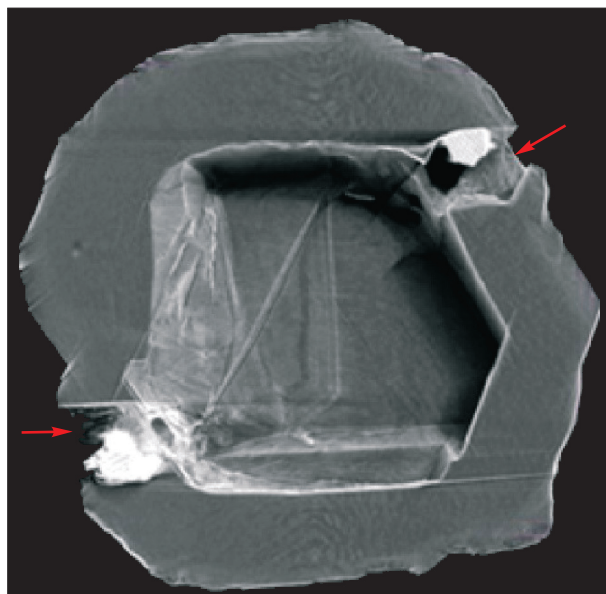


Рис. 4. Внутренняя полость алмаза-хозяина, красными стрелками указаны два сквозных канала. Реконструкция в виде 3D-изображения, полученная на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272.

Fig. 4. Reconstruction in the form of a 3D image of a diamond-matryoshka, illustrating the internal cavity of the diamond-owner. The red arrows indicate two through channels of etching. The image was obtained using the SkyScan 1272 X-ray microtomograph.

бой уплощенную камеру высотой и шириной около 3 мм, глубиной около 0,7–1,2 мм (рис. 4). Каналы травления расположены субперпендикулярно к граням. Оба канала имеют максимальный диаметр 0,4 мм.

Один из сквозных каналов травления кристалла практически полностью заполнен баритом, который является вторичным минералом по отношению к алмазу. Во втором канале барит находится в виде примазки на стенке канала. Диаметр канала, выходящего на поверхность, с малым объемом примеси минерального вещества равен 0,2 мм, а диаметр канала, заполненного минеральным веществом, – 0,3 мм. На выходе в полость оба канала имеют диаметр около 0,1 мм.

Алмаз-узник по морфологии схож с алмазом-хозяином, он является сильно уплощенным шпинелевым двойником, неравномерно развитые октаэдры со смещением по оси двойникования, элементами полицентрического строения широких граней и параллельной штриховкой. Его размер 1,9×2,1 мм, толщина 0,5–0,6 мм. На поверхности алмаза развиты признаки травления в виде отрицательных треугольных фигур (рис. 5).

На поверхности более крупного субиндивида алмаза-узника наблюдается отпечаток, частично совпадающий с отпечатком на поверхности полости алмаза-хозяина. Поверхность отпечатка не является обычной ростовой поверхностью, и подобные плоскости не являются характерными для классических поверхностей растворения (рис. 6). По своему строению данная поверхность имеет наибольшее сходство с индукционной штриховкой, характерной для совместного роста кристаллов.

В алмазе-хозяине и алмазе-узнике присутствуют черные включения графита в ассоциации с сульфидом. Также зафиксировано две цепочки

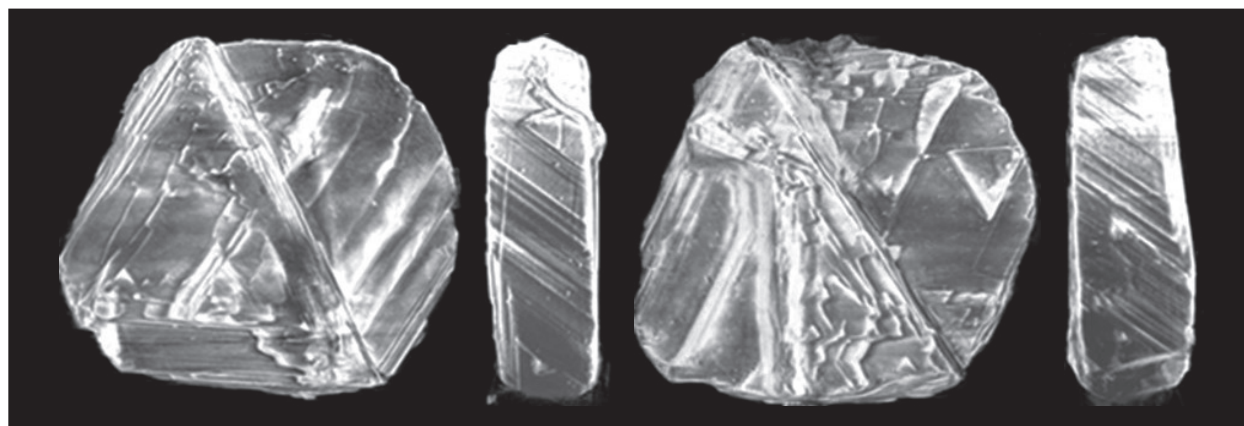


Рис. 5. Изображение поверхности алмаза-узника. Реконструкция в виде 3D-изображения, полученная на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272.

Fig. 5. Reconstruction in the form of a 3D image of a diamond-matryoshka, illustrating the morphology of the surface of the prisoner diamond-inmate. The image was obtained using the SkyScan 1272 X-ray microtomograph.

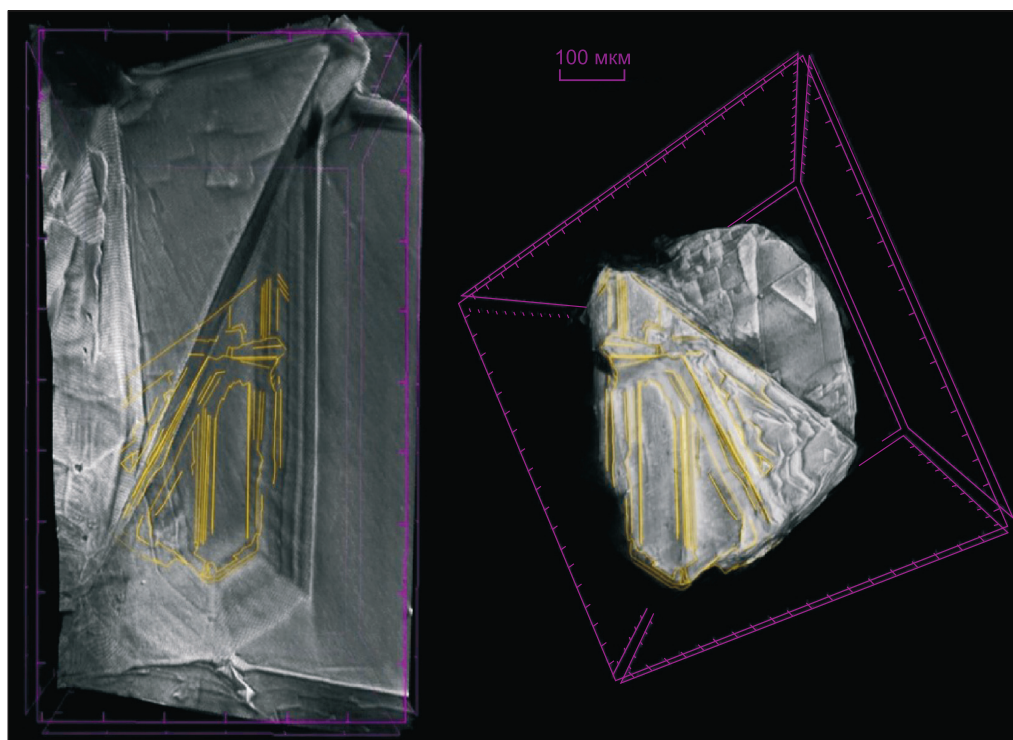


Рис. 6. Отпечаток, расположенный на поверхности полости алмаза-хозяина, частично совпадающий с морфологией поверхности алмаза-узника. Реконструкция в виде 3D-изображения, полученная на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272.

Fig. 6. Reconstruction in the form of a 3D image of a diamond-matryoshka, illustrating an imprint located on the surface of the diamond-owner cavity that coincides with the morphology of the prisoner diamond surface. The image was obtained using the SkyScan 1272 X-ray microtomograph.

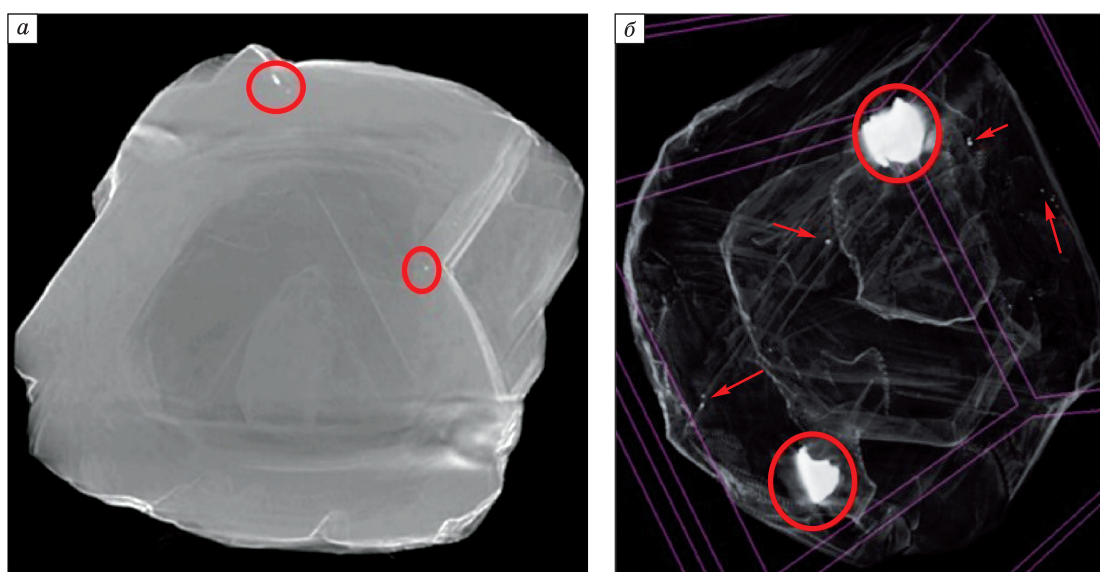


Рис. 7. Включения в алмазе: *а* – на изображении красным кругом обведены включения сульфида; *б* – изображение с увеличенной прозрачностью, красные стрелки указывают на сульфидные включения, кругами обведены включения барита. Реконструкция в виде 3D-изображения, полученная на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272.

Fig. 7. Inclusions in diamond: *a* – on the image of the red circle with the addition of sulfide; *b* – the image of the diamond-matryoshka with reduced transparency, red arrows on the sulfide inclusions, circles circled by the inclusion of barite. Reconstruction in the form of a 3D image obtained on a SkyScan 1272 X-ray microtomograph.



Рис. 8. Фотография алмаза-матрешки, демонстрирующая зеленый цвет алмаза-хозяина. Фотография получена с помощью бинокулярного микроскопа Leica M205.

Fig. 8. Photo of a diamond-matryoshka illustrating the green color of the diamond-owner. The photo was taken using the Leica M205 binocular microscope.

включений сульфида, которые расположены в зоне двойникового шва, в периферийной части самого крупного октаэдра. Включения имеют относительно повышенную рентгеновскую плотность. Размер включений составляет сотые доли миллиметра, длина цепочки 0,1–0,4 мм. Одна из цепочек находится в видимой трещине, выходящей на поверхность (рис. 7). Алмаз-узник также имеет включения с повышенной рентгеновской плотностью, которые находятся в его центральной части.

Зеленая окраска алмаза может быть связана с природным облучением, в результате которого на поверхности кристаллов формируется тонкий прозрачный слой зеленого цвета. Многие авторы [5, 9, 10] объясняют зеленую окраску алмазов наличием в структуре кристалла GR1-дефекта, который является одиночной вакансией.

Алмаз-узник имеет слабый желтый оттенок. Желтая окраска алмаза связана с наличием примеси азота в структуре кристалла в виде N3-дефекта [5].

Фотолюминесценция. На спектре фотолюминесценции алмаза отчетливо фиксируется N3-дефект (415 нм) (рис. 9). Этот дефект, представляющий собой три атома азота и вакансию, характерен для большинства природных алмазов. Бесформенное плечо справа от N3-дефекта пред-

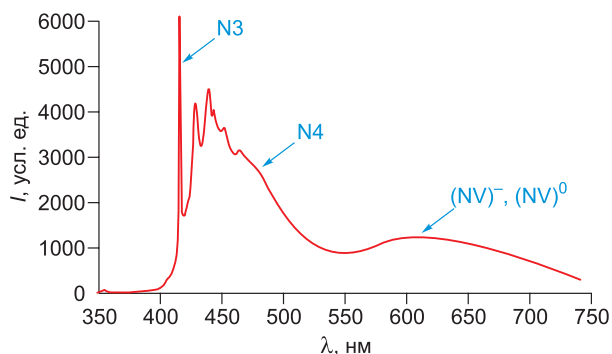


Рис. 9. Спектр фотолюминесценции алмаза-матрешки.

Fig. 9. The photoluminescence spectrum of the diamond-matryoshka.

положительно является N3(N4)-дефектом, которые представляют собой азотно-вакансионные дефекты и образуются в результате посткристаллического отжига [5]. Бесформенная полоса с размытым максимумом около 610 нм, предположительно является (NV)⁰- и (NV)⁻-дефектами [5].

При исследовании люминесценции алмаза с помощью лазера, с длиной волны 337 нм, у алмаза установлено однородное розово-сиреневое свечение слабой интенсивности (рис. 10). Данное свечение связывают с наличием (NV)⁰- и (NV)⁻-дефектов в структуре кристалла [5].

Инфракрасная спектроскопия. Методом инфракрасной спектроскопии (ИКС) было проведено интегральное картирование. В результате установлено, что «алмаз-матрешка» имеет высокое содержание структурной примеси азота 1 250 at. Ppm, при локально измеренных максимальных значениях – 1 820 at. Ppm и минимальных – 589 at. Ppm (см. таблицу).

Алмаз имеет зональное строение, суммарное содержание структурной примеси азота увеличивается от периферии к центру, что характерно для большинства природных алмазов [11]. Наибольшие концентрации азота сосредоточены в области нахождения алмаза-узника. Это говорит о том, что алмаз-узник имеет более высокое содержание структурной примеси азота, чем алмаз-хозяин.

Модальное значение содержания B1-дефекта составляет – 40 %, при максимальном значении 64 % и минимальном 28 %. Повышенное содержание B1-дефекта говорит о длительном нахождении в высокотемпературных условиях [11, 12].

Модальное значение коэффициента поглощения полосы B1 – 1367 см⁻¹, по данным [13–15], невысокие значения этого коэффициента говорят



Рис. 10. Фотография розово-фиолетовой люминесценции алмаза, при воздействии лазером с длиной волны 337 нм.

Fig. 10. Photo of the pink-purple luminescence of a diamond, at a wavelength of 337 nm.

об относительно пониженных температурах формирования кристаллов алмаза.

Содержание структурной примеси водорода низкое, его модальное значение 1 см^{-1} , при максимальном значении 4 см^{-1} и минимальном 0 см^{-1} . Содержание примеси водорода в кристаллах взаимосвязано с механизмом роста. Незначительные количества водородных центров объясняются послойным механизмом роста, проявляющегося в послойно-замкнутом октаэдрическом строении, что наиболее характерно для алмазов из месторождений Якутии [14, 16, 17].

Обсуждение полученных результатов

В результате минералогического описания было установлено:

1. Алмаз-хозяин и алмаз-узел проявляют сходство морфологии.

Алмаз-хозяин и алмаз-узел являются шпинелевыми двойниками октаэдра, но так как ал-

маз был подвержен процессам окислительного растворения, то октаэдрическая форма алмаз-хозяина в результате была изменена до переходной формы октаэдр–додекаэдр.

2. На некоторых стенках полости алмаз-хозяина установлена индукционная штриховка совместного роста. Наличие данной штриховки говорит о ранее существовавшем контакте кристаллов алмаз-хозяина и заключенного в нем алмаз-узника. На стенках полости алмаз-хозяина нигде не отмечено отпечатков другого минерала, отличного от алмаза.

Если бы алмаз-узел был сначала заключен в другой минерал, а потом снова был заключен в алмаз-хозяина, то стенки алмаз-хозяина имели бы форму или отпечатки того минерала, в который был заключен алмаз-узел. Подобный случай был отмечен в трубке Мир: алмаз с включением алмаза отделенного от алмаз-хозяина хромитом. На фото видно неровные границы полости, не характерные для форм кристалла алмаза [1] (см. рис. 2).

3. Алмаз-хозяин и алмаз-узел имеют признаки природного травления. Алмаз-хозяин имеет два канала травления, которые расположены в зоне двойникового шва.

В процессе роста кристалла алмаза в структуре формируются различные ростовые дефекты: дислокационные диполи, дислокации и т. д. [5, 18]. Формированию данных дефектов способствует наличие включений в алмазе, которые деформируют структуру кристалла. В этом случае дислокации распространяются радиально-лучисто в направлении к поверхности кристалла алмаза. Данные дефекты, неоднородности строения, двойниковые плоскости – обуславливают характер растворения и внешний вид кристалла алмаза после процессов акцессорного травления.

Акцессорное травление описано Ю.Л. Орловым [2] и подтверждено экспериментальными исследованиями [19, 21], проявляется локально и формирует различные фигуры травления в

Дефектно-примесный состав «алмаза-матрешки» по результатам ИКС

Defect-impurity composition of the «diamond-matryoshka» according to the results of the ICS

	A, at. Ppm	B, at. Ppm	Ntot, at. Ppm	B1, %	B2, см^{-1}	RzB2, см^{-1}	CH, см^{-1}	Положение CH, см^{-1}
Максимум	1 180	750	1 820	64	26	1 376	4	3 107
Минимум	215	291	589	28	6	1 363	0	3 107
Модальное значение	792	520	1 250	40	18	1 367	2	3 107

местах выхода дислокаций и других дефектов. В процессе травления может происходить вытравливание тонких иглообразных каналов, которые проникают внутрь кристалла. Часто образование таких каналов происходит по плоскости двойникования.

В процессе роста кристалла алмаза выделяют несколько этапов [1, 5] алмазообразования, суть которых заключается в том, что при росте алмаз может попадать в различные условия: могут меняться температурные условия, давление, пересыщение, окислительно-восстановительный потенциал и т. д., вследствие этого в мантийных условиях алмаз может расти, растворяться и снова расти. Это подтверждается наличием у кристаллов алмаза ростовой зональности, которая хорошо видна после распиловки кристалла.

Наличие зон с высокими концентрациями азота в структуре алмаза говорит о значительном его содержании в алмазообразующей среде. Экспериментально установлено [22], что по сравнению с кубическими секторами роста октаэдрические образуются при более высоких температурах и постоянном давлении, при повышении температуры происходит выклинивание кубических секторов роста.

Выводы

Алмаз-хозяин и алмаз-узел образовались приблизительно в одно время, при одинаковых давлениях и температуре из общего мантийного субстрата, об этом свидетельствуют подобная форма и одинаковый дефектно-примесный состав, близкое содержание и распределение примесей азота и водорода, с небольшим увеличением азота в В1-форме в центральной области минерала-узла (это характерно для всех монокристаллов алмаза), однородная люминесценция и наличие N3-, N3-дефектов в обоих кристаллах также подтверждают единую природу этого уникального алмаза.

Повышенное содержание азота в минерале-узле свидетельствует, что сначала сформировался внутренний алмаз, и только потом начался рост алмаза-хозяина. А наличие индукционной штриховки говорит о том, что был контакт кристаллов алмаза-хозяина и заключенного в нем алмаза-узла. В промежуточной стадии роста рост алмаза-узла был заблокирован другим минералом или расплавом, а в области индукционной штриховки начинался рост алмаза-хозяина. После того как образовался алмаз-хозяин, «алмаз-

матрешка» попал в среду, в которой в результате агрессивных мантийных процессов была растворена прослойка и сформировалась пустая полость, в ней свободно перемещается алмаз-узел. Однако не осталось никаких следов, позволяющих судить о присутствии в полости и затем растворенного минерала или флюида, заполнявшего пространство между кристаллами.

На последнем этапе в кимберлитовой трубке присутствовал источник природной радиации, в результате в кристалле образовались азотно-вакансионные дефекты и скорее всего вакансионный дефект GR1, который характерен для алмазов с зеленой окраской. Стоит заметить, что радиационные дефекты также способствуют процессам травления [25].

На наш взгляд «алмаз-матрешка» является самой прекрасной иллюстрацией полигенности и многостадийности образования природного алмаза. А также наглядным объяснением страсти ученых геологов и минералогов к научным исследованиям минералов, ведь в таких уникальных кристаллах скрыто много загадок, разгадывая которые мы приближаемся к пониманию сложных перипетий процессов, сопутствующих образованию природного алмаза. Надеемся, что в ближайшем будущем нас ждет еще много таких приятных сюрпризов.

Авторы планируют продолжить исследование замечательного алмаза и более детально рассказать о генезисе алмаза в следующей статье.

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные замечания и конструктивные предложения, способствовавшие улучшению статьи!

Литература

1. Гаранин В.К. Минералогия кимберлитов и родственных им пород алмазоносных провинций России в связи с их генезисом и поисками. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2006.
2. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 264 с.
3. Костровицкий С.И., Спецрус З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаас Г.С., Суворова Л.Ф., Богущ И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: АЛРОСА, 2015. 480 с.
4. Шаталов В.И., Граханов С.А., Егоров А.Н., Сафьянников Ю.В. Геологическое строение и алмазоносность древних россыпей алмазов Накынского кимберлитового поля якутской алмазоносной провинции // Вестник Воронежского университета. Геология. 2002. № 1.
5. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. 502 p.

6. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 554 с.
7. Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag., B. 1994. Vol. 69. P. 1149–1153.
8. Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Phil. Mag., B. 1995. Vol. 72. P. 351–361.
9. Field J.E. The Properties Natural and Synthetic Diamond. London: Academic Press, 1992.
10. Welbourn C.M., Saito S., Fujimori N., Fukunaga O., Kato M., Kobashi K., Yoshikawa M. In Advances in New Diamond Science and Technology. Tokyo, 1994. 327 p.
11. Васильев Е.А. Планарные оптически-активные центры алмазов как индикаторы условий алмазообразования. Автореф: дисс... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2007. 21 с.
12. Криулина Г.Ю. Конституционные характеристики алмаза из месторождений Архангельской и Якутской алмазоносных провинций: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2012. 24 с.
13. Криулина Г.Ю., Васильев Е.А., Гаранин В.К. Структурные дефекты в алмазах Архангельской и Якутской алмазоносных провинций // Сборник публикаций по результатам III и IV ежегодных научных чтений им. Г.П. Кудрявцевой. М.: Институт прикладной минералогии. 2010. С. 93–103.
14. Блинова Г.К. Структурные примеси как индикаторы механизма роста природных кристаллов алмаза // Докл. АН СССР, 1987. Т. 294, № 4. С. 868–871.
15. Винс В.Г. Оптически активные дефекты в алмазе – закономерности образования и взаимной трансформации. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Барнаул, 2011. 40 с.
16. Винс В.Г., Елисеев А.П. Влияние условий выращивания на спектральные характеристики синтетических алмазов типа Ib // Перспективные материалы. 2009. № 6. С. 36–42.
17. Винс В.Г., Елисеев А.П. Влияние отжига при высоких давлениях и температурах на дефекто-примесную структуру природных алмазов // Перспективные материалы. 2010. № 1. С. 49–58.
18. Бескрованов В.В. Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, 2000. 264 с.
19. Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 514 с.
20. Хохлаков А.Ф. Экспериментальное изучение образования округлых кристаллов алмаза // Вестник ОГТТН РАН, 2000. Т. 1. Вып. 15, № 5. С. 80–88.
21. Чепуров А.И., Федоров И.И., Сонин В.М. Экспериментальное моделирование процессов алмазообразования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 197 с.
22. Кулакова И.И., Пушкин А.Н., Руденко А.П., Штурман В.Л. Исследование каталитического окисления алмазов в связи с вопросами их роста – растворения в природных условиях // Комплексные исследования алмазов. Труды ЦНИГРИ. Вып. 153. 1980. С. 57–63.
23. Литвин Ю.А., Безруков Г.Н. О росте кристаллов искусственного алмаза // Докл. АН СССР. 1968. Т. 181, № 5. С. 1123–1125.
24. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1997. 228 с.
25. Пунин Ю.О. Расщепление кристаллов // ЗВМО, 1981. Ч. 110, Вып. 6. С. 666–686.

Поступила в редакцию 14.04.2020
Принята к публикации 08.05.2020

Об авторах

КОНОГОРОВА Диана Викторовна, младший научный сотрудник, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия, 678170, Чернышевское шоссе, 16, <https://orcid.org/0000-0002-7156-2196>, KonogorovaDV@alrosa.ru;

КОВАЛЬЧУК Олег Евгеньевич, заместитель директора по инновационной работе, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия, 678170, Чернышевское шоссе, 16, <https://orcid.org/0000-0001-5127-3752>, KovalchukOE@alrosa.ru;

БАРДУХИНОВ Леонид Данилович, заведующий лабораторией, Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия, 678170, Чернышевское шоссе, 16, <https://orcid.org/0000-0001-6526-2747>, BardukhinovLD@alrosa.ru;

Информация для цитирования

Коногорова Д.В., Ковальчук О.Е., Бардухинов Л.Д. Уникальный алмаз из трубки Нюрбинская (Накыинское кимберлитовое поле, Западная Якутия, Россия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 2. С. 47–57. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-3>

Unique diamond from the Nyurbinskaya pipe (Nakyn kimberlite field, West Yakutia, Russia)

D.V. Konogorova^{1,2,*}, O.E. Kovalchuk¹, L.D. Bardukhinov¹

¹NIGP PJSC «ALROSA», Mirny, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*KonogorovaDV@alrosa.ru

Abstract. For the first time in the world, a unique diamond has been discovered, with a smaller diamond freely moving in its cavity. The crystals were studied in detail by X-ray microtomography, which allowed us to build three-dimensional models of them, to establish in detail the morphological features of both the host and the prisoner minerals, and to determine the weight of each of them. On diametrically opposite surfaces of the host diamond, there are two through channels that lead to the cavity in which the internal diamond-prisoner is located. The channels contain barite, and one of the channels is hermetically sealed with this mineral. At the entrance to the cavity, both channels are narrow and have a diameter of about 0.1 mm. The morphology of the internal walls of the cavity approximates the morphology of the surface of the internal diamond. According to the results of infrared spectroscopy, the diamond has a high content of structural nitrogen impurity 1,250 at. ppm. Integral volume mapping was performed using Raman confocal spectroscopy, which resulted in a layer-by-layer reconstruction of the internal structure of the diamond. Luminescence studies using a laser with a long excitation wave of 337 nm revealed a uniform pink-lilac glow in both diamonds.

Key words: Almaz, Nakyn field, Nyurbinskaya tube, infrared spectroscopy, kimberlite, matryoshka, green diamond, diamond inclusion, X-ray microtomography.

Acknowledgements. The authors thank for the discussion of the obtained materials and assistance writing staff Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «ALROSA» – Malkovec Vladimir Grigorevic, Bogush Irina Nikolayevna, Baranov Leonid Nikolayevich, Shishmarev Roman Alekseevich, Zaitsevsky Fyodor Konstantinovich, and employees of the Lomonosov Moscow state University – Garanin Victor Konstantinovich and Kriulina Galina Yurievna.

References

1. Garanin V.K. Mineralogy of kimberlites and related rocks of the diamond-bearing provinces of Russia in connection with their Genesis and search. Diss. ... doct. geol.-min. sciences. M.: Moscow state University, 2006.
2. Orlov Yu.L. Mineralogy of diamond. Moscow: Nauka, 1984. 264 p.
3. Kostrovitsky S.I., Spezius Z.V., Yakovlev D.A., von der Flaass G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N. Atlas of indigenous diamond deposits of the Yakut kimberlite province. Mirny: ALROSA, 2015. 480 p.
4. Shatalov V.I., Grahanov S.A., Egorov A.N., Safyanikov Yu.V. Geological structure and diamond content of ancient placers of diamonds of the Nakyn kimberlite field of the Yakut diamondiferous province // Bulletin of the Voronezh University. Geology. 2002. No. 1.
5. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. 502 p.
6. Harkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. Indigenous diamond deposits of the world. Moscow: Nedra, 1998. 554 p.
7. Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag., B. 1994. Vol. 69. P. 1149–1153.
8. Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Phil. Mag., B. 1995. Vol. 72. P. 351–361.
9. Field J.E. The Properties Natural and Synthetic Diamond. London: Academic Press, 1992.
10. Welbourn C.M., Saito S., Fujimori N., Fukunaga O., Kamo M., Kobashi K., Yoshikawa M. In Advances in New Diamond Science and Technology. Tokyo, 1994. 327 p.
11. Vasiliev E.A. Planar optically active centers of diamonds as indicators of diamond formation conditions. Abstract. diss ... cand. geol.-min. sciences. SPb, 2007. 21 p.
12. Kriulina G.Yu. Constitutional characteristics of diamond from the deposits of the Arkhangelsk and Yakut diamond-bearing provinces. Author of the diss. ... cand. geol.-min. Moscow, 2012. 24 p.

13. *Kriulina G.Yu., Vasiliev E.A., Garanin V.K.* Structural defects in diamonds of the Arkhangelsk and Yakut diamond-bearing provinces // Collection of publications on the results of the III and IV annual scientific readings named after G. P. Kudryavtsev / Institute of applied Mineralogy, 2010. P. 93–103.
14. *Blinova G.K.* Structural additives as indicators of the mechanism of growth of natural diamond crystals // Dokl. AN SSSR. 1987. Vol. 294, No. 4. P. 868–871
15. *Vince V.G.* Optically active defects in diamond-regularities of formation and mutual transformation. Autoref. dis. ... doctor of physical and mathematical Sciences. Barnaul, 2011. 40 P.
16. *Vince V.G., Eliseev A.P.* Influence of growing conditions on the spectral characteristics of synthetic diamonds of type Ib // Perspective materials. 2009. No. 6. P. 36–42.
17. *Vince V.G., Eliseev A.P.* Influence of annealing at high pressures and temperatures on the defect-impurity structure of natural diamonds // Perspective materials. 2010. No. 1. P. 49–58.
18. *Beskrovanov V.V.* Ontogeny of diamond. Novosibirsk: Nauka, 2000. 264 P.
19. *Kukharev A.A.* Almazy Ural. M.: Gosgeoltekhizdat, 1955. 514 P.
20. *Khokhryakov A.F.* Experimental study of the formation of rounded diamond crystals // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2000. Vol. 1, Iss. 15, No. 5. P. 80–88.
21. *Chepurov A.I., Fedorov I.I., Sonin V.M.* Experimental modeling of diamond formation processes. Novosibirsk: publishing house of SB RAS, 1997. 197 P.
22. *Kulakova I.I., Pushkin A.N., Rudenko A.P., Shturman V.L.* Investigation of the catalytic oxidation of diamonds in connection with the issues of their growth-dissolution in natural conditions // Trudy CNIGRI. M.: 1980. Issue 153. P. 57–63.
23. *Litvin Yu.A., Bezrukov G.N.* On the growth of artificial diamond crystals // Dokl. AN SSSR. 1968. Vol. 181, No. 5. P. 1123–1125.
24. *Krasnova N.I., Petrov T.G.* Genesis of mineral individuals and aggregates. Nevsky courier, 1997. 228 p.
25. *Punin Yu.O.* Splitting of crystals // ZVMO. 1981. CH. 110, Vol. 6. P. 666–686.

About the authors

KONOGOROVA Diana Viktorovna, Senior Researcher, Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «ALROSA», 16, Chernyshevskoe shosse, Mirny, 678170, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-7156-2196>, KonogorovaDV@alrosa.ru;

KOVALCHUK Oleg Evgenievich, Deputy Director, Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «ALROSA», 16, Chernyshevskoe shosse, Mirny, 678170, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5127-3752>, KovalchukOE@alrosa.ru;

BARDUKHINOV Leonid Daniilovich, Head of the Laboratory, Geo-Scientific Research Enterprise Public Joint Stock Company «ALROSA», 16, Chernyshevskoe shosse, Mirny, 678170, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

<https://orcid.org/0000-0001-6526-2747>, BardukhinovLD@alrosa.ru;

Citation

Konogorova D.V., Kovalchuk O.E., Bardukhinov L.D. Unique diamond from Nyurbinskaya pipe (Nakyn kimberlite field, Western Yakutia, Russia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, N 2. P. 47–57. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-3>

Табаюряхский мамонт (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799) с острова Котельный, Новосибирский архипелаг

И. С. Павлов^{1,*}, N. Suzuki^{2,**}

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

²Институт высокоразмерной медицинской визуализации,
Школа медицины, Университет Джикей, Токио, Япония

*pavlovin@mail.ru, **naosuzukijk@ybb.ne.jp

Аннотация. Представлены результаты двух палеонтологических экспедиций на о. Котельный Новосибирского архипелага, проведенных в 2019 г. В ходе изыскательных работ в междуречье Кожевина–Волосовича были обнаружены костные останки шерстистого мамонта, примерно 30–40 % от полного скелета. Найденный объект залегал на небольшой территории, включающей четыре байджераха. На местонахождении были обнаружены фрагменты черепа, бивней, лопатка, шейные, грудные и поясничные позвонки, фрагмент крестца, фрагменты ребер, таза и костей конечностей. На данный момент это наиболее полный скелет, обнаруженный на о. Котельный. После первого всестороннего анализа костного материала были выявлены следы деятельности древнего человека. Следы от орудий древнего человека были обнаружены на черепе, позвонках и ребрах. Но самое интересное – это кончик “дротика”, оставшийся на ости лопатки животного. Также рядом со скелетными остатками были найдены и идентифицированы орудия труда древнего человека, предположительно, точило для ножа со следами интенсивного использования и что-то типа лопаточки. Результаты радиоуглеродного анализа соответствуют каргинской эпохе позднего неоплейстоцена. Климатические условия того времени были несколько благоприятнее современных, хотя отличались более засушливыми и жаркими летними периодами. Данная находка расширяет территорию активности древнего человека в позднем неоплейстоцене.

Ключевые слова: поздний неоплейстоцен, шерстистый мамонт, древний человек, *Mammuthus primigenius* Blum., о. Котельный, Новосибирский архипелаг.

Введение

Актуальность. Шерстистый мамонт был широко распространен практически по всей Евразии в позднем неоплейстоцене. Находки скелетов этого животного довольно редки и в основном встречаются в северной части Якутии в том числе и на островах Новосибирского архипелага [1–4]. Ценность скелета заключается в том, что с помощью него можно воссоздать анатомические особенности вида и/или особи, определить индивидуальный возраст, пол и условия гибели и захоронения. Более того, обнаруженные следы деятельности древнего человека на костях дают основание полагать, что человек того времени практиковал охоту на мамонтов.

В данной работе приводятся описание и промеры неполного скелета мамонта (30–40 % от полного скелета), найденного на о. Котельный в 2019 г., а также описание следов деятельности древнего человека на останках этого мамонта. Географиче-

ские координаты: с.ш. 75,70839, в.д. 140,16154, в районе р. Таба-Юрях. Кости Табаюряхского мамонта были собраны на территории с четырьмя байджерахами, высота которых составляет от 50 см до 1,5 м. Растительность на месте находки скудная: мхи, полярная ива, камнеломка, пушица, полярный мак и т. д. Результаты радиоуглеродного анализа составляют 26244±224 лет назад (IAAA-190392), т. е. каргинское время позднего неоплейстоцена. Климатические условия того времени от современного отличались более засушливыми и жаркими летними периодами. Палеоботанические данные свидетельствуют о неоднократных флюктуациях климата на протяжении этой эпохи. Ряд исследователей отмечает два максимума потепления 45–41 и 32–28 тыс. л.н., когда лиственнично-березовые редколесья и ерники продвигались к северу примерно на 100–200 км [2]. По некоторым данным [5], примерно в этот же период Новосибирские острова начали



Рис. 1. Карта местонахождения Табаюряхского мамонта (красная точка).

Fig. 1. Map of the location of the Yuryakh mammoth tab (red dot).

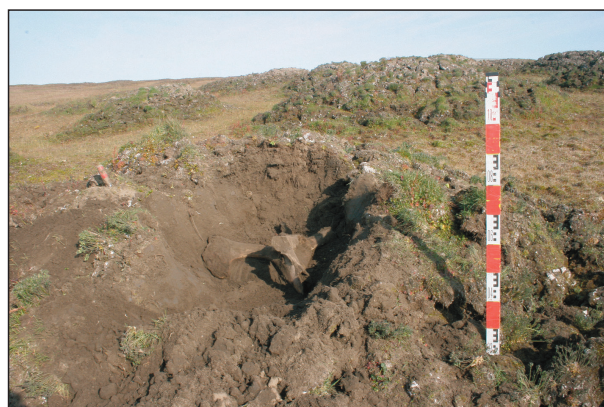


Рис. 2. Остров Котельный, местонахождение Табаюряхского мамонта.

Fig. 2. Kotelniy Island, location of the Yuryakh mammoth Headquarters.

отделяться от материка, причем северное побережье их подтапливалось морем. Но согласно результатам проводившихся в регионе моря Лаптевых работ [6], уровень моря начал повышаться около 18–17 тыс л.н. в результате распада покровных ледников на севере Европы и Америки, вызванного климатическими изменениями. В периоды кратковременных потеплений конца позднего неоплейстоцена (раунис, беллинг, аллеред) район

Новосибирских островов еще представлял собой единую материковую сушу. Таким образом, исследуемая особь погибла в конце каргинской эпохи в начале трангрессии моря на сушу, когда еще острова Новосибирского архипелага были частью материка.

Материалы и методы исследования

Табаюряхский мамонт включает следующие костные останки: фрагмент черепа (2019-ТЮМ-K1) (лобная, носовая и альвеолярная части, затылочные мыщелки); шейные позвонки (7 ед.) (2019-ТЮМ-K1–7); грудные позвонки (11 ед.) (2019-ТЮМ-K8–18); поясничные позвонки (4 ед.) (2019-ТЮМ-K19–22); лопатка (2019-ТЮМ-K23); лучевая кость (2019-ТЮМ-K24); таз (2019-ТЮМ-K25); ребра (15 ед.) (б/н).

Череп и его фрагменты, а также несколько позвонков мамонта были обнаружены в июне 2019 г., по устному заявлению недропользователей. Остальные составляющие скелета были собраны в августе того же года, во время второй экспедиции. Кости залежали на территории диаметром около 25 м.

При исследовании были использованы схемы промеров Е.Н. Машенко [11], В.Е. Гарутт [12], В.Е. Гарутт и И.В. Фофановой [13].

Радиоуглеродный анализ Табаюрхского мамонта проведен 21 декабря 2019 г. (Earth System Science Dept, UC Irvine).

Компьютерное томографирование лопатки мамонта проведено в Институте высокоразмерной медицинской визуализации, Школа медицины Университета Джикей (Япония).

Использованные сокращения: ТЮМ – Табаюрхский мамонт; К – о. Котельный

Результаты и обсуждения

Череп мамонта состоит из семи частей: лобная часть, затылочные мыщелки, кость левой

глазницы, левая и правая части основания альвеолы бивней, две нижние части альвеолы бивней. Лобная часть черепа имеет повреждения на верхней части лба и затылочной кости, края повреждения имеют зубчатую форму. Цвет черепа светло-коричневый, на местах повреждений темно-коричневый. Задняя и нижняя часть черепа, включая верхнюю челюсть, скулы и т. д., отсутствуют. По размерам череп Табаюрхского мамонта не выходит за рамки видовых параметров шерстистого мамонта – *M. primigenius* (табл. 1).

Первый шейный позвонок – с выраженным дорсальным бугром и шероховатостью на дор-

Таблица 1

Промеры черепа (cranium), мм

Table 1

Measurements of the skull (cranium), мм

Промер	Табаюрхский мамонт	Барайы (р. Алдан) БШМ б/н [3]	Хрома ЯНЦ 6643 [3]	Улахан Кизэнг-Аан ЯНЦ3291 [3]	Шандрин ИИФФ б/н [3]	Акаана (р. Б. Чукочьа) ЯНЦ6313/1 [3]	Ирелях-Сиэнэ (р. Колыма) ЯНЦ 4806 [3]	п. Диринг, Чурапчинского района, АН РС(Я). № 6881 [2]	р. Алдан, ЦГРМ, С-Петербург (по[2])	р. Адыча, Зоол. Музей МГУ Москва (по[2])	Юрибейский мамонт [7]
Длина лба (от вершушки лба до верхнего края носового отверстия)	440	463	–	532	516	489	546	–	–	–	–
За орбитальная ширина	680	–	–	–	–	–	–	665	660	723	500
Минимальная ширина лба	320	275	375	310	233	335	350	–	–	–	265
Наибольшая ширина затылка	~640	766	707	748	689	663	780	–	–	–	500
Ширина носового отверстия	440	457	476	508	411	384	452	421	435	450	–
Наибольшая высота носового отверстия	~140	179	–	190	151	193	175	–	–	–	–
Длина от нижнего края носового отверстия до верхнего края затылка	~590	623	563	620	554	538	586	–	–	–	–
Длина носового отростка	104	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ширина основания носового отростка	142	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Размеры затылочного мыщелка (ширина/ высота)	57/74	–	–	–	–	–	–	99/88	100/86	108/79	–
Размеры затылочного отверстия (ширина/высота)	67/65	–	–	–	–	–	–	89/64	92/80	89/88	–

сальной дуге. Позвонок полностью сохранился, имеются следы выветривания. Апофизы дорсальных поперечных отростков полностью срослись с остальной частью позвонка. Эпифизарный шов полностью облитерирован (табл. 2).

Второй шейный позвонок – с разрушенной дорсальной частью и боковым отростком. Каудальная суставная поверхность сохранилась, но на нем имеются трещины и скол в середине (табл. 3).

Остальные костные останки скелета мамонта имеют различную степень сохранности, но все они несомненно принадлежали одной особи шерстистого мамонта, так как все кости соразмерны друг другу. Как уже упоминалось выше, скелет мамонта довольно сильно разбросан по территории радиусом 25 м, более того, глубина захоронения также неравномерна из-за особенностей островного ландшафта. Поэтому какие-то кости

Таблица 2

Промеры первого шейного позвонка (atlant), мм

Table 2

Measurements of the first cervical vertebra (atlant), mm

Промер	Табаюряхский мамонт	Хомский ИЕМ 1281 [8]	Мамонт из с. Камское [8]	Мамонт Кутоманова [8]	Таймырский мамонт, ЗИН [8]
Набольшая ширина	347	380	379	386	368
Ширина верхнего края позвонка	137	181	169	138	–
Ширина неврального отверстия	86	79,2	87	84	86
Ширина канала для зубовидного отростка эпистрофея	53	63,6	65	55	52
Максимальная высота позвонка	191	244	196	190	–
Расстояние между внешними краями сочленовых поверхностей для затылочных мыщелков	223	220	242	236	–

Таблица 3

Промеры второго шейного позвонка (axis), мм

Table 3

Measurements of the second cervical vertebra (axis), mm

Промер	Табаюряхский мамонт	Гыданский п-овб р. Юрибей ПИН 3941 [7]	р. Лена, ЗИН 7911 [7]	Таймырский п-ов, ЗИН, Гарутт, 1954 [7]	р. Березовка ЗИН 5316 [7]
Ширина верхнего края	~87	–	–	–	–
Максимальная высота	~215	197	274	252	254
Высота тела позвонка	108	–	–	–	–
Высота от поперечного отростка до невральной арки	185	–	–	–	–
Ширина невральное отверстия	54	65	74	86	63
Высота неврального отверстия	58	56	99	52	66
Максимальная ширина позвонка	218	158	–	–	–

обнажились и начали разрушаться раньше, другие – позже.

Результаты и обсуждения

По анатомическим характеристикам Табаюрахский мамонт не выходит за рамки видовых параметров шерстистого мамонта – *Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799. Судя по срастанию позвоночных эпифизов индивидуальный возраст мамонта составляет около 25–30 лет, т. е. довольно молодой. По реконструированному диаметру бивня (около 12 см) исследованные остатки относятся к самцу, так как у самок даже в пожилом возрасте диаметр бивня довольно небольшой [9].

Нами была составлена подробная схема расположения костных остатков Табаюрахского мамонта на местонахождении (рис. 3). При раскоп-

ках в июне и августе первым были выкопаны левая лопатка, три позвонка и первое ребро (см. рис. 3, красный квадрат). Фрагменты бивней были обнаружены перед черепом сложенными друг на друга (рис. 3, отмечены зеленым). Далее были найдены поясничные позвонки в анатомическом порядке и т. д. Кости были разбросаны довольно далеко друг от друга, но залегали в анатомической последовательности, кроме сегмента крестца, который залегал перед черепом и всеми костями переднего пояса. По-видимому, труп мамонта длительное время лежал на открытом воздухе и успел полностью разложиться, а некоторые части могли быть растащены животными-падальщиками.

На остатках исследуемого мамонта обнаружены следы, нанесенные древним человеком. На основании радиоуглеродной датировки (более 26 тыс. л.н.) можно предположить, что это первое доказательство активности древнего человека в столь удаленной точке Крайнего Севера. Самой дальней точкой активности древнего человека за Полярным кругом в позднем неоплейстоцене Сибири считалась стоянка на местонахождении Мус-Хая, или Сопливая гора, левый берег р. Яна [10].

Следы на костях, по-видимому, наносились каменным орудием. Данный факт был предварительно предположен при исследовании участков следов под электронным микроскопом в Российском центре судебной экспертизы (г. Москва) Плетяновой И.В. Череп мамонта был намеренно разрушен в области темени острым твердым предметом, об этом можно судить, основываясь на зазубринах на краях раскола (рис. 4). Целью нанесения данного отверстия на черепе, по-видимому, было извлечение мозга.

В лобной части черепа также наблюдаются длинные, поперечные процарапанные следы, возможно, тем же каменным орудием (см. рис. 4). По-видимому, для того чтобы добраться до костной ткани, древние люди срезали кожу и сухожилия, обволакивающие череп. Это свидетельствует против того, что люди просто обнаружили костные останки мамонта и начали добывать необходимые материалы. Мамонт был убит этими охотниками и разделан на месте.

Кроме того, следы от орудий древнего человека были обнаружены на остистых отростках и вентральных частях тел грудных позвонков, на бивнях и на ребрах. На ребрах следы имеются на каудальном и краниальном краях, а также на латеральной стороне, в виде горизонтальных линий, аналогично следам на черепе (рис. 5). На

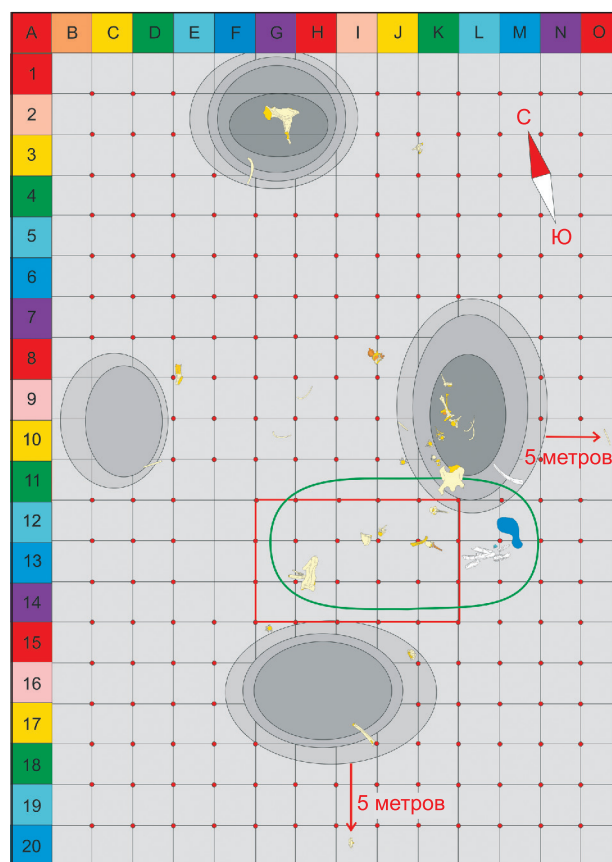


Рис. 3. Схема расположения костных останков Табаюрахского мамонта на местонахождении. Красным и зеленым отмечены зоны, откуда начинались раскопки мамонта, темно-серым цветом – байджерахи, синим – лужа.

Fig. 3. Diagram of the location of the bone remains of Tabayurakh mammoth at the location. Red and green marked area, where he began excavations of the mammoth, dark-gray marked bijarani, blue color denotes pool.



Рис. 4. Череп мамонта со следам раскола, красной рамкой отмечен разрушенный участок, желтой – участок нанесения царапин при снятии шкуры. Стрелками указаны следы поперечных царапин.

Fig. 4. A mammoth skull with signs of split with the red frame marked with the destroyed land, the yellow frame is a part of the coating scratches when removing the skins. The arrows indicate traces of transverse scratches.

позвонках также имеются следы, нанесенные при разделке туши (рис. 6).

Оба бивня мамонта были разрублены на фрагменты. На них имеются следы от косых ударов каменного орудия (рис. 6, а). По одной из гипотез, древние люди могли сперва намочить бивень и затем уже рубить, так как вещество бивня гигроскопично. При реконструкции нами установлено, что бивни ломались по отработанной мето-

дике. С одной стороны бивень стачивался, затем бивень ломался с использованием рычагов. Подобным образом бивни ломались на стоянке Мус-Хая (Сопливая гора) [10]. На месте были найдены заготовки, сделанные из того же бивня (рис. 6, б) и отходы от проведенных работ, т. е. стружка от бивней (рис. 6, в).

Среди примечательных остатков Табаюрахского мамонта отметим лопатку, где на ости со-



Рис. 5. Следы от среза мягких тканей с ребер и позвонков: справа ребро, слева вентральная сторона позвонка.

Fig. 5. Traces of soft tissue cut from the ribs and vertebrae: right rib, left ventral side of the vertebra.



Рис. 6. Обработанные бивни Табаяряхского мамонта: *а* – косые удары; *б* – придание фрагменту бивня некой формы; *в* – стружка бивня.

Fig. 6. Processed tusks of the Tabayuryakh mammoth: *a* – oblique blows; *б* – giving a fragment of the Tusk a certain shape; *в* – shavings of the Tusk.

хранился застрявший в кости кончик наконечника от метательного орудия (рис. 7). Нами проведено сканирование лопатки с помощью компьютерной томограммы SIEMENS, SOMATOM Definition AS. Полученные данные были обработаны в лаборатории Института высокоразмерной медицинской визуализации Школы медицины Университета Джикей (Япония). Результаты показали, что наконечник вошел в лопатку почти перпендикулярно поверхности кости этой области.

Мы полагаем, что наконечник был сделан из кости, а не из камня, как изначально предполагалось. Кроме того, при исследовании выявлено, что костная ткань, поврежденная в момент удара наконечником, срослась с последним. Об этом свидетельствует выпуклость вокруг наконечника как результат разрастания (в процессе заживления) костной ткани, т. е. мамонт не умер от этого удара и еще прожил в течение какого-то времени.

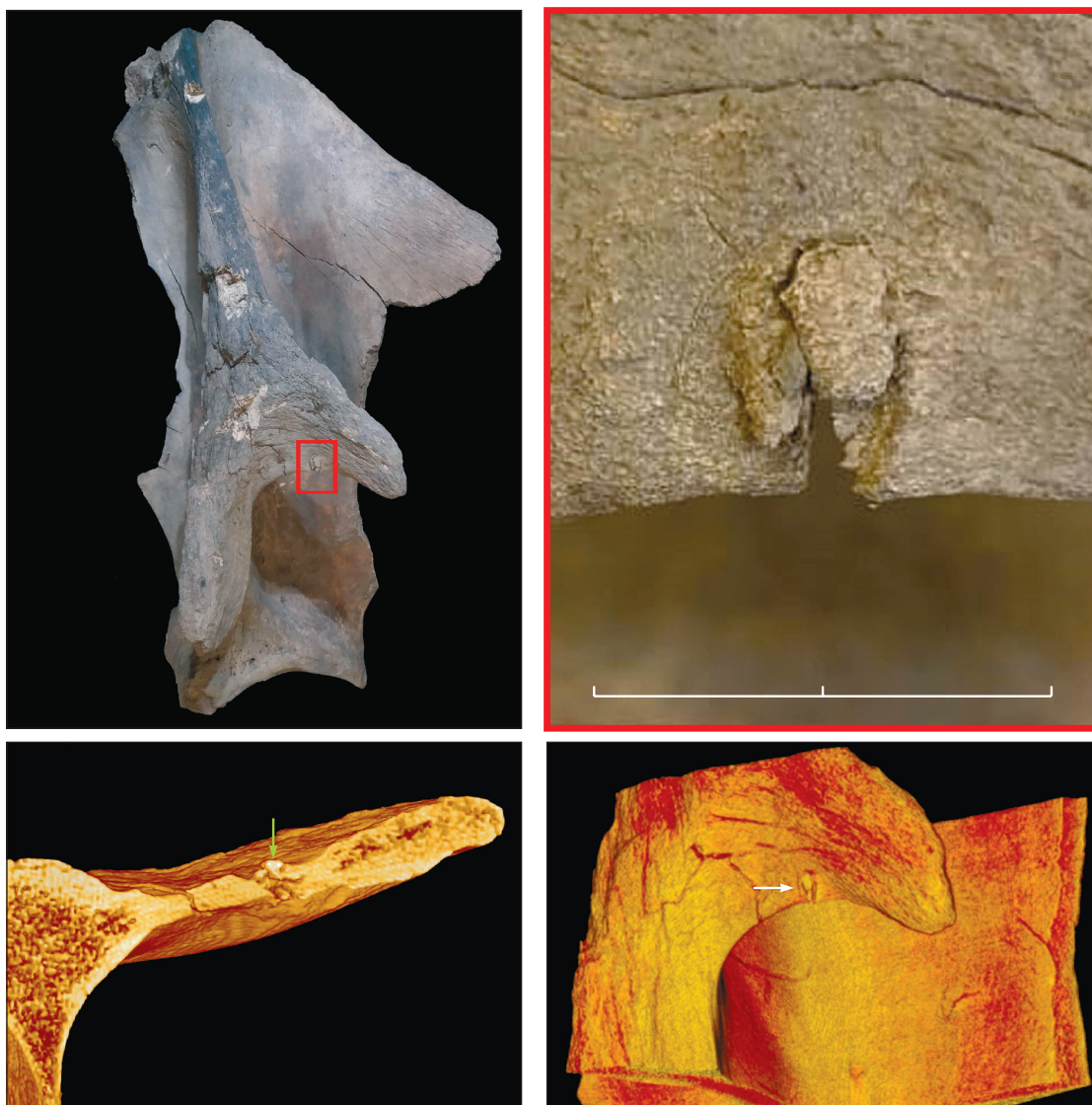


Рис. 7. Лопатка мамонта с застрявшим наконечником и результаты сканирования с помощью компьютерной томографии. Красным квадратом и стрелками (зеленая, белая) указано расположение наконечника.

Fig. 7. Mammoth shoulder blade with a stuck tip and the results of CT scanning. The red square and arrows (green, white) indicate the location of the tip.



Рис. 8. Артефакты найденные на местонахождении: слева – «лопаточка», справа – «точило».

Fig. 8. Artifacts found at the location: «spatula» on the left, «whetstone» on the right.

На местонахождении рядом со скелетными остатками были обнаружены два артефакта, сделанные из бивня (рис. 8). Первый артефакт представляет из себя что-то вроде небольшой лопаточки (предположительно, из бивня исследуемого мамонта), размером и формой похожей на современную садовую лопаточку. О назначении данного инструмента пока версий нет. Второй артефакт, предположительно, – точило для каменного или иного орудия. Поверхность артефакта отличается от таковых исследуемого мамонта. Возможно, данный инструмент был принесен людьми и оставлен или забыт на этом месте. Судя по сточенности точила, его использовали довольно длительное время.

Выводы

Взрослый самец Табаурянский мамонт является первой находкой на о. Котельный со следами деятельности древних людей в столь удаленной точке Крайнего Севера с позднеплейстоценовым возрастом. Вероятнее всего, мамонт был одиночкой, так как по аналогии с современными слонам половозрелые самцы изгоняются из матриархального стада, да и охотиться на одиноких особей было, по-видимому, проще и безопаснее. Более того, мамонт ранее уже подвергался нападению со стороны людей, об этом свидетельствует нанесенная метательным орудием рана с сохранившимся отломленным острием наконечника. От этой раны мамонт не погиб, а наконечник, застрявший в лопатке, зарос костной тканью. Но затем мамонт все же был убит людьми, которые уже имели опыт охоты на этих животных. Об этом свидетельствуют уже отработанная методика снятия шкуры и мяса с костей, наличие соответствующих инструментов, а также целенаправленное изготовление из бивней мамонта новых заготовок для ремонта или создания того или иного орудия труда древнего человека. Данная находка расширяет представления о влиянии человека в позднем плейстоцене и подтверждает, что древний человек целенаправленно охотился на шерстистого мамонта, а кости и

бивни шли на изготовление и ремонт орудий труда, одежды и т. д.

Список литературы

1. *Верещагин Н.К.* Почему вымерли мамонты. Л.: Наука, 1979. 200 с.
2. *Лазарев П.А., Боескоров Г.Г., Томская А.И., Гарутт Н.В., Васильев Е.М., Каспаров А.К., Родионов Г.Н.* Млекопитающие антропогена Якутии. Якутск: Якутский научный центр СО РАН, 1998. 158 с.
3. *Лазарев П.А.* Крупные млекопитающие антропогена Якутии. Новосибирск: Наука, 2008. 160 с.
4. *Гурьев К.Н., Лазарев П.А., Колосов П.Н.* Испылины ледникового периода. Якутск. 2011. 144 с.
5. *Мумт К.А.* Новые данные по палеоботаническому и палеонтологическому обоснованию стратиграфии четвертичных отложений Анабаро-Оленекской приморской низменности // Геология и полезные ископаемые Сибирской платформы. Л.: Гостехиздат, 1963. Т. 136. С. 75–98.
6. *Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский А.В.* Береговые линии восточно-арктических морей в позднем плейстоцене и голоцене // Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М.: Наука, 1982. С. 179–185.
7. *Юрибейский мамонт.* М.: Наука, 1982. 160 с.
8. *Петрова Е.А.* Мамонт (*Mammuthus primigenius*) из позднего плейстоцена Чувашии, Европейская Россия // Труды ЗИН РАН. 2009. Т. 313, № 1. С. 58–67.
9. *Верещагин Н.К., Тихонов А.Н.* Исследование бивней мамонтов // Труды ЗИН АН СССР. 1986. Т. 149. С. 3–14.
10. *Питулько В.В., Павлова Е.Ю., Никольский П.А., Иванов В.В.* Янская стоянка: материальная культура и символическая деятельность верхнепалеолитического населения Сибирской Арктики. Российский археологический ежегодник 2012. № 2. С. 33–102.
11. *Maschenko E.N.* Individual development, biology and evolution of the woolly mammoth // *Cranium* 19. 2002. No. 1. 114 p.
12. *Garutt V.E.* The Southern Elephant *Archidiskodon meridionalis* (Nesti) from the Pliocene of the North Coast of the Azov Sea // *Treatises of the Quaternary Commission*. 1954. Vol. 10, No. 2. P. 1–76.
13. *Гарутт В.Е., Форонова И.В.* Исследование зубов вымерших слонов. Методические рекомендации. / Академия наук СССР, Сибирское отделение; Институт геологии и геофизики. Новосибирск, 1976. 35 с.

Поступила в редакцию 20.03.2020

Принята к публикации 19.05.2020

Об авторах

ПАВЛОВ Иннокентий Семенович, инженер-исследователь, Отдел изучения мамонтовой фауны, Академия наук Республики Саха (Якутия). 677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ORCID ID: 0000-0002-4417-1800, pavlovin@mail.ru;

СУДЗУКИ Наоки, профессор, доктор техн. наук, доктор медицины, Институт высокоразмерной медицинской визуализации, Школа медицины Университета Джикей, 4-11-1, Ниши-Шимбаши, Мина-то-ку, Токио, 105-8461, Япония,
nsuzuki@jikei.ac.jp

Информация для цитирования

Павлов И. С., Suzuki N. Табаюряхский мамонт (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799) с острова Котельный, Новосибирский архипелаг// Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 2. С. 58–68. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-4>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-4

**Tabayuryakhsky mammoth (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799)
from the island of Kotelny, Novosibirskiy Archipelago**

I. Pavlov^{1,*}, N. Suzuki^{2,**}

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

²The Jikei University School of Medicine, Institute for High
Dimensional Medical Imaging, Tokyo, Japan

*pavlovin@mail.ru, **naosuzukijk@ybb.ne.jp

Abstract. The article presents the results of two paleontological experiments on Kotelny island, Novosibirsk Archipelago, conducted in 2019. During the survey work in the area between Kozhevena-Volosovich rivers, the skeletal remains of a woolly mammoth were found, approximately 30–40 % of the complete skeleton. The object lies in a small area that includes four baidjerakhs. Fragments of the skull, fragments of tusks, scapula, cervical, thoracic and lumbar vertebrae, a fragment of the sacrum, fragments of ribs, fragments of the pelvis and bones of limbs were found at the location. At the moment, this is the most complete skeleton found on the Kotelny island. After the first comprehensive analysis of the bone material, traces of ancient human activity were identified. Traces of ancient tools were found on the skull, vertebrae, and ribs. But the most interesting thing is the tip of the «dart» remaining on the spine of the animal's shoulder blade. Also, near the skeletal remains, tools of ancient man were found and identified, presumably a knife sharpener with traces of intense use, and something like a «spatula». The results of radiocarbon analysis correspond to the kargian epoch of the late neo-Pleistocene. The climatic conditions of that time were somewhat better than modern ones, although they differed by more arid and hot summers. This finding expands the territory of ancient human activity in the late neo-Pleistocene.

Key words: Siberian platform, Vilyui-Markha dike belt, dikes, dolerites, high-titanium basites.

Acknowledgements. Late Pleistocene, woolly mammoth, ancient human, *Mammuthus primigenius*, Kotelny island, Novosibirsk archipelago.

References

1. Vereshhagin N.K. Pochemu vy'merli mamonty'. Leningrad: Nauka, 1979. 200 p.
2. Lazarev P.A., Boeskorov G.G., Tomskaya A.I., Garutt N.V., Vasil'ev E.M., Kasparov A.K., Rodionov G.N. Mlekopitayushhie antropogena Yakutii. Yakutskiy nauchny'j centr SO RAN, 1998. 158 p.
3. Lazarev P.A. Krupny'e mlekopitayushhie antropogena Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2008. 160 p.
4. Gur'ev K.N., Lazarev P.A., Kolosov P.N. Ispoliny' lednikovogo perioda. Yakutsk. 2011. 144 p.
5. Mitt K.A. Novy'e danny'e po paleobotanicheskomu i paleontologicheskomu obosnovaniyu stratigrafii chetvertichny'x otlozhenij Anabaro-Olenekskoj primorskoj nizmenosti // Geologiya i polezny'e iskopaemy'e Sibirskoj platformy'. Leningrad: Gostoptexizdat, 1963. Vol. 136. P. 75–98.
6. Degtyarenko Yu.P., Puminov A.P., Blagoveshhenskij A.V. Beregovy'e linii vostochno-arkticheskix morej v

pozdнем plejstocene i golocene // Kolebaniya urovnya morej i okeanov za 15 000 let. Moskva: Nauka, 1982. P. 179–185.

7. *Yuribejskij* mamont. Moskva: Nauka, 1982. 160 p.

8. *Petrova E.A.* Mamont (*Mammuthus primigenius*) iz pozdnego plejstocena Chuvashii, Evropejskaya Rossiya // *Trudy` ZIN RAN*. 2009. Vol. 313, № 1. P. 58–67.

9. *Vereshhagin N.K., Tixonov A.N.* Issledovanie bivennej mamontov / *Trudy` ZIN AN SSSR*. 1986. Vol. 149. P. 3–14.

10. *Pitul'ko V.V., Pavlova E.Yu., Nikol'skij P.A., Ivanov V.V.* Yanskaya stoyanka: material'naya kul'tura i simvolicheskaya deyatel'nost' verxnepaleoliticheskogo na-

seleniya Sibirskoj Arktiki // *Rossijskij arxeologicheskij ezhegodnik*. 2012. No. 2. P. 33–102.

11. *Maschenko E.N.* Individual development, biology and evolution of the woolly mammoth // *Cranium* 19. 2002. No. 1. 114 p.

12. *Garutt V.E.* The Southern Elephant *Archidis kodonmeridionalis* (Nesti) from the Pliocene of the North Coast of the Azov Sea // *Treatises of the Quaternary Commission*. 1954. Vol. 10, No. 2. P. 1–76.

13. *Garutt V.E., Foronova I.V.* Issledovanie zubov vy'mershix slonov // *Me-todicheskie rekomendacii. Novosibirsk: Institut Geologii i Geofiziki SO AN SSSR*. 1976, 32 p.

About the authors

PAVLOV Innokentiy Semenovich, Engineer-Researcher at the Department of Study of Mammoth Fauna, Academy of Sciences of Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia, 33 Lenina pr., Yakutsk, 677007, Russia

ORCID ID: 0000-0002-4417-1800. pavlovinn@mail.ru;

NAOKI SUZUKI, Professor of Institute for High Dimensional Medical Imaging, The Jikei University School of Medicine, 3-25-8 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, 105-8461, Tokyo, Japan, e-mail: nsuzuki@jikei.ac.jp

Citation

Pavlov I., Suzuki N. Tabayuriakhsky mammoth (*Mammuthus primigenius* Blum., 1799), Kotelny island, Novosibirsk archipelago // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020, Vol. 25, N 2. P. 58–68. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-4>

Костные остатки шерстистого мамонта *Mammuthus primigenius* из окрестностей с. Даппарай, Олекминский район, Южная Якутия

А.И. Климовский

Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия
aisen87@mail.ru

Аннотация. В статье приведены данные о новых находках остатков шерстистого мамонта (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799) в Олекминском районе Якутии. Летом 2018 г. в местности «Лэгэнтэй Ойогосо» и на берегу руч. Даппарай были найдены фрагменты скелетов шерстистых мамонтов. Находки позднелайстоценовых животных на юге-востоке Якутии достаточно редки, и по этой причине Даппарайские мамонты представляют большой интерес для науки. Были взяты промеры тридцати двух костей, принадлежавших трем мамонтам. Морфометрические характеристики Даппарайских мамонтов сравнивались с промерами костей Березовского, Таймырского и Гыданского мамонтов. По результатам сравнения морфометрических показателей сделан вывод о том, что мамонты, обитавшие на юге Якутии, не имели существенных отличий от своих северных сородичей. Это может свидетельствовать о сходных природно-климатических условиях в зоне их обитания.

Ключевые слова: местонахождение, шерстистый мамонт, костные остатки, мамонтовая фауна, центральная, южная Якутия, Даппарай, поздний плейстоцен.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-45-140007 p_a.

Введение

Центральные и южные районы Якутии являются менее перспективными в плане обнаружения остатков животных мамонтовой фауны, чем арктическая часть республики. Причиной тому является более глубокая оттайка мерзлых грунтов в летнее время, способствующая разрушению костных и иных остатков древних животных. Тем не менее, в Центральной Якутии, были сделаны несколько значимых открытий и находок шерстистых мамонтов, шерстистых носорогов, первобытного бизона, древней лошади, пещерных львов и т. д. В течение последних десятилетий здесь были обнаружены: Суольский мамонт (р. Суола, Мегино-Кангаласский район), Хандыгский мамонт (р. Алдан, Томпонский район), Елечейский носорог (р. Суола, Мегино-Кангаласский район), Амгинское захоронение мамонтов на берегу оз. Тунгус кыыса (р. Амга, Амгинский район) и т. д. [1–3]. Ранее изучались такие местонахождения животных мамонтовой фауны, как Мамонтова гора, Ихененское в бассейне р. Алдан; Тандинское обнажение и др. [4]

Части скелетов шерстистого мамонта и остатков других животных мамонтовой фауны в Олек-

минском районе обнаруживаются реже, чем даже в Центральной Якутии. В Музее истории земледелия Якутии в Олекминске хранятся более трех десятков костей, принадлежавших представителям мамонтовой фауны. Большая часть из них представлены мамонтами: фрагменты двух крупных бивней самцов (плохой сохранности), два бивня самок мамонта, бивень мамонтенка, две нижние челюсти, несколько изолированных зубов, фрагмент плечевой кости, две бедренные кости, фрагменты позвонков и других костей. Кроме этого, имеются костные остатки бизонов: шесть фрагментов черепов с рогами или роговыми стержнями, отдельный роговой стержень и фрагмент плечевой кости [5]

Поселок Даппарай, в окрестностях которого были обнаружены остатки ископаемых животных, расположен на левом берегу р. Лена (рис. 1). Берег реки в этом районе довольно высокий, около 15–20 м, состоит из песка и супеси с разными включениями, подвергается интенсивной эрозии.

Летом 2018 г. на берегу р. Лена в местности «Лэгэнтэй ойогосо» местные жители обнаружили фрагменты скелета ископаемого животного



Рис. 1. Карта местонахождений мамонтовой фауны.

Fig. 1. Map of the locations of mammoth fauna.

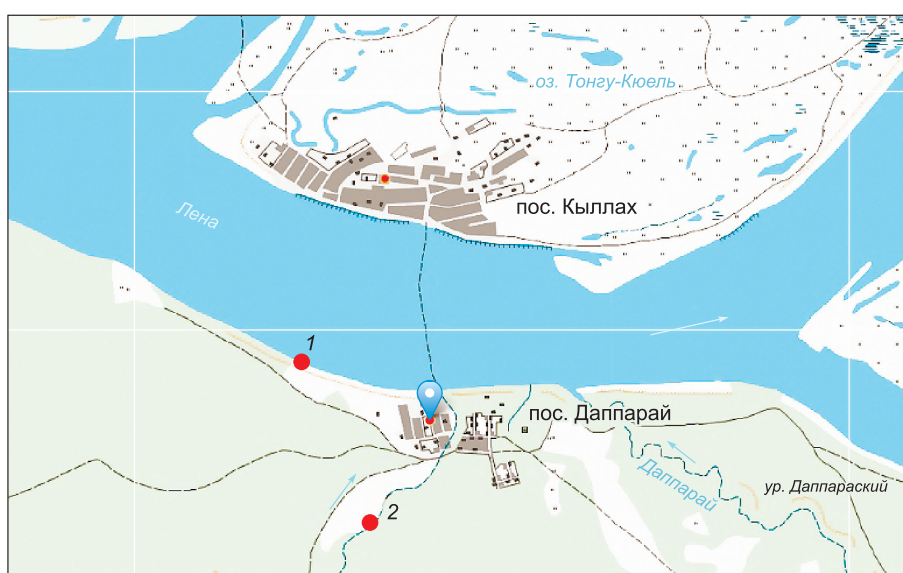


Рис. 2. Карта местонахождений остатков мамонтов в окр. пос. Даппарай: 1 – «Лэгэнтэй ойогосо»; 2 – руч. «Даппарай».

Fig. 2. Map of the locations of the remains of mammoths in the vicinity of Dapparay village: 1 – «Legentei oyogoso»; 2 – «Dapparay Creek».

(ДпМ № 1). Через некоторое время информация о находке достигла Академии наук Республики Саха (Якутия), и на место находки выехал экспедиционный отряд.

В ходе раскопок были обнаружены три ребра, локтевая кость, большая берцовая кость и фрагменты расколовшегося черепа шерстистого мамонта (рис. 3). Сохранность костных остатков относительно хорошая, цвет коричневый, серый и темно-серый.

Некоторые фрагменты скелета, в том числе бивни, были ранее извлечены местными жителями и проданы.

Судя по фотографии, полученной нами по WhatsApp (рис. 4), примерная длина бивня составляет около 2 м, максимальный диаметр около 15–16 см.

Таким образом, можно предположить, что бивень принадлежал половозрелой особи средних лет, т. е. животное еще не достигло пределов ро-



Рис. 3. Раскопки Даппарайского мамонта.

Fig. 3. Excavations of the Dapparay mammoth.



Рис. 4. Правый бивень Даппарайского мамонта.

Fig. 4. The right tusk of the Dapparay mammoth.



Рис. 5. Схема залегания черепа мамонта на берегу р. Лена.

Fig. 5. The scheme of the mammoth skull burial place on the Lena river bank.

ста. По обнаженному кончику бивня можно сказать, что сохранность цемента довольно низка, наблюдается расслоение конусов нарастания. Светло-серый цвет – признак сильного выветривания, т. е. бивень перед захоронением какое-то время пролежал на открытом воздухе и под прямыми лучами солнца.

Костные остатки мамонта залегали на высоте 10–12 м от уровня воды, высота самого берега составляет около 15–20 м. Берег состоит из песка, супеси и галечника. К нашему приезду многие остатки были унесены паводковыми водами. К такому выводу мы пришли по причине того, что мамонт залегал передней, лицевой стороной черепа к берегу, т. е. в грунте находилась только передняя часть, соответственно задняя часть была утеряна (рис.5).

Нашей основной задачей была найти коренные зубы животного для определения последнего до вида. Но, к сожалению, ни один зуб не был найден ни на берегу, ни на обломках черепа.

Залегание первичное, признаки перезахоронения отсутствуют, кости расположены довольно близко друг от друга. Кроме того, сохранность костей довольно хорошая, нет окатанности.

Материал и методика

На местонахождении заложили геологический разрез на уровне залегания мамонта. Вся прибрежная почва, видимо, сползла сверху вниз. Горизонты очень тонкие и частые, толщина от 1,5 до 21,0 см. Ниже расположен галечный слой,

смешанный с крупнозернистым песком. Возможно, местонахождение имеет аллювиальный характер образования.

Костные остатки Даппарайских мамонтов принадлежали трем особям. К первой особи с полевым номером ДпМ № 1 относится 16 костей: лопатка, локтевая кость, ребра, позвонки, большая берцовая кость и крестец. От второй особи ДпМ № 2 найдено семь костей: правая плечевая кость, лучевая кость, поясничные позвонки, тазовая кость, правая бедренная кость, правая большая берцовая кость. К третьей особи ДпМ № 3 относятся девять костей: нижняя челюсть, шейный позвонок, грудной позвонок, поясничный позвонок, плечевая кость, локтевая кость, лучевая кость, бедренная кость, большая берцовая кость.

Для измерений использовали методику, разработанную В. Гаруттом и М.Беден [6, 7]. Кроме того, при измерении ребер и позвонков использовали собственную методику (рис. 6).

Проведено сопоставление промеров «Даппарайских» мамонтов ДпМ № 1, 2, 3 с таковыми Березовского, Таймырского и Гыданского мамонтов [8–10].

Сравнительные данные. Правая локтевая кость (ulna) – сохранность хорошая, трещин и сколов нет. Дистальный эпифиз выпал т.к. не прирос к диафизу, точнее, сидел на хрящевой подушке (рис. 7). Суставные концы костей некоторое время после начала окостенения остаются хрящевыми. Но затем в их толще появляются особые энхондральные очаги окостенения – эпи-

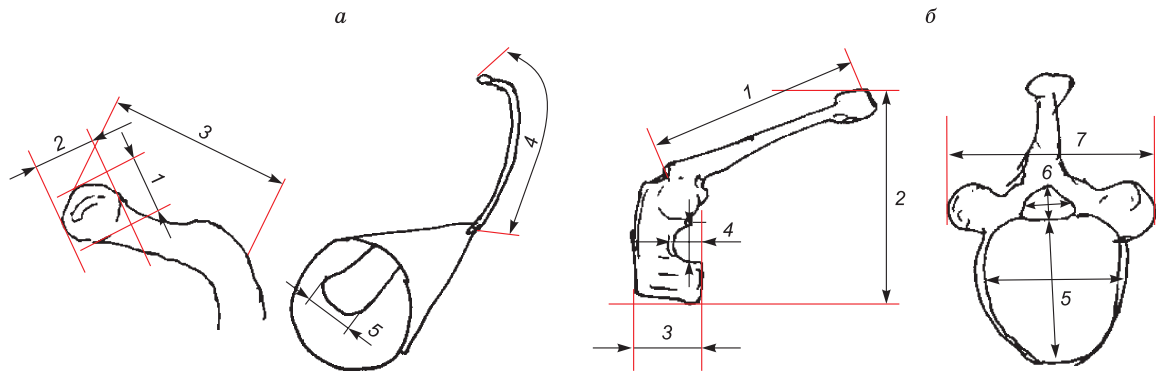


Рис. 6. Схема измерения ребер (а): 1 – ширина суставной головки ребра (caput costae); 2 – высота суставной головки ребра (caput costae); 3 – длина от бугра (tuberculum costae) до суставной головки (caput costae); 4 – длина ребра по дуге; ширина дистального конца ребра и позвонков (б): 1 – длина остистого отростка; 2 – высота позвонка; 3 – передне-задняя длина тела позвонка; 4 – диаметр суставной впадины (ребра); 5 – диаметр тела позвонка; 6 – диаметр неврального отверстия; 7 – максимальная ширина.

Fig. 6. Rib measurement scheme (а): 1 – width of the articular head of the rib (caput costae); 2 – height of the articular head of the rib (caput costae); 3 – length from the tubercle (tuberculum costae) to the articular head (caput costae); 4 – rib length along an arc; width of the distal end of the rib and vertebrae (б): 1 – length of the spinous process; 2 – vertebra height; 3 – anteroposterior vertebral body length; 4 – diameter of the articular cavity (ribs); 5 – vertebral body diameter; 6 – diameter of the neural opening; 7 – maximum width).



Рис. 7. Локтевая кость мамонта ДпМ № 1: а – вид с латеральной стороны; б – вид с краниальной стороны; в – вид с каудальной стороны.

Fig. 7. Ulnar bone of mammoth DpM No. 1: а – view from the lateral side; б – view from the cranial side; в – caudal view.

Промеры локтевой кости

Table 1

Measurement of the ulna

Промеры (мм) Measurements (mm)	ДпМ № 2 DpM No. 2	ДпМ № 1 DpM No. 1	Березовский мамонт ЗИН 5316 [8] Berezovsky mammoth [8]	Таймырский п-ов; ЗИН [6] Taimyr mammoth [6]	Гыданский п-ов, р.Юрибей, ПИН 3941 [10] Gydansky mammoth [10]
Минимальный медиально-латеральный диаметр Minimal medial lateral diameter	100	105	103	89	83
Медиально-латеральный диаметр дистального конца диафиза Medial-lateral diameter of the distal end of the diaphysis.	150	170	—	—	—
Длина диафиза Diaphysis length	540	610	717	—	—
Длина от локтя до проксимальной сочленовой поверхности Length from elbow to proximal articulated surface	—	—	—	—	—
Максимальная длина Maximal length	765	—	717	655	—
Ширина латеральной сочленовой фасетки Width of lateral articulated facet	60	65	63	—	56
Ширина медиальной сочленовой фасетки The width of the medial articular facet	113	110	91	—	94
Ширина сочленовой поверхности Articulated Width	220	230	—	—	—
Ширина Локтевого отростка Elbow Process Width	100	102	175	—	220

физы. Они состоят из губчатого вещества. По мере замещения хряща эпифиз сближается с метафизом, но прослойка хряща, отделяющая эпифиз от метафиза, несмотря на постоянное разрушение и замещение костной тканью, сохраняется еще в течение длительного срока, благодаря усиленному размножению хрящевых клеток. Так поддерживается рост костей в длину [11].

Кости имеют ту цветовую гамму почв, в которых залежали. Кроме того, на поверхности всех исследуемых костей наблюдаются пятна ожелезнения.

Промеры представлены в таблице 1.

Левая лопатка мамонта (scapula) – сохранность средняя, имеются повреждения на заднем крае. Цвет аналогичен локтевой кости, т. е. кости залежали в одном горизонте. Верхний край ло-

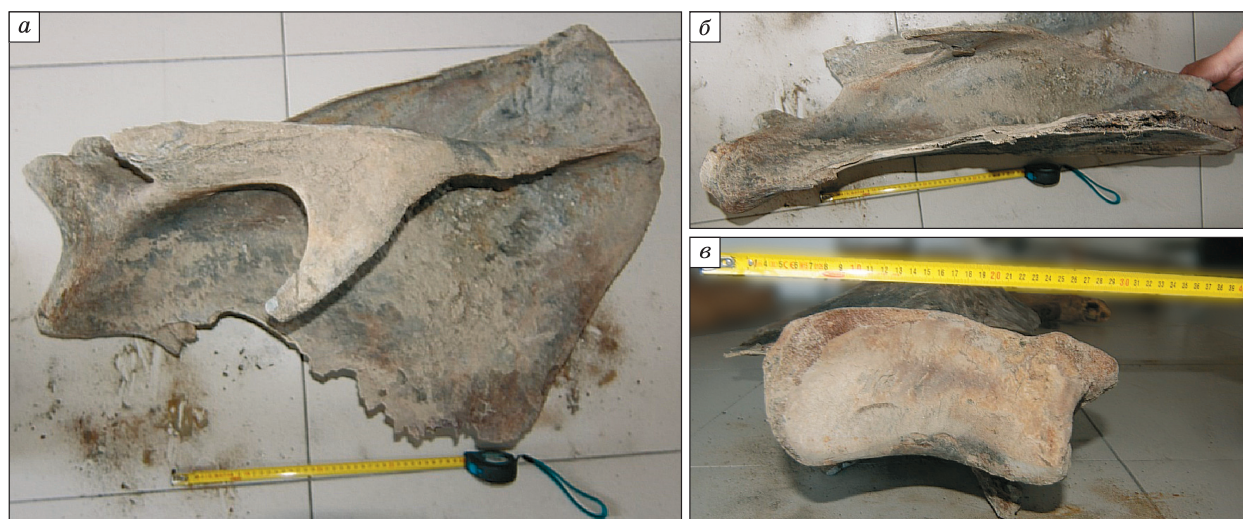


Рис. 8. Левая лопатка мамонта ДпМ № 1: *a* – вид с латеральной стороны; *б* – вид с краниальной стороны; *в* – вид на гленоидную впадину.

Fig. 8. The left shoulder of the mammoth DpM No. 1: *a* – view from the lateral side; *б* – view from the cranial side; *в* – view of the glenoid cavity.

патки (*margo thoracalis*) имеет форму зазубрин, что свидетельствует о том, что на ней был еще не окостеневший хрящ (рис. 8). Размеры лопатки представлены в табл. 2.

Судя по морфометрическим данным, лопаточная кость, как и локтевая кость, входит в диапазон размеров шерстистых мамонтов – *Mammuthus primigenius*.

Таблица 2

Промеры лопатки

Table 2

Scapula measurements

Промеры (мм) Measurements (mm)	ДпМ №1 DpM №1	Березовский Мамонт ЗИН 5316 [6] Berezovsky mammoth [6]	Таймырский п-ов; ЗИН [8] Taimyr mammoth [8]	Гыданский п-ов, р. Юрибей, ПИН 3941 [10] Gydansky mammoth [10]
Максимальная длина лопатки Maximum blade length	840	–	778	574
Длина лопатки до середины гленоидной впадины The length of the scapula to the middle of the glenoid cavity	780	759	750	546
Ширина верхнего края Top edge width	550	–	–	–
Ширина заднего края Trailing edge width	–	–	–	–
Максимальная ширина головки Maximum head width	195	191	190	154
Ширина шейки Neck width	220	221	204	173
Максимальная ширина лопатки Maximum scapula width	500	665	690	530



Рис. 9. Грудные позвонки ДпМ №1.

Fig. 9. Thoracic vertebrae DpM No. 1.

На местонахождении были найдены и собраны четыре грудных позвонка этого же мамонта, т. е. от одной особи. У мамонта 19 грудных позвонков, найденный материал состоит из 3-го, 13-го, 14-го и 17-го позвонков. Цвет у всех идентичен с другими костями животного (рис. 9). Размеры позвонков представлены в табл. 3.

Ребра (costae) – на местонахождении были найдены 10 ребер, 4 правых и 6 левых. Сохранность ребер удовлетворительная (рис. 10). Размеры представлены в таблице 4.

Левая большая берцовая кость (tibia) – сохранность хорошая, цвет идентичный с другими костями. Дистальный эпифиз не сохранился, как и у локтевой кости. Данная особенность говорит о молодом возрасте животного, т.е. мамонт мог еще вырасти (рис. 11). Промеры представлены в табл. 5.

В школьном музее хранятся остатки шерстистого мамонта, найденного в 60-х годах XX столетия, местонахождение не известно. Эти кости были перевезены из старого поселка. Из конечно-

Таблица 3

Промеры грудных позвонков ДпМ № 1

Table 3

Measurements of the thoracic vertebrae DpM № 1

Промеры (мм) Measurements (mm)	3-й third	13-й thirteenth	14-й fourteenth	17-й seventeenth
Высота позвонка Vertebra height	34,0	43,0	40,5	21,5
Длина остистого отростка Spinous process length	46,0	39,0	39,0	29,0
Переднезадняя длина тела позвонка Anteroposterior vertebral body length	78,0	6,0	6,0	7,5
Диаметр суставной впадины The diameter of the articular cavity	6,0/3,5	6,9/3,7	6,1/4,4	6,0/3,5
Максимальная ширина Maximum width	12,0/15,0	13,3/11,8	11,8/12,4	10,3/10,0
Диаметр тела позвонка Vertebral body diameter	8,0/9,0	6,5/4,4	5,2/6,0	5,6/4,8
Диаметр неврального отверстия Neural Hole Diameter	31,5	28,0	26,0	22,0



Рис. 10. Ребра мамонта ДпМ № 1.

Fig. 10. Ribs of mammoth DpM No. 1.

стей присутствуют левая плечевая кость, лучевая кость, им присвоен полевой номер ДпМ-№2.

Тазовая кость мамонта (pelvis) – разделена на два фрагмента, седалищная кость частично разрушена. Цвет серый, местами коричневый. На

крыльях подвздошной кости имеются повреждения в виде сколов и отверстий (рис. 12).

Правая бедренная кость мамонта (femur) – на дистальном и проксимальном концах имеются сильные повреждения, возможно, погрызы хищ-

Таблица 4

Промеры грудных позвонков

Table 4

Measurements of the thoracic vertebrae

Промеры (мм) Measurements (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина суставной головки Articular Head Width	49	50	43	43	–	49	53	64	–	–
Высота суставной головки Articular head height	32	23	20	30	–	56	54	50	–	–
Длина от реберного бугра до края суставной головки Length from rib tuber to the edge of the articular head	90	160,3	160	190	–	100	110	120	–	–
Длина ребра по дуге Arc length	970	87	18	105	106	122	126	74	–	–
Ширина дистальной части Distal Width	39	49	37	34	38	48	52	65	–	–



Рис. 11. Большая берцовая кость мамонта ДпМ № 1: *а* – вид с краниальной стороны; *б* – вид с медиальной стороны; *в* – вид с каудальной стороны.

Fig. 11. The tibia of mammoth DpM No. 1: *a* – view from the cranial side; *б* – view from the medial side; *в* – caudal view.



Рис. 12. Тазовая кость шерстистого мамонта ДпМ № 2.

Fig. 12. The pelvic bone of the woolly mammoth DpM No. 2.

Промеры большой берцовой кости

Table 5

Measurements of the tibia

Промеры (мм) Measurements (mm)	ДпМ № 1 DpM № 1	ДпМ № 2 DpM № 2	ДпМ № 3 DpM № 3	Березовский мамонт ЗИН 5316 [6] Berezovsky mammoth [6]	Таймырский п-ов; ЗИН [8] Taimyr mammoth [8]	Гыданский п-ов, р. Юрибей, ПИН 3941 [10] Gydansky mammoth [10]
Медиально-латеральный диаметр проксимального конца Medial lateral diameter of the proximal end	210	210	210	216	226	170
Минимальный медиально- латеральный диаметр диафиза Minimal medial-lateral diameter of the diaphysis	90	100	95	88	89	72
Медиально-латеральный диаметр дистального конца Medial lateral diameter of the distal end	175	140	180	169	159	140
Длина диафиза Diaphysis length	590	540		626	552	491



Рис. 13. Фрагменты скелета шерстистого мамонта ДпМ № 2: 1 – плечевая кость; 2 – большая берцовая кость; 3 – лучевая кость; 4 – бедренная кость; 5 – поясничные позвонки.

Fig. 13. Fragments of the skeleton of the woolly mammoth DpM No. 2: 1 – humerus; 2 – tibia; 3 – radius; 4 – thigh bone; 5 – lumbar vertebrae.



Рис.14. Части скелета мамонта ДпМ № 3 возле берегового обнажения пересохшего руч. Даппарай.

Fig. 14. Parts of the skeleton of the mammoth DpM No. 3 near the outcrop of the dried-out Dapparay creek bank.

ных животных. Цвет серый, местами коричневый (рис. 13, 4).

Правая большая берцовая кость (tibia) – сохранность хорошая, повреждений нет. Дистальный и проксимальный эпифизы приросли к диафизу и облитерировались, т. е. животное прекратило свой рост (рис. 13, 2).

Лучевая кость (radius) – дистальный конец обломан, имеются продольные трещины, как следствие выветривания (рис. 13, 3).

Правая плечевая кость (humerus) – сохранность неудовлетворительная, имеются глубокие и длинные продольные трещины, в некоторых участках кости откололась поверхностная костная ткань, обнажив губчатую структуру кости (рис. 13, 1).

Поясничные позвонки (vertebrae lumbales) – хорошей сохранности, апофизы и суставные диски приросли к телу позвонка, т.е. животное прекратило свой рост (рис. 13, 5).

Третий по счету мамонт (ДпМ № 3), был обнаружен нами в окрестностях поселка, в русле одноименной пересохшей речки, впадающей в р. Лена. Кости были изъяты из берегового обрыва высотой около 2–3 м (рис. 14).

На местонахождении были обнаружены локтевая кость, лучевая кость, плечевая кость, бедренная кость, большая берцовая кость, грудной позвонок, поясничный позвонок, шейный позвонок и нижняя челюсть. Все кости принадлежали одной пожилой особи, так как дистальные эпифизы костей конечностей облитерированы, суставные диски приросли к телу позвонков, нижняя челюсть в угловой части имеет костные наросты, присущие, обычно, старым особям мамонтов.

Обсуждение

По предварительным результатам морфометрических исследований можно сказать, что Даппарайские мамонты (ДпМ № 1, 2, 3) относятся к виду *Mammuthus primigenius*. Индивидуальный возраст мамонтов старше 40 лет. Из-за отсутствия зубов нельзя установить более точный биологический возраст. Морфологические параметры изученных костей указывают на то, что они принадлежат взрослым особям, достигшим максимального для них роста. Сохранность костей относительно хорошая, от скелетов сохранились примерно 25–30 % костей.

Находки частей скелетов шерстистых мамонтов в южной части Якутии имеют большое значение для науки из-за редкости подобных находок. Сравнение морфометрических показателей мамонтов из различных мест их ареала от верховьев Лены до Колымы и Гыданского полуострова указывают на их соразмерность. Это может свидетельствовать о том, что природно-климатические условия на большей части ареала мамонтов были схожи, и в позднем плейстоцене широтная градиация температурных характеристик была менее дифференцирована, чем в настоящее время.

Литература

1. Боесков Г.Г., Мащенко Е.Н. Систематическое положение «Суольского» мамонта (*Mammuthus, proboscidea*) // Наука и образование. № 2. 2014. С. 48–54.
2. Плотников В.В., Боесков Г.Г., Бакулина Н.Т., Протопопов А.В., Находка части скелета мамонта в окрестностях п. Хандыга // Наука и образование. 2012. № 1. С. 90–95.

3. Плотников В.В., Протопопов А.В., Колесов С.Д. Соморсунские мамонты (*Mammuthus primigenius* (blum.)): тафономические и биологические интерпретации // Наука и образование. 2013. № 1 (69). С. 86–93.
4. Лазарев П.А. Крупные млекопитающие антропогена Якутии. Новосибирск: Наука, 2008. 160 с.
5. Белолобский И.Н., Боесков Г.Г., Сергеев А.И., Томишин М.Д. Каталог коллекции четвертичных млекопитающих геологического музея Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2008. 204 с.
6. Гарутт В.Е. Южный слон *Archidiskodon meridionalis* (Nesti) из плиоцена северного побережья Азовского моря // Труды комиссии по изучению четвертичного периода. Т. 10, № 2. 1954. С. 1–76.
7. Beden M. Family Elephantidae // Koobi-Fora research project / Ed. J.M. Harris. Oxford: Clarendon Press. 1983. P. 40–76.
8. Зеленский В.В. Остеологические и одонтографические исследования над мамонтом (*Elephas primigenius* Blum) и слонами (*El. Indicus* и *El. Africanus* Blum) // Научные результаты экспедиции, снаряженной Имп. Академией наук для раскопки мамонта, найденного на р. Березовке в 1901 г. СПб., 1903 г. Т. 1. С. 1–124.
9. Гарутт В.Е., Дубинин В.Б. О скелете таймырского мамонта // Зоологический журнал. 1951. Т. 30, вып. 1. С. 17–24.
10. Юрибейский мамонт. / под ред. В.Е. Соколова. М.: Наука, 1982. 160 с.
11. Акаевский А.И., Боголюбовский С.Н., Воккен Г.Г. и др. Анатомия домашних животных: Учеб. пособие для зоотехн. и вет. вузов и фак. В 3 ч. / Под ред. проф. А. И. Акаевского и др. М: Высш. школа, 1961. 391 с.

Поступила в редакцию 22.03.2020

Принята к публикации 22.05.2020

Об авторе

КЛИМОВСКИЙ Айсен Иванович, научный сотрудник, Отдел изучения мамонтовой фауны, Академия наук Республики Саха (Якутия). 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, ORCID 0000-0002-2258-9173, aisen87@mail.ru.

Информация для цитирования

Климовский А.И. Костные остатки шерстистого мамонта *mammuthus primigenius* из окрестностей с. Даппарай, Олекминский район, Южная Якутия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 2. С. 69–?. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-5>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-5

The bone remains of *Mammuthus primigenius* from the vicinity of Dapparay village, Olekminsky District, Southern Yakutia

A.I. Klimovsky

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia
aisen87@mail.ru

Abstract. The article presents the data on the new findings of the remains of a woolly mammoth (*Mammuthus primigenius* Blumenbach, 1799) found in the Olekminsky district of Yakutia. In the summer of 2018, parts of the skeletons of woolly mammoths were found in the area of Legentei Oyogoso and on the banks of the Dapparay Creek. Findings of Late Pleistocene animals in the south-east of Yakutia are quite rare, and for this reason the Dapparay mammoths are of great interest to science. Measurements of thirty two bones belonging to three mammoths were carried out. The morphometric characteristics of the Dapparay mammoths were compared with the measurements of the bones of the Berezovsky, Taimyr and Gydan mammoths. Based on the results of comparative studies of morphometric indicators, it was concluded that the mam-

moths that lived in southern Yakutia did not have significant differences from their northern relatives. This may indicate more or less uniform climatic conditions in their habitat zone.

Key words: location, woolly mammoth, bone remains, mammoth fauna, central, southern Yakutia, Dapparay, Late Pleistocene.

Acknowledgements. *This work was supported by the RFBR grant 18-45-140007 p_a*

References

1. Boeskorov G.G., Mashhenko E.N. Sistematischeskoe polozhenie "Suol'skogo" mamonta (*Mammuthus, proboscidea*) // Nauka i obrazovanie. 2014. No. 2. P. 48–54.
2. Plotnikov V.V., Boeskorov G.G., Bakulina N.T., Protopopov A.V. Naxodka chasti skeleta mamonta v okrestnostyax p. Xandy'ga // Nauka i obrazovanie. 2012. No. 1. P. 90–95.
3. Plotnikov V.V., Protopopov A.V., Kolesov S.D. Somorsunskie mamonty' (*Mammuthus primigenius* (blum.)): tafonomicheskie i biologicheskie interpretacii // Nauka i obrazovanie. 2013. No. 1 (69). P. 86–93.
4. Lazarev P.A. Krupny'e mlekopitayushhie antropogena Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2008. 160 p.
5. Belolyubskij I.N., Boeskorov G.G., Sergeenko A.I., Tomshin M.D. Katalog kollekcii chetvertichny'x mlekopitayushhix geologicheskogo muzeya instituta geologii almaza i blagorodny'x metallov SO RAN. Yakutsk: YaNCz SO RAN, 2008. 204 p.
6. Garutt V.E. Yuzhny'j slon Archidiskodon meridionalis (Nesti) iz pliocena severnogo poberezh'ya Azovskogo morya. Trudy' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda. 1954. Vol. 10, No. 2. 1954. P. 1–76.
7. Beden M. Family Elephantidae // Koobi-Fora research project / Ed. J.M. Harris. Oxford: Clarendon Press. 1983. P. 40–76.
8. Zelenskij V.V. Osteologicheskie i odontograficheskie issledovaniya nad mamontom (*Elephas primigenius* Blum) i slonami (*El. Indicus* i *El. Africanus* Blum)/ Zelenskij V. V. // Nauchnye rezul'taty' ekspedicii, snaryazhennoj Imp. Akademiej nauk dlya raskopki mamonta, najdenogo na r. Berezovke v 1901 g. Spb., 1903. Vol. 1. P. 1–124.
9. Garutt V.E., Dubinin V.B. O skelete tajmy'nskogo mamonta // Zoologicheskij zhurnal. 1951. Vol. 30. Iss. 1. P. 17–24.
10. Yuribejskij mamont / pod red. V.E. Sokolova. M.: Nauka, 1982. 160 p.
11. Akaevskij A.I., Bogolyubskij S.N., Vokken G.G. et al. Anatomiya domashnich zhivotnyh. Ucheb. posobie dlya zootexn. i vet. vuzov i fak. v 3 ch. / Pod red. prof. A. I. Akaevskogo i dr. M.: Vyssh. shkola, 1961. 391 p.

About the author

KLIMOVSKY Aisen Ivanovich, Researcher, Department of Study of Mammoth Fauna, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenin ave., Yakutsk, 677007, Russia, ORCID ID 0000-0002-2258-9173, aisen87@mail.ru.

Citation

Klimovsky A.I. The bone remains of *Mammuthus primigenius* from vicinity of village Dapparay, Olekminsky District, Southern Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, N 2. P. 69–82. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-5>

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-6

О геокриологической изученности южной части Западной Якутии

С.П. Готовцев, И.В. Климовский

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия
gotovcev@mpi.ysn.ru

Аннотация. Рассматривается геокриологическая изученность юга Западной Якутии, территория которой примыкает к району хорошо освоенных алмазных месторождений республики. Геокриологические условия их детально изучены. В большинстве месторождений установлено наличие глубокой криолитозоны с нестационарным температурным полем. Причем по мере приближения к югу мощность криолитозоны резко уменьшается, происходит переход в зону островной и прерывистой криолитозоны. В этом плане зона перехода требует дополнительного геокриологического изучения. Кроме того, в настоящее время на юге Западной Якутии происходит интенсивное освоение месторождений нефти и газа. Большинство объектов добычи транспортировки и переработки углеводородного сырья расположены на территории, представляющей зону островного и прерывистого распространения многолетнемерзлых горных пород. Если в зоне сплошного распространения ММП основная задача инженерно-геокриологических исследований состоит в изучении морфологии и температуры криолитозоны, то в этих районах особую актуальность приобретают проблема выявления «островов» многолетнемерзлых пород и оценка их криогенного строения.

Ключевые слова: геокриологические условия, многолетнемерзлые породы, гидрогеокриологические исследования, островная и прерывистая мерзлота, мощность сезонноталого слоя.

Введение

В геокриологическом плане территория Западной Якутии изучена неравномерно. Более детально исследованы Ботуобинская седловина и южный склон Анабарской антеклизы, в пределах которых в течение последних более 50 лет ведется освоение коренных месторождений алмазов: трубок Мир, Интернациональная, Айхал, Сытыканская, Юбилейная, Удачная, Зарница и других. Благодаря комплексным гидрогеокриологическим и геотермическим исследованиям, проведенным на территориях этих месторождений, выявлены основные закономерности формирования геокриологических условий региона [1–5]. Кроме того, в пределах данного региона была установлена самая большая мощность криолитозоны на Земле [6].

В настоящее время осваиваемая часть Якутской алмазоносной провинции является относительно хорошо изучена, хотя ее южная часть в геокриологическом отношении исследована пока относительно слабо.

Изученность геокриологических условий юга Западной Якутии

Изученность геокриологических условий южной части Западной Якутии также связана со становлением алмазодобывающей промышленности в этом регионе. Как известно, с открытием трубки Мир Институтом мерзлотоведения АН СССР была организована комплексная Вилюйская экспедиция, основной целью которой являлось всестороннее изучение геокриологических условий территории строительства будущего карьера и города Мирный. В первый же год работы экспедиция направила один отряд под руководством Т.Н. Жестковой в с. Мухтуя (ныне г. Ленск) с целью изучения инженерно-геокриологических условий трассы автодороги Мухтуя–Мирный. В процессе проведения этих экспедиционных работ было установлено, что по мере приближения к р. Лена мерзлота практически исчезает и на высоких отметках появляются сосновые и кедровые леса высокого бонитета. Поэтому по ландшафтным признакам данная часть

Западной Якутии была отнесена к зоне островной и прерывистой мерзлоты [7].

На мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР [8] южная часть Западной Якутии входит в Приленскую увалистую провинцию, северная граница которой проходит по долине р. Нюя в среднем и нижнем ее течении. Она отнесена к зоне островного развития ММП, где температура горных пород варьирует в пределах от 0 до -1°C . Мощность сезонно-талого слоя (СТС) изменяется от 1,5 до 2,5 м, а сезонномерзлого – от 2,5 до 3,5 м.

Впервые детальные геокриологические исследования в пределах рассматриваемого района были проведены в 1952 г. Ленским отрядом Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения АН СССР под руководством В.И. Бияковой. В пределах долин рек Нюя и Лена были пробурены более двадцати скважин с замером температуры пород и отбором их образцов на влажность. Верхняя граница ММП не всегда вскрывалась скважинами и на этом основании были выделены два участка: южный – от устья р. Витим протяженностью 40–45 км и северный – ниже вдоль р. Лена.

Примерно в эти же годы долину верхнего течения р. Нижняя Тунгуска изучал Н.А. Граве. По характеру распространения ММП он выделил три типа мерзлоты. К третьему типу им отнесена островная мерзлота, приуроченная к листовничным лесам с плотным торфяно-моховым покровом. Им было установлено, что острова мерзлых пород чаще встречаются в надпойменных террасах и имеют температуру менее -1°C , а мощность их достигала 30–40 м [9].

В 1953–1954 гг. вдоль р. Нюя Всесоюзным агрогеологическим трестом проводились геологические работы. Методом вертикального электрозондирования изучалось распространение ММП. Для подтверждения геофизических данных было пройдено около 15 шурфов глубиной от 1,5 до 3,5 м. Анализ кривых ВЭЗ и материалы горных выработок позволили сделать вывод, что данный район характеризуется распространением многолетнемерзлых пород островного типа [10]. Примерно такие же данные были получены И.А. Тютюновым [11] на левобережье р. Лена, где ММП с температурой от $-0,2$ до $-0,7^{\circ}\text{C}$ приурочены к бровкам надпойменных террас и сильно затененным и заболоченным понижениям. Аналогичные выводы были сделаны В.А. Мошанским и А.В. Мулиной [12], которые проводи-

ли изыскательские работы для строительства трассы автодороги Мухтуя–Мирный.

Таким образом, в южной части Западной Якутии в пределах Лено-Нюйского водораздела установлено островное распространение многолетнемерзлых пород. Они слагают затененные и заболоченные участки, а также нижние части склонов рек, ручьев, днищ и логов. Такие участки на геокриологической карте [13, 14] отнесены к зоне прерывистого распространения ММП.

Изучением закономерностей формирования сезонно-талого слоя на территории южной части Западной Якутии занимался И.С. Васильев [15, 16]. Он разделял мнение М.И. Сумгина [17] о наличии в деятельном слое так называемого переходного слоя в условиях островного развития многолетнемерзлых пород. Анализируя данные метеорологических станций Ленск, Нюя и Олекминск, И.С. Васильев установил сроки начала и завершения процессов сезонного протаивания и сезонного промерзания грунтов. Сезонное протаивание мерзлых пород начинается в конце апреля–начале мая и завершается в конце сентября–начале октября. При этом темп протаивания от максимума составлял в конце мая, июня, июля и августа соответственно 30–40, 50–60, 70–80 и 90–95 %. Сезонное промерзание грунтов начинается в начале октября и завершается в конце марта – начале апреля. Формирование сезонномерзлого слоя происходило в следующем темпе: в конце октября, ноября, декабря, января, февраля, и марта соответственно: 15–20, 35–40, 55–60, 70–75, 85–90, 95–98 %. Полное протаивание сезонномерзлого слоя происходило в конце июля–начале августа.

Межгодовой разброс мощности сезонномерзлого слоя по наблюдениям за 1964–1968 гг. на площадке метеостанции Ленск составлял ± 87 см при средней мощности 354 см. Резкое увеличение мощности СМС в 1964–1968 гг. связано с уменьшением высоты снежного покрова и похолоданием зимних сезонов. С середины 70-х до первой половины 80-х годов XX в. намечилось увеличение как общего количества выпадающих атмосферных осадков, так и высоты снежного покрова. Для сведения напомним, что среднее годовое количество осадков в данном регионе составляет 350–450 мм, в отдельные годы уменьшаясь до 250 и увеличиваясь до 500 мм. Наибольшая декадная за зиму высота снежного покрова в среднем составляет 50–60 мм при разбросе от 30 до 80 см.

В обобщающих работах, характеризующих Среднюю Сибирь [18, 19], южная часть Западной Якутии характеризуется как территория островного развития многолетнемерзлых пород. При характеристике южных районов криолитозоны мерзловеды часто пользуются материалами геоботанической индикации [18–22] и др. По этим работам распространение талых пород маркируется по развитию смешанных высокобонитетных прямоствольных лесов из кедра, сосны, осины, ели, лиственницы и березы высотой более 24 м, где в подлеске присутствует рябина, а в напочвенном покрове – плауны куропаточий и сплюснутый, встречаемость кедра при этом составляет не менее 10 %. В смешанном лесу, при наличии кедра в составе древостоя менее 10 %, свидетельствует об относительно холодном его местообитании. На таких участках могут фиксироваться так называемые переходные сезонно-мерзлые слои.

Заключение

Южная часть Западной Якутии относится к зоне островного распространения многолетнемерзлых пород. Острова мерзлых пород в основном встречаются в четвертичных аллювиальных отложениях низких террас. Приурочены они к верховым сфагновым болотам, моховым ерникам, лиственничным зеленомошным редкосьям и сфагновым лиственничным редицам. Как известно, в районах островного распространения многолетнемерзлых пород строительство линейных сооружений имеет свою специфику. Смена участков с разными инженерно-геологическими условиями происходит здесь весьма резко. В связи с этим на таких участках необходимо проводить детальные инженерно-геокриологические исследования с целью районирования и составления специализированных инженерно-геологических и геокриологических карт, позволяющих оценить чувствительность (или устойчивость) территории к техногенным нагрузкам. Имея такие данные, уже на стадии проектирования можно дать предварительные рекомендации по инженерной защите сооружения от проявления опасных криогенных процессов.

Литература

1. Ефимов А.И. Новые данные о взаимосвязи поверхностных и подземных вод на одном из участков мощной зоны мерзлых горных пород // Труды СВО Института мерзлотоведения им. В.А. Обручева. Якутск. 1958. Вып. II. С. 79–87.
2. Ильина Е.В., Любомиров Б.Н., Тычино Н.Я. Подземные воды и газы Сибирской платформы. Л.: Гостоптехиздат, 1962. 290 с.
3. Косолапов А.И. Геохимические исследования природных вод и газов Западной Якутии. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 206 с.
4. Фотиев С.М., Данилова Н.С., Шевелева Н.С. Геокриологические условия Средней Сибири. М.: Наука, 1974. 148 с.
5. Романовский Н.Н. Некоторые особенности мерзлотно-гидрогеологического строения артезианских бассейнов открытого типа в области многолетней мерзлоты // Мерзлотные исследования. 1968. Вып. 8. С. 89–111.
6. Мельников П.И. О глубине промерзания верхней зоны земной коры на территории Якутской АССР // Геотермические исследования и использование тепла Земли. М.: Наука, 1966. С. 110–113.
7. Жесткова Т.Н. Сезонное промерзание и протавивание грунтов в районе будущей дороги Мухтуя–Мирный // Сборник статей по общему мерзлотоведению. Т. XVI. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 116–127.
8. Мерзлотно-ландшафтная карта Якутской АССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. П. И. Мельникова. М.: ГУГК, 1991. 2 л.
9. Граве Н.А. Вечная мерзлота в долинах рек юго-западной части Средне-Сибирского плоскогорья // Тр. Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева. 1952. Т. 10. С. 169–173.
10. Назаров Г.И. К вопросу о распространении многолетнемерзлых пород на водоразделе Нижней и Подкаменной Тунгусок и в бассейне р. Нюи // Тр. Ин-та мерзлотоведения им. В.А. Обручева. 1959. Т. 15. С. 194–211.
11. Тютюнов И.А. Инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых скальных пород в районе трубки «Мир» // Исследование по физике и механике мерзлых грунтов. Вып. 4. М.: АН СССР, 1961. С. 216–241.
12. Мощанский В.А., Мулина А.В. Некоторые данные о строении верхней части многолетнемерзлой толщи в пределах Лено-Вилуйского водораздела // Мерзлотные исследования. 1961. Вып. II. С. 115–128.
13. Баранов И.Я. Геокриологическая карта СССР масштаба 1: 5 000 000. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
14. Схематическая геокриологическая карта Якутской АССР. Масштаб 1:5 000 000 (Вкладка) / Сост. Мельников П.И. // Гидрогеология СССР. Т. XX: Якутская АССР. М.: Недра, 1970.
15. Васильев И.С. Особенности формирования пезрезимка на Приленском плато // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии. Якутск, 1983. С. 72–79.
16. Васильев И.С. Пространственно-временные закономерности формирования деятельного слоя в ландшафтах Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 2005. 228 с.

17. Фотиев С.М. Закономерности формирования и распространения таликов на территории Сибирской платформы. // Труды ПНИИИС. Т. 2. М., 1970.
18. Фотиев С.М., Данилова Н.С., Шевелева Н.С. Геокриологические условия Средней Сибири. М.: Наука, 1974. 148 с.
19. Вейсман Л.И. Особенности ландшафтно-индикационных исследований криогенных процессов // Криогенные процессы. М.: Наука, 1978. С. 19–32.
20. Кондратьева К.А., Лазукова Г.Г. Роль растительного покрова как одного из признаков выделения микрорайонов в целях мерзлотного крупномасштабного картирования (на примере района Вилуйской ГЭС) // Мерзлотные исследования. 1963. Вып. III. С. 63–72.
21. Поздняков Л.К. О влиянии растительности на глубину летнего оттаивания почвы // Сборник работ по геоботанике, лесоведению, палеогеографии и флористике. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. С. 425–430.
22. Тыртиков А.П. Влияние растительного покрова на промерзание и протаивание грунтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. 192 с.
23. Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука, 1979. 116 с.
24. Шац М.М. Геокриологические проблемы Среднеобитовинского месторождения (Западная Якутия) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 3. С. 205–213.
25. Сухорукова А.Ф. Геокриологические условия трассы трубопровода «Сила Сибири» (Красноярский край, Иркутская область, Республика Саха). // XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.): Сборник материалов в 6 т. 2018. Т. 1. С. 32–39.

Поступила в редакцию 19.02.2020

Принята к публикации 14.05.2020

Об авторах

ГОТОВЦЕВ Семен Петрович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Общей геокриологии, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, gotovcev@mpi.ysn.ru;

КЛИМОВСКИЙ Игорь Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, mpi@ysn.ru.

Информация для цитирования

Готовцев С.П., Климовский И.В. О геокриологической изученности южной части Западной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 2. С. 83–88. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-6

On the geocryological studies on the southern part of western Yakutia

S.P. Gotovtsev, I.V. Klimovsky

P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
gotovcev@mpi.ysn.ru

Abstract. The article examines the geocryological studies of the southern part of Western Yakutia, the territory of which is adjacent to the area of well-developed diamond deposits of Yakutia. The geocryological conditions of diamond deposits have been studied in detail. In most fields, the presence of a deep cryolithozone with a non-stationary temperature field was revealed. Cryolithozone thickness drastically decreases in the southern direction and passes into island and intermittent cryolithozone. In this regard, the transition zone requires additional geocryological study. In addition, there is currently intensive development of oil and gas

fields in the south of Western Yakutia. Most of the hydrocarbon transportation and processing facilities are located at the territory representing the zone of island and intermittent spread of permafrost rocks. While the main task of engineering and geocryological research in the continuous permafrost zone is to study the morphology and temperature of cryolithozone, in the areas under study the problem of identifying 'islands' of permafrost rocks and assessing their cryogenic structure becomes particularly relevant.

Key words: geocryological conditions, permafrost rocks, hydrogeocryological research, island and intermittent permafrost, the depth of seasonal thaw.

References

1. Efimov A.I. Novye dannye o vzaimosvyazi pov-
erxnostnyx i podzemnyx vod na odnom iz uchastkov
moshnoy zony merzlyx gornyx porod // Trudy SVO In-
stituta merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva. Yakutsk,
1958. Vyp. II. P. 79–87.
2. Ilina E.V., Lyubomirov B.N., Tychino N.Ya. Pod-
zemny'e vody i gazy Sibirskoj platformy. L.: Gostop-
texizdat, 1962. 290 p.
3. Kosolapov A.I. Geoximicheskie issledovaniya pri-
rodnix vod i gazov Zapadnoj Yakutii. M.: Izd-vo AN
SSSR, 1963. 206 p.
4. Fotiev S.M., Danilova N.S., Sheveleva N.S. Geo-
kriologicheskie usloviya Srednej Sibiri. M.: Nauka,
1974. 148 p.
5. Romanovskij N.N. Nekotorye osobennosti merzlot-
no-gidrogeologicheskogo stroeniya artziyanskih basse-
jnov otkrytogo tipa v oblasti mnogoletnej merzloty //
Merzlotnye issledovaniya. 1968. Vyp. 8. P. 89–111.
6. Melnikov P.I. O glubine promerzaniya verxnej
zony zemnoj kory na territorii Yakutskoj ASSR // Ge-
otermicheskie issledovaniya i ispolzovanie tepla Zemli.
M.: Nauka, 1966. P. 110–113.
7. Zhestkova T.N. Sezonnoe promerzanie i protaivanie
gruntov v rajone budushhej dorogi Mux TUYA-Mirnyj //
Sbornik statej po obshhemu merzlotovedeniyu. Vol. XVI.
M.: Izd-vo AN SSSR, 1960. P. 116–127.
8. Merzlotno-landshaftnaya karta Yakutskoj ASSR
masshtaba 1:2 500 000 / Pod red. P.I. Melnikova. M.:
GUGK, 1991. 2 l.
9. Grave N.A. Vechnaya merzlota v dolinax rek yugo-
zapadnoj chasti Sredne-Sibirskogo ploskogorya // Tr. In-
ta merzlotovedeniya im. V.A. Obrucheva. 1952. Vol. 10.
M. P. 169–173.
10. Nazarov G.I. K voprosu o rasprostranении mnogo-
letnemerzlyx porod na vodorazdele Nizhnej i Podka-
mennoj Tungusok i v bassejne r. Nyui // Trudy in-ta merz-
lotovedeniya im. V.A. Obrucheva. 1959. Vol. 15.
P. 194–211.
11. Tyutyunov I.A. Inzhenerno-geologicheskie oso-
bennosti mnogoletnemerzlyx skalnyx porod v rajone
trubki «Mir» // Issledovaniya po fizike i mexanike merz-
lyx gruntov. Vyp. 4. M.: AN SSSR, 1961. P. 216–241.
12. Moshhanskij V.A., Mulina A.V. Nekotorye dannye
o stroenii verxnej chasti mnogoletnemerzloy tolshhi v
predelakh Leno-Vilyujskogo vodorazdela // Merzlotnye
issledovaniya. 1961. Iss. II. S. 115–128.
13. Baranov I.Ya. Geokriologicheskaya karta SSSR
masshtaba 1: 5 000 000. M.: GUGK, 1977. 4 l.
14. Schematicheskaya geokriologicheskaya karta Ya-
kutskoj ASSR. Masshtab 1:5 000 000 (Vkladka) / Sost.
Melnikov P.I. // Gidrogeologiya SSSR. Vol. XX: Yakuts-
kaya ASSR. M.: Nedra, 1970.
15. Vasilev I.S. Osobennosti formirovaniya perezim-
ka na Prilenskom plato // Regionalnye geokriologich-
eskie issledovaniya v Vostochnoj Azii. Yakutsk, 1983.
P. 72–79.
16. Vasilev I.S. Prostranstvenno-vremennyye zakono-
mernosti formirovaniya deyatel'nogo sloya v landshaftah
Zapadnoj Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 2005. 228 p.
17. Fotiev S.M. Zakonomernosti formirovaniya i ras-
prostraneniya talikov na territorii Sibirskoj platformy //
Trudy PNIIS. Vol. 2. M., 1970.
18. Fotiev S.M., Danilova N.S., Sheveleva N.S.
Geokriologicheskie usloviya Srednej Sibiri. M.: Nauka,
1974. 148 p.
19. Vejsman L.I. Osobennosti landshaftno-indika-
cionnyx issledovanij kriogennyx processov // Kriogen-
nye processy. M.: Nauka, 1978. P. 19–32.
20. Kondrat'eva K.A., Lazukova G.G. Rol rastitel'no-
go pokrova kak odnogo iz priznakov vydeleniya mikro-
rajonov v celyah merzlotnogo krupnomasshtabnogo kar-
tirovaniya (na primere rajona Vilyujskoj GES) // Merz-
lotnye issledovaniya. 1963. Iss. III. P. 63–72.
21. Pozdnyakov L.K. O vliyani rastitel'nosti na glu-
binu letnego ottaivaniya pochvy // Sbornik rabot po geo-
botanike, lesovedeniyu, paleogeografii i floristike. M.:
L.: Izd-vo AN SSSR, 1956. P. 425–430.
22. Tyrtikov A.P. Vliyanie rastitel'nogo pokrova na
promerzanie i protaivanie grun-tov. M.: Izd-vo Mosk.
un-ta, 1969. 192 P.
23. Tyrtikov A.P. Dinamika rastitel'nogo pokrova i
razvitie merzlotnyh form relefa. M.: Nauka, 1979. 116 p.
24. Shats M.M. Geokriologicheskie problemy Sred-
nebotuobinskogo mestorozhdeniya (Zapadnaya Yakuti-
ya) // Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidroge-
ologiya. Geokriologiya, 2012, No. 3. P. 205–213.
25. Sukhorukova A.F. Geokriologicheskie usloviya
trassy truboprovoda «Sila Sibiri» (Krasnoyarskij kraj,
Irkutskaya oblast', Respublika Saxa) // XIV Mezhduna-
narodnyj nauchnyj kongress (g. Novosibirsk, 23–27
aprelya 2018 g.): Sbornik materialov v 6 t. 2018. Vol. 1.
P. 32–39.

S.P. GOTOVTSEV, I.V. KLIMOVSKY

About the authors

GOTOVTSEV Semen Petrovich, candidate of geological and mineralogical sciences, head of laboratory, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, gotovcev@mpi.ysn.ru

KLIMOVSKY Igor Vladimirovich, candidate of geographical sciences, leading researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, mpi@ysn.ru

Citation

Gotovtsev S.P., Klimovsky I.V. On geocryological study of the southern part of Western Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020, Vol. 25, N 2. P. 83–88. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-6>

Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы

Р.В. Чжан, Н.А. Павлова, В.В. Огонеров, А.Л. Лобанов, М.В. Данзанова

Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
zhang@mpi.ysn.ru

Аннотация. Рассмотрен опыт возведения намывных массивов грунта в условиях криолитозоны для различных инженерных сооружений: оснований газонефтяных, промышленных и гражданских объектов, грунтовых гидротехнических сооружений, дорог и других. Особое внимание уделено технологии производства работ по созданию основания намывных грунтовых массивов на низкой пойме р. Лена под жилой комплекс г. Якутск (кварталы 202 и 203). Приведены результаты исследований динамики геокриологических условий этой территории в процессе многолетней эксплуатации зданий и инженерных сооружений. Выявлено, что на большей части территории 202 квартала г. Якутск, застройка которого проводилась в 1980-1990-х годах по I принципу, в настоящее время грунты имеют положительные температуры до глубины 10 м и более. На территории 203 квартала надмерзлотные водоносные талики, сформировавшиеся при проведении гидромеханизированных работ в 1990-х годах, спустя 30 лет продолжают повсеместно существовать. Рассмотрены факторы, способствующие сохранению надмерзлотных таликов в теле и основании намывных песчаных массивов. К главным факторам, определяющим формирование температурного поля грунтов, отнесены особые теплофизические свойства обезвоженных намывных песков в верхней части разреза и гидрогеологические условия территории. Проанализированы особенности и перспективы использования намывных грунтов в качестве оснований сооружений и принципы строительства на них. Для контроля и разработки обоснованных рекомендаций по обеспечению устойчивости сооружений рекомендовано организовать комплексный геокриологический мониторинг, включающий и экологические аспекты взаимодействия техногенных систем с окружающей средой.

Ключевые слова: криолитозона, грунт, основание, пойма реки, намывной массив, многолетнемерзлые породы, температура, строительство, здание, сооружение, мониторинг.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-05-00670).

Введение

Город Якутск – старейший и самый крупный в криолитозоне, расположен на левом берегу среднего течения р. Лена (рис. 1). Его площадь более 122 км², а население на 01.05.2019 г. составляет более 318 тыс. человек. В сентябре 2020 г. город отметит свое 388-летие. Интенсивный рост его населения с 1970-х годов и дефицит подходящих по инженерно-геологическим свойствам строительных площадок потребовали поиска новых площадей для расширения селитебной территории. В связи с этим встал вопрос об использовании для строительства низкой территории поймы р. Лена. Инженерную подготовку территории решили осуществить с помощью создания массива грунта методом гидромеханизации как наиболее дешевого способа.



Рис. 1. Общий вид г. Якутска (январь 2020 г).

Fig.1. General look of Yakutsk (January 2020).

К настоящему времени в пойменной и прибрежных частях р. Лена в г. Якутск построены и эксплуатируются следующие сооружения: Якутская ТЭЦ, возведенная в 30–40-х годах прошлого столетия; причальные стенки и здание речного порта; завод по ремонту тяжелой землеройной техники; городская дамба; ограждающие противопаводковые дамбы; два жилых микрорайона – 202 и 203 кварталы города. Все объекты, кроме 203 квартала, были запроектированы и построены по I принципу использования грунтов в качестве основания. Этот принцип подразумевает, что намывные и подстилающие грунты должны находиться в многолетнемерзлом состоянии в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружений. Однако в процессе многолетней эксплуатации под многими вышеперечисленными объектами грунты оснований постепенно приобрели положительную температуру и используются в оттаянном или оттаивающем состоянии (II принцип). Причин изменения строительного принципа использования грунтов много: техногенные утечки коммунальных и сточных вод под здания и сооружения; инфильтрация атмосферных осадков в основание сооружений; высокие отрицательные температуры грунтов на пойменной территории; гидравлическая связь городской протоки с основным руслом р. Лена; отепляющее влияние намывного массива на температурный режим грунтов основания; процессы криогенеза, в результате которого изменяются физико-механические и прочностные свойства намывного грунтового массива и другие. Как показали изыскания, инженерно-геокриологические условия низкой поймы и прилегающей первой надпойменной террасы оказались довольно сложными, особенно гидрогеологические – из-за многочисленных гидрогенных таликов различной мощности. Основной задачей выполненных исследований являлось обобщение результатов исследований процессов, происходящих в теле и основании намывных массивов, на которых возведены некоторые из вышеупомянутых сооружений.

Опыт создания намывных массивов в криолитозоне и использование их в качестве оснований сооружений

Способ возведения земляных сооружений средствами гидромеханизации вне зоны распространения многолетнемерзлых пород известен давно и успешно применяется как за рубежом, так и в

России [1–4]. Этот способ используется при строительстве судоходных и ирригационных каналов; дноуглублении рек; возведении плотин и речных сооружений; добыче строительных материалов – песка и гравия; устройстве полотна дорог и оснований взлетно-посадочных полос, а также при инженерной подготовке территорий для строительства промышленных и гражданских зданий [5–10].

Учитывая активное освоение криолитозоны России в конце XX – начале XXI веков, наметились большие перспективы применения гидромеханизации при создании оснований сооружений. Однако следует отметить, что обобщающих трудов, в которых рассматривается опыт возведения сооружений в криолитозоне методом гидронамыва, весьма мало. Имеются отдельные публикации из опыта возведения некоторых гидроузлов [11, 12] и сооружений инженерной подготовки при обустройстве газонефтяных месторождений в Западной Сибири [13–15] и в г. Якутск при создании искусственных оснований под промышленные сооружения и гражданские жилые комплексы [16–19]. В процессе реализации этих проектов были решены ряд теплофизических задач по технологии намыва, формированию температурно-влажностного режима грунтов плотин в процессе возведения и ряд других технических задач. Эти исследования заложили основы использования метода гидромеханизации при строительстве плотин в криолитозоне. По данным ЗАО «Уренгойгидромеханизация», за период с 1978 по 2006 г. в тело различных сооружений в Западной Сибири уложено свыше 116,9 млн. м³ песчано-гравийного материала [18]. В г. Якутск при инженерной подготовке оснований сооружений (речной порт, завод по ремонту землеройной техники, 202 и 203 жилые микрорайоны) объем намывного грунта составил около 800 тыс. м³.

Успешному применению гидромеханизации для строительства в условиях криолитозоны способствовали научно-практические исследования, которые развивались в следующих направлениях: поиски и разведка месторождений строительных материалов, пригодных для разработки (песок, гравий); создание механизмов и методов разработки карьеров; обоснование и создание теплотехнических основ технологий добычи строительных материалов и разработка технологий возведения надежных сооружений с учетом направленного формирования их устойчивого тем-

пературно-влажностного режима в суровых природно-климатических условиях, включая работы в зимний период [20–22].

Краткие природно-климатические и инженерно-геокриологические условия низкой поймы р. Лена и намытого массива в г. Якутск

Современные природно-климатические, инженерно-геокриологические, гидрогеологические условия низкой поймы сложные. Климат района резко континентальный: амплитуда между минимальной и максимальной температурой воздуха равна 102,8 °С. С 1980-х гг. средняя годовая температура воздуха в связи с потеплением повысилась на 3 °С и составляет в настоящее время –7 °С (рис. 2). Количество атмосферных осадков невелико – около 250 мм.

Лена – крупнейшая равнинная река криолитозоны. Ее годовой гидрограф отличается интенсивным подъемом (до 7–11 м) уровня воды во время весеннего половодья и последующими дождевыми паводками в летние и осенние месяцы. Широкая пойма в период половодья затопливается. Русло р. Лена в районе г. Якутск многоорукавное, подвержено разнонаправленным смещениям и осложнено многочисленными островами. Мощность многолетнемерзлой толщи на островах достигает 320 м, а в основном русле р. Лена возможно наличие сквозного талика. Температура многолетнемерзлых грунтов изменяется от 0 до –2 °С, талых – около +0,5 °С. Коренные породы (юрские песчаники, алевролиты и аргиллиты) залегают с глубины 60–80 м и перекрыты четвертичными отложениями (разнозернистые пески, гравий, супеси, суглинки) до глубины

20–23 м. Переходная зона между коренными породами и четвертичными дисперсными аллювиальными отложениями представлена разрушенными породами коренной основы.

Особо следует указать на сложные гидролого-гидрогеологические условия низкой поймы р. Лена в районе г. Якутск. Перед освоением территория представляла собой низкую пойму, граничащую с Городской протокой р. Лена. На пойме было большое количество старичных и термокарстовых озер, которые частично или полностью затопливались во время половодий. Рельеф поймы в основном плоский с вытянутыми гривами и понижениями. Участки между гривами были заболочены или заняты староречьями, имели глубину до 3 м и длину до 1–1,3 км. Мощность таликов на ежегодно затопляемой пойме составляла 4,2–9,0 м и более. Инженерно-геокриологические разрезы пойменной территории характеризовались наличием в них мерзлых толщ сливающегося и не сливающегося типов, а также новообразованных мерзлых пород (рис. 3). Под протоками р. Лена развиты надмерзлотные гидрогенные талики мощностью до 30–60 м.

Основные объемы по намыву территории низкой поймы под застройку 202 и 203 кварталов г. Якутск осуществлялись в 1978–1988 гг. В 1990–1992 гг. и в 2012 г. домывали недостающие объемы 203 квартала грунтами руслового аллювия. Мощность намытой техногенной толщи составила от 8,5–10 м на гривах и прирусловых валах до 12–14 м на участках старичных озер и русел.

При намывных работах старичные озера с надмерзлотными водоносными таликами были погребены, а на межозерных пространствах за

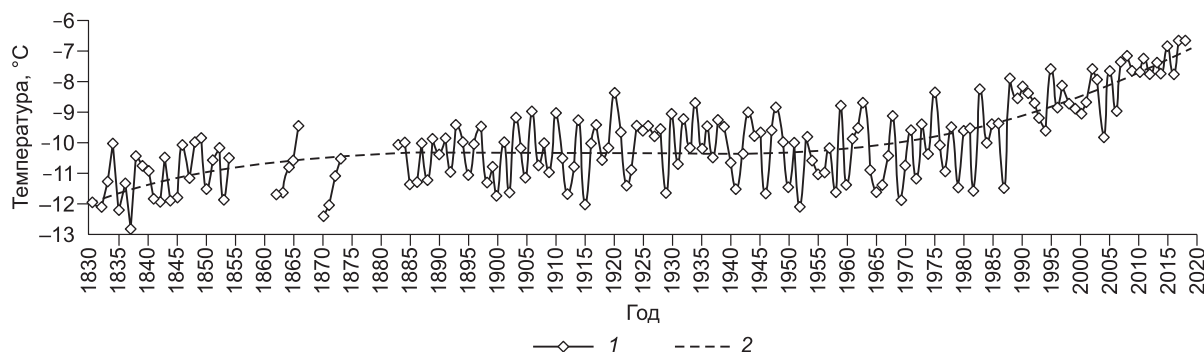


Рис. 2. Многолетняя изменчивость средней годовой температуры воздуха (°С) (1830–2019 гг.) по метеостанции Якутск. 1 – наблюдения, 2 – полином.

Fig. 2. Long-term variability of mean annual air temperature (°C) in 1830–2019 years at the meteorological station of Yakutsk. 1 – measurements, 2 – polynomial.

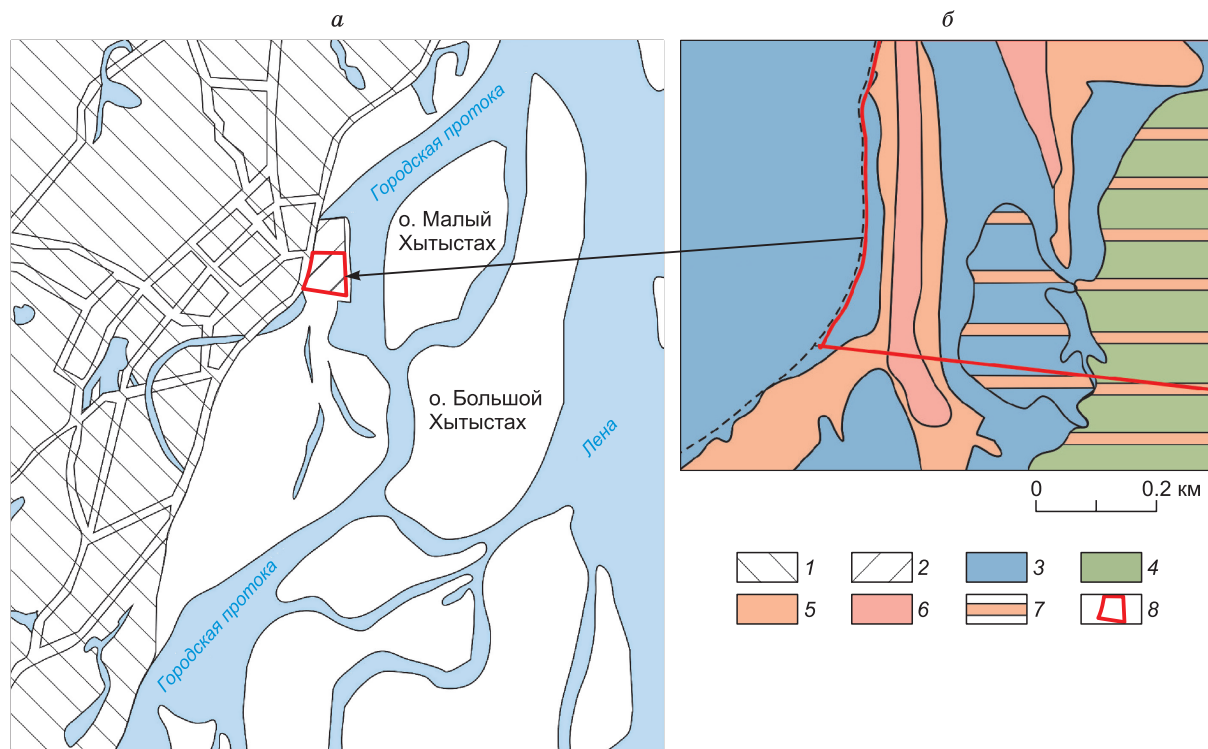


Рис. 3. Фрагмент схемы г. Якутска (а) и Геокриологическая схема пойменной территории р. Лены в период намыва [18] (б): 1 – территория города на низкой надпойменной террасе р. Лены, 2 – пойменно-намывная территория; 3 – сливающаяся мерзлота (поверхность ММП совпадает с нижней поверхностью слоя сезонного протаивания); 4 – несливающаяся мерзлота (поверхность ММП находится глубже нижней поверхности слоя сезонного промерзания, мощность талого прослоя до 1.0–1.2 м); 5–6 – талики, приуроченные к озерным котловинам: 5 – мощностью до 10 м; 6 – мощностью более 10 м; 7 – подчиненное распространение отдельных таликов мощностью до 10 м; 8 – пойменная часть р. Лена, планируемая под застройку 203 квартала г. Якутск.

Fig. 3. Fragment of the Yakutsk's map and a sketch map showing permafrost conditions in the floodplain during hydraulic fill placement [18]:

1 – city area on the low above-floodplain terrace of the Lena river; 2 – reclamation floodplain area; 3 – vertically continuous permafrost (the active layer reaches the permafrost table); 4 – vertically discontinuous permafrost (the permafrost table lies deeper than the base of the active layer with a residual thaw layer of 1.0–1.2 m); 5–6 – taliks confined to lake basins: 5 – thickness < 10 m; 6 – thickness 10–15 m; 7 – subordinate distribution of individual taliks < 10 m thick; 8 – floodplain area planned for District 203 development.

счет высокой температуры пульпы произошло углубление кровли многолетнемерзлых и под 6–8-метровой толщей техногенного грунта сформировались искусственные водонасыщенные талики мощностью до 3–5 м [18]. Эти техногенные талики сохраняются до настоящего времени (рис. 4). Поверхность намытого массива имеет средние отметки 96–97 м. Общая его площадь составляет 0,97 км², из которых 0,3 км² приходится на 202 квартал и 0,67 км² на 203 квартал (рис. 5, 6).

Результаты геокриологических исследований

Перед массовой застройкой 202 квартала г. Якутск, ввиду отсутствия опыта использования намывных территорий со сложными мерзлотно-гидрогеологическими условиями, был проведен

комплекс натурных, лабораторных и экспериментальных исследований. Результаты этих работ послужили основанием для выбора I принципа строительства на пойменно-намывной территории г. Якутск [18]. В качестве фундаментов для жилых домов были предложены следующие их типы: железобетонные столбчатые («колонны с башмаком»), свайные и плитные. В результате натурных испытаний основным типом фундаментов при застройке 202 квартала были приняты столбчатые, установленные на фундаментные плиты, смонтированные на щебенистой подготовке на глубине 4,0–4,5 м вырытого котлована (мощность намытого массива 12–13 м) [18]. Монтаж такого фундамента показан на рис. 7.

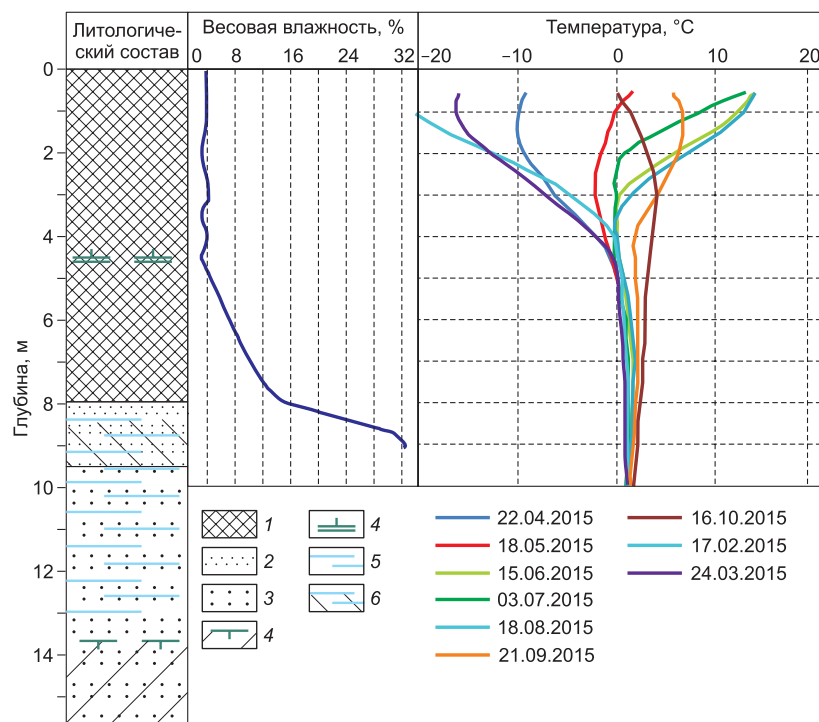


Рис. 4. Геокриологическое строение и изменение температуры грунтов на участке погребенного увала: 1–3 – литологический состав пород: 1 – техногенный грунт, песок средний, 2–3 – аллювиальные отложения: 2 – песок мелкий; 3 – песок средний; 4 – кровля многолетнемерзлых пород; 5 – граница слоя сезонного промерзания; 6 – водоносный горизонт; 7 – интервал сезонных колебаний уровня надмерзлотных вод.

Fig. 4. Geocryological structure and temperature ground variations in the areas of buried bars: 1–3 – Soil lithology: 1 – made ground (medium sand), 2–3 – alluvial deposits: 2 – fine sand; 3 – medium sand; 4 – permafrost table; 5 – base of the seasonal freezing layer; 6 – aquifer; 7 – zone of seasonal groundwater level fluctuations.



Рис. 5. Общий вид 202 квартала и намытая строительная площадка 203 квартала г. Якутска в период паводка на р. Лене в мае 2005 г. (красный прямоугольник – территория 203 квартала). Фото А.Н. Цеевой.

Fig. 5. General look 202 district and the reclaimed floodplain for 203 district in Yakutsk during a flood period on the Lena river, May 2005 (the red rectangle represents the territory of the 203rd district). Photo by A. N. Tseeva.



Рис. 6. Разрез толщи намывных грунтов до глубины 3,5 м на территории 203 квартала. Фото А.Л. Лобанова.

Fig. 6. Section of hydraulic fill to a depth of 3.5 m in the 203 district. Photo by A. L. Lobanov.



Рис. 7. Монтаж столбчатого фундамента девятиэтажного жилого дома №9 на территории 202 квартала г. Якутска 23 мая 1988 г. Фото Р.В. Чжана.

Fig. 7. Foundation posts mounting of the nine-storey residential building No. 9 in the 202 district of Yakutsk on May 23rd, 1988. Photo by R. V. Zhang.

Контрольные измерения температуры грунтов в теле и основании намытого массива после возведения части зданий и сооружений на территории 202 квартала показали, что произошло оттаивание мерзлых грунтов в гривах на 3–5 м и более, а также некоторое повышение их температуры. Считалось, что это случилось из-за нарушения норм эксплуатации строительного комплекса. Однако, не раз случались аварийные утечки воды из тепловыделяющих инженерных сетей в этом микрорайоне уже в процессе эксплуатации построенных зданий. Местами такие утечки приводили не только к полному таянию новообразованных мерзлых толщ, но и к повышению температуры как намытых, так и подстилающих грунтов до высоких положительных значений. Так, под жилыми зданиями № 6, 7 и детского сада № 26 максимальная температура грунтов на глубине 10–14 м достигала 40 °С [18]. Это наглядный пример техногенного прессинга на геокриологические условия.

Мониторинг температурного поля этой новой природно-техногенной системы, выполняемый Институтом мерзлотоведения СО РАН (ИМЗ СО РАН), показал, что в настоящее время на территории 202 квартала слой сезонного промерзания грунтов имеет здесь мощность около 4,5 м. Надмерзлотные субэвральные водоносные талики прослеживаются глубже 10 м, лишь в отдельных местах на глубине 5 м зафиксировано образование линз многолетнемерзлых пород со средней

годовой температурой от –0.3 до –0.6 °С [23]. Кроме этого, при исследовании динамики температурного поля грунтов в 203 квартале, застроенном в 2019 г., установлено, что намытый массив после почти 30-ти летнего существования находится практически полностью в талом состоянии (рис. 8).

Ранее было высказано предположение о том, что значительную роль в формировании теплового состояния тела и основания намытого массива играет сама намытая толща, так как её теплопроводность составляет всего 0,5 Вт/(м °С) [25]. Незначительные мощности намытых песков мало влияют на температурное состояние подстилающих массивов основания, а при их мощности, превышающей слой сезонного промерзания, они становятся теплоизоляторами (рис. 9). В ближайшие десятилетия, при наблюдаемом повышении средней годовой температуры воздуха, увеличения мощности сезонно-мерзлого слоя вплоть до слияния его с многолетнемерзлыми породами не ожидается.

На фоне общего потепления климата другими составляющими теплового баланса, влияющими на формирование теплового режима грунтов низкой поймы и намытого массива, являются надмерзлотные воды погребенных таликов, стариц, а также атмосферные осадки. Наиболее существенным из перечисленных являются надмерзлотные воды, циркулирующие в основании толщи намывных массивов (рис. 10). Гидравли-

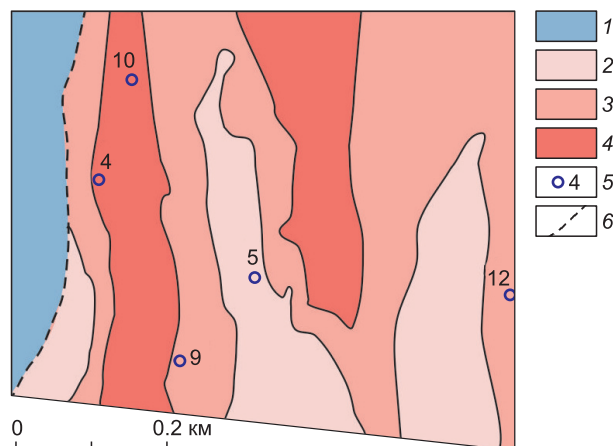


Рис. 8. Мерзлотно-гидрогеологическая схема 203 квартала г. Якутска (по состоянию на 2015–2019 гг.):

1 – область распространения надмерзлотных вод сезонного слоя; 2–4 – надмерзлотные талики с грунтовыми водами: 2 – мощность таликов 10–15 м; 3 – мощность таликов 15–20 м; 4 – мощность таликов более 20 м; 5 – режимная гидрогеологическая скважина и ее номер; 6 – граница между поймой и первой надпойменной террасой р. Лены.

Fig. 8. A sketch showing permafrost and groundwater conditions in the District 203 area in 2015–2019:

1 – occurrence of suprapermafrost water of the active layer; 2–4 – suprapermafrost taliks with unconfined groundwater: 2 – talik thickness 10–15; 3 – talik thickness 15–20 m; 4 – talik thickness >20 m; 5 – hydrogeological observation borehole and its ID; 6 – boundary between the floodplain and the low river terrace.

ческое давление речных вод, возникающее в периоды паводков, оказывает влияние на гидрогеологические условия массива талых и оттаявших грунтов на намывной территории [18, 24]. Фильтрующиеся по таликам подземные воды насыщают грунты снизу, изменяя их теплофизические свойства.

Кроме того, движение подземных вод обуславливает конвективное перераспределение тепловой энергии в водоносных горизонтах и зонах как по площади, так и по разрезу. Ранее выполненные прогнозные расчеты температурного режима грунтов на намывных территориях г. Якутск предполагали отсутствие непрерывной фильтрации воды в подошве намывного массива и учитывали только теплофизические свойства техногенного слоя [18]. По результатам проведенного моделирования ожидалось постепенное поднятие верхней границы многолетнемерзлых пород и смыкание ее со слоем сезонного протаивания. Однако, в настоящее время на территории сохраняется несливающийся тип мерзлоты. Из данных гидрогеологических наблюдений следует, что существование таликовых зон в намывных

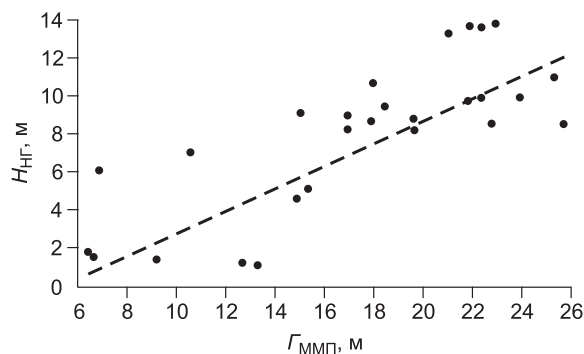


Рис. 9. Зависимость глубины залегания верхней границы многолетнемерзлых пород от мощности намывных грунтов в 203 квартале г. Якутска.

Fig. 9. The dependence of the permafrost table depth on the fill thickness in the District 203 area in Yakutsk.

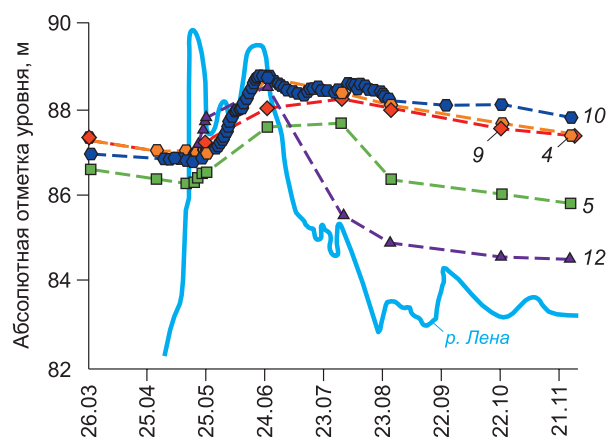


Рис. 10. Изменение уровня подземных вод на территории 203 квартала и р. Лена (гидропост г. Якутск) в 2019 г. (символ и цифра – гидрогеологическая скважина и ее номер (см. рис. 8)).

Fig. 10. Variations in Lena River water level (Yakutsk), and groundwater level in 2019 year (symbol numbers indicate borehole number (see Fig. 8)).

массивах и их опосредованная связь с р. Лена через подрусловый талик является важнейшим, но пока малоизученным фактором формирования температурного поля пород грунтов оснований сооружений.

Таким образом, совокупность факторов, влияющих на формирование теплового режима грунтов оснований, способствует деградации высокотемпературных и практически безградиентных мерзлых грунтов низкой поймы. При создавшейся инженерно-геокриологической ситуации возникает вопрос о принципе использования намывных грунтов на низкой пойме р. Лена в качестве оснований. Опираясь на мониторинговые

исследования, проведенные ИМЗ СО РАН и другими организациями на территории 202 и 203 кварталов, при застройке 203 квартала г. Якутска был предложен II принцип строительства, с использованием плитных фундаментов [19]. При этом было рекомендовано соблюдать все нормы проектирования и строительства, а именно использовать такие типы фундаментов, которые бы могли воспринимать и перераспределять усилия, вызванные возможной неравномерной осадкой основания.

Заключение

Геокриологические и гидрогеологические исследования, выполненные на территории 202 и 203 кварталов г. Якутск по прошествии более 30 лет после создания грунтового основания показали, что в теле и основании намывного массива существуют надмерзлотные талики. Мощность их изменяется от 10–15 м на участках погребенных гряд и увалов до 20 м и более на площадях старичных озер. С глубины 8–10 м грунты обводнены.

Среди основных причин сохранения таликов можно выделить две главные: 1) низкая теплопроводность практически сухих песков в верхней части разреза, препятствующая промерзанию грунтов сверху; 2) существование в основании намывной толщи единого водоносного горизонта, связанного с поверхностными водами р. Лена.

Непрерывная фильтрация воды в подошве намывного массива препятствует многолетнему промерзанию грунтов снизу. Количественно оценить роль водоносных таликов в формировании геотермического режима грунтов в условиях техногенного воздействия и влияния изменений климата на температуру грунтовых оснований зданий и инженерных сооружений является главной задачей дальнейших режимных наблюдений. В связи с этим неотъемлемой частью освоения намывных территорий должен являться комплексный геокриологический и гидрогеологический мониторинг. Основным результатом подобного мониторинга будет являться разработка и внедрение новых норм проектирования и строительства инженерных сооружений на пойменно-намывных территориях криолитозоны.

Литература

1. Волнин Б.А. Технология гидромеханизации в гидротехническом строительстве. М.; Л.: Энергия, 1965. 200 с.

2. Мелентьев В.А., Колпашиников Н.П., Волнин Б.А. Намывные гидротехнические сооружения. М.; Л.: Энергия, 1973. 237 с.

3. Огурцов А.И. Намыв земляных сооружений. М.: Стройиздат, 1974. 366 с.

4. Кожевников Н.Н. Проектирование и строительство земляных плотин. М., 2014. 80 с. <http://issuu.com/belbooks/docs/russiandams>

5. Новиков М.Ф., Каминская В.И., Седых Ю.И. Намыв территорий для жилищного и промышленного строительства. М.: Стройиздат, 1978. 98 с.

6. Кушнир С.Я. Об использовании намывных территорий под строительство в Западной Сибири // Мат-лы Республиканской научно-технической конференции «Перспективы и экономика строительства на намывных территориях». Киев, 1980. С. 52–56.

7. Винокуров Е.Ф., Карамышев А. С. Строительство на пойменно-намывных основаниях. Минск: Выш. школа, 1980. 200 с.

8. Глотова М.А. Намывные песчаные грунты киевского района как основание зданий и сооружений. Авторе. дисс-ии на соис. степени канд. техн. наук. Киев, 1984. 21 с.

9. Рекомендации по инженерно-геологическим изысканиям и проектированию оснований зданий и сооружений на намывных территориях. М.: ВНИИОСП, 1985. 38 с.

10. Коновалов П.А., Кушнир С.Я. Намывные грунты как основание сооружений. М.: Недра, 1991. 256 с.

11. Биянов Г.Ф. Плотины на вечной мерзлоте. М.: Энергия, 1975. 184 с.

12. Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. Грунтовые плотины в криолитозоне России /отв. ред. Д.М. Шестернев. Новосибирск: Гео, 2019. 427 с.

13. Вассерман С.Н. Инженерная подготовка заболоченных территорий для строительства в нефтедобывающих районах Западной Сибири. М.: ВНИИОЭНГ, 1978. 85 с.

14. Рекомендации по производству работ способом гидромеханизации при сооружении земляного полотна в районах вечной мерзлоты. М.: ЦНИИС, 1981. 88 с.

15. Леванов Н.И. Разработка песчаных карьеров на крайнем севере Сибири // Материалы Второго съезда гидромеханизаторов России. М., 2000. С. 101–104.

16. Полещук В.Л. Подготовка площадок строительства на вечной мерзлоте способом намыва грунтов оснований // Матер. научного совещ. по

развитию производительных сил Якутской АССР. Якутск, 1981. С. 10–15.

17. *Инженерно-геологические* изыскания, проектирование и устройство оснований и фундаментов на намывных территориях в условиях Центральной Якутии. ВСН 110-003-88. М.: Минвостокстрой СССР, 1988. 43 с.

18. Роман Л.Т., Цернант А.А., Полещук В.Л., Цеева А.Н., Леванов Н.И. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне. М.: ИД: «Экономика, Строительство, Транспорт», 2008. 323 с.

19. Шестернев Д.М., Чжан Р.В., Кузьмин Г.П. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне Якутии // Международная конференция «Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы». Тюмень: Эпоха, 2015. С. 432–435.

20. Попов Ю.А., Росицупкин Д.В., Пеняскин Г.И. Гидромеханизация в северной климатической зоне. Л.: Стройиздат, 1982. 224 с.

21. Цернант А.А. Сооружение земляного полотна в криолитозоне: Автореф. дисс. на соиск. степени докт. техн. наук. М.: НИИ транспортно-го строительства, 1998. 97 с.

22. Цернант А.А. Обоснование рациональной технологии намыва земляных сооружений при отрицательных температурах воздуха // Труды ЦНИИС. Вып. 24. М., 1968. С. 12–28.

23. Сыромятников И.И., Куницкий В.В. Особенности температурного режима намывных песков микрорайона № 202 г. Якутска // Мат-лы VIII Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Т. 2. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2018. С. 282–285.

24. Павлова Н.А., Данзанова М.В., Ефремов В.С., Иванова Л.Д. Изучение гидродинамического и гидрохимического режима подземных вод на намывной территории г. Якутска // Мат-лы VI ВПНК «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-востока России» / отв. ред. Л.И. Полуфунтикова. Якутск: ИД СВФУ, 2016. С. 512–516.

25. Шестернев Д.М., Чжан Р.В., Кузьмин Г.П. Эколого-геокриологические условия строительства на намывных грунтах // Прикладные экологические проблемы г. Якутска: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука, 2017. С. 16–24.

*Поступила в редакцию 04.03.2020
Принята к публикации 24.05.2020*

Об авторах

ЧЖАН Рудольф Владимирович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, <https://orcid.org/0000-0001-9038-3360>, zhang@mpi.ysn.ru;

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ведущий научный сотрудник, 677010, Якутск. ул. Мерзлотная, 36, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, pavlova@mpi.ysn.ru;

ОГОНЕРОВ Василий Васильевич, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ведущий инженер, 677010, Якутск. ул. Мерзлотная, 36, <https://orcid.org/0000-0002-4032-1744>, vasvas392@yandex.ru;

ЛОБАНОВ Артем Леонидович, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, младший научный сотрудник, 677010, Якутск. ул. Мерзлотная, 36, art2356-1991@yandex.ru;

ДАНЗАНОВА Марина Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, научный сотрудник, 677010, Якутск. ул. Мерзлотная, 36, <https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, dmv_1585@mail.ru

Информация для цитирования

Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В., Лобанов А.Л., Данзанова М.В. Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020, Т. 25, № 2. С. 89–?. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>

Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects

R.V. Zhang, N.A. Pavlova, V.V. Ogonerov, A.L. Lobanov, M.V. Danzanova

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
zhang@mpi.ysn.ru*

Abstract. *The experience of inwashed soil development under the conditions of permafrost is considered for various engineering structures: the foundations of gas-oil, industrial and civil facilities, soil hydraulic facilities, roads, etc. Particular attention is paid to the technology of construction of the foundation of inwashed soil on the low floodplain of the Lena river for the residential complex of the Yakutsk city (quarters No. 202 and 203). The results of studies into the dynamics of the geocryological conditions over this territory during the long-term operation of buildings and engineering structures are presented. It was revealed that in the major part of the territory of quarter No. 202 in Yakutsk, which was constructed in the 1980–90s according to the 1st principle, at present the ground has a positive temperature at a depth of 10 m and deeper. At the territory of quarter No. 203, suprapermafrost aquiferous taliks, were formed during hydro-mechanical works in the 1990s, and they still exist everywhere after 30 years. The factors that contribute to the preservation of suprapermafrost taliks in the body and base of the inwashed soil are considered. The main factors determining the formation of the soil temperature field include distinct thermophysical properties of dry inwashed sands in the upper part of the section and the hydrogeological conditions of the territory. The features and prospects of inwashed soil exploitation as the structure foundations and the principles of construction on them are analyzed. To control and develop robust recommendations for ensuring the sustainability of structures, it is necessary to organize comprehensive geocryological monitoring, including ecological aspects of the interaction between technogenic systems and the environment.*

Key words: cryolithozone, soil, base, river floodplain, hydraulic fill, permafrost, temperature, construction, building, structure, monitoring.

Acknowledgements. *This study was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Research project no. 20-05-00670).*

References

1. Volnin B.A. Tekhnologiya gidromekhanizatsii v gidrotekhnicheskom stroitelstve. M.; L.: Energiya, 1965. 200 p.
2. Melent'ev V.A., Kolpashnikov N.P., Volnin B.A. Namyvnye gidrotekhnicheskie sooruzheniya. M.; L.: Energiya, 1973. 237 p.
3. Ogurtsov A.I. Namyv zemlyanyh sooruzhenij. M.: Strojizdat, 1974. 366 p.
4. Kozhevnikov N.N. Proektirovanie i stroitelstvo zemlyanyh plotin. M., 2014. 80 p. <http://issuu.com/belbooks/docs/russiandams>
5. Novikov M.F., Kaminskaya V.I., Sed'kh Yu.I. Namyv territorij dlya zhilishchnogo i promyshlennogo stroitelstva. M.: Strojizdat, 1978. 98 p.
6. Kushnir S.Ya. Ob ispolzovanii namyvnyh territorij pod stroitelstvo v Zapadnoj Sibiri // Mat-ly Respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Perspektivy i ekonomika stroitelstva na namyvnyh territoriyah». Kiev, 1980. P. 52–56.
7. Vinokurov E.F., Karamyshev A.S. Stroitelstvo na poimanno-namyvnyh osnovaniyah. Minsk: Vysh. shkola, 1980. 200 p.
8. Glotova M.A. Namyvnye peschanye grunty kievskogo rajona kak osnovanie zdaniy i sooruzhenij. Avtoref. diss. na sois. stepeni kand. tekhn. nauk. Kiev, 1984. 21 p.
9. Rekomendacii po inzhenerno-geologicheskim izyskaniyam i proektirovanii osnovanij zdaniy i sooruzhenij na namyvnyh territoriyah. M.: VNIIOSP, 1985. 38 p.
10. Konovalov P.A., Kushnir S.Ya. Namyvnye grunty kak osnovanie sooruzhenij. M.: Nedra, 1991. 256 p.
11. Biyanov G.F. Plotiny na vечноj merzлоте. M.: Energiya, 1975. 184 p.
12. Chzhan R.V., Velikin S.A., Kuznetsov G.I., Kruk N.V. Gruntovye plotiny v kriolitozone Rossii / otv. red. D.M. Shesternev. Novosibirsk: Geo, 2019. 427 p.
13. Vasserman S.N. Inzhenernaya podgotovka zabolochennyh territorij dlya stroitelstva v nefte dobyvayushchih rajonah Zapadnoj Sibiri. M.: VNIIOENG, 1978. 85 p.

14. *Rekomendacii po proizvodstvu rabot sposobom gidromekhanizatsii pri sooruzhenii zemlyanogo polotna v rajonah vечноj merzloty.* M.: CNIIS, 1981. 88 p.
15. *Levanov N.I.* Razrabotka peschanyh karierov na krajnem severe Sibiri // *Materialy Vtorogo s'ezda gidromekhanizatorov Rossii.* M., 2000. P. 101–104.
16. *Poleshchuk V.L.* Podgotovka ploshchadok stroitelstva na vечноj merzlotte sposobom namыва gruntov osnovanij // *Mater. nauchnogo soveshch. po razvitiyu proizvoditelnyh sil Yakutskoj ASSR.* Yakutsk. 1981. P. 10–15.
17. *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya, proektirovanie i ustrojstvo osnovanij i fundamentov na namывnyh territoriyah v usloviyah Central'noj Yakutii.* VSN 110-003-88. M.: Minvostokstroj SSSR, 1988. 43 p.
18. *Roman L.T., Cernant A.A., Poleshchuk V.L., Ceeva A.N., Levanov N.I.* Stroitelstvo na namывnyh gruntah v kriolitozone. M.: ID: «Ekonomika, Stroitelstvo, Transport», 2008. 323 p.
19. *Shesternev D.M., Chzhan R.V., Kuzmin G.P.* Stroitelstvo na namывnyh gruntah v kriolitozone Yakutii // *Mezhdunarodnaya konferenciya «Arktika, Subarktika: mozaichnost, kontrastnost, variativnost kriosfery».* Tyumen: Epoha, 2015. P. 432–435.
20. *Popov YU.A., Rosshchupkin D.V., Penyaskin G.I.* Gidromekhanizatsiya v severnoi klimaticheskoi zone. L.: Strojizdat, 1982. 224 p.
21. *Tsernart A.A.* Sooruzhenie zemlyanogo polotna v kriolitozone. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk. M.: NII transportnogo stroitelstva, 1998. 97 p.
22. *Tsernart A.A.* Obosnovanie racionalnoi tekhnologii namыва zemlyanyh sooruzhenij pri otritsatelnyh temperaturah vozduha // *Trudy CNIIS.* Iss. 24. M., 1968. P. 12–28.
23. *Syromyatnikov I.I., Kunicky V.V.* Osobennosti temperaturnogo rezhima namывnyh peskov mikrorajona No. 202 g. Yakutska // *Mat-ly VIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Geologiya i mineralno-syrevye resursy Severo-Vostoka Rossii.* Vol. 2. Yakutsk: Izdatelstvo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Melnikova SO RAN, 2018. P. 282–285.
24. *Pavlova N.A., Danzanova M.V., Efremov V.S., Ivanova L.D.* Izuchenie gidrodinamicheskogo i gidrohimicheskogo rezhima podzemnyh vod na namывnoj territorii g. Yakutska // *Mat-ly VI VPNK «Geologiya i mineralno-syrevye resursy Severo-vostoka Rossii» / otv. red. L.I. Polufuntikova.* Yakutsk: ID SVFU, 2016. P. 512–516.
25. *Shesternev D.M., Chzhan R.V., Kuzmin G.P.* Ekologo-geokriologicheskie usloviya stroitelstva na namывnyh gruntah // *Prikladnye ekologicheskie problemy g. Yakutska: sbornik nauchnyh trudov.* Novosibirsk: Nauka, 2017. P. 16–24.

About the authors

ZHANG Rudolf Vladimirovich, doctor of technical sciences, Chief Researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36 Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-9038-3360>, zhang@mpi.ysn.ru ;

PAVLOVA Nadezhda Anatolievna, candidate of geological and mineralogical sciences, leading researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36 Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010,
<https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, pavlova@mpi.ysn.ru;

OGONEROV Vasily Vasilievich, lead engineer P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-4032-1744>, vasvas392@yandex.ru ;

LOBANOV Artem Leonidovich, junior researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010,
 Russia, art1991-2356@yandex.ru ;

DANZANOVA Marina Viktorovna, candidate of geological and mineralogical sciences, researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-2559-7590>, dmv_1585@mail.ru

Citation

Zhang R.V., Pavlova N.A., Ogonerov V.V., Lobanov A.L., Danzanova M.V. Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects // *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2020, Vol. 25, N 2. P. 89–99. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 56.01. 574.3

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-8

Степной компонент позднеплейстоценовых экосистем Якутии

А.В. Протопопов¹, В.В. Протопопова²

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

²Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

a.protopopov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы происхождения реликтовых степных участков, встречающихся в некоторых районах Якутии, преимущественно в центральной и северо-восточной части, а также их распространения в позднем плейстоцене как ресурсной ниши для мамонтового мегафаунистического комплекса. Показано то, что настоящие степи существовали на территории Якутии в плиоцене и раннем плейстоцене. Ксерофитные растительные сообщества среднего плейстоцена генетически были связаны с горностепными ассоциациями. В позднем плейстоцене криоксерофитные фитоценозы не имели трансберингийских связей, но имели большее распространение, чем в настоящее время.

Широкое распространение криоксерофитных пустынных сообществ в позднем плейстоцене было обусловлено крайней криоаридностью климата и малым числом осадков, особенно в зимнее время, что приводило к выхолаживанию поверхности почвы. Несмотря на крайне низкую продуктивность, криоксерофитные пустыни давали экологическую нишу достаточно крупному копытному сайгаку, что долго служило в палеоботанических реконструкциях аргументом распространения в позднем плейстоцене степей.

Современные реликтовые степные участки и в позднем плейстоцене занимали подчиненное положение в растительном покрове Якутии, как и в настоящее время.

Ключевые слова: Якутия, Берингия, поздний плейстоцен, позднеплейстоценовые экосистемы, трансберингийские связи, реликтовые степные участки, межледниковье, криохрон, сайгак, ксерофиты.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-45-140007 p_a.

Введение

Участки реликтовой степной растительности являются предметом пристального изучения в течение ряда десятилетий, так как вызывают большой интерес у геоботаников и флористов вследствие видимого родства, несмотря на современную изоляцию, с североамериканскими и центрально-азиатскими зональными степными сообществами. Участки степной растительности, признанные, согласно Г.А. Пешковой [1], реликтами плиоцена, а по утверждению Б.А. Юрцева [2], – реликтами плейстоцена, распространены по всей территории северо-востока Азии. Наибольшие площади они занимают в Центральной Якутии, бассейнах рек Яна и Индигирка,

встречаются в бассейнах Колымы, Анадыря, Вилюя, нижнего течения Лены. На Чукотке проникают в тундру в виде «степоидов» [3, 4].

Этому явлению способствует ультраконтинентальный климат Якутии с высокой сухостью воздуха и малым количеством осадков. Степные сообщества, как правило, формируются на безлесных склонах коренных берегов, где происходит быстрое и глубокое оттаивание грунта весной и ранним летом, в результате чего во время вегетации устанавливается постоянный дефицит влаги в почве.

В палеогеографических и палеоботанических реконструкциях наличие вышеназванных реликтовых степных ассоциаций считается одним из

основных доказательств господства в ландшафтах позднего плейстоцена степей. В научный обиход вместо устаревшего термина «тундростепь», было введено понятие «мамонтовая степь». Именно степи предлагается считать основными пастбищами для представителей мамонтовой мегафауны [5–8].

Материалы и методы

Видовой состав степных растений, произраставших в Якутии в позднем плейстоцене, уточнен с использованием литературных источников и своих данных [9]. К степному элементу позднеплейстоценового палеофлористического комплекса относятся 35 видов высших сосудистых растений (табл. 1). Латинские названия растений приведены в соответствии с «Флорой Сибири» [10].

Выявление флорогенетических тенденций, кроме использования палеоботанических данных, проводится путем проведения ареалогического анализа [11], сопоставления географических элементов с ценоотическими [12] [13] (см. табл. 1).

Для выявления тенденций флорогенеза степных сообществ рассматривались типичные для современных степей и ксерофитных сообществ

виды растений, произрастающие в настоящее время и в Азии, и в Северной Америке и имеющие дизъюнкцию ареалов в районе Берингова пролива, наличие викарных видов и подвидов. Такой подход позволяет рассчитать геологическое время формирования новых видов.

Обсуждение

В зоне степей Монголии и Забайкалья одними из эдификаторов растительного покрова являются *Stipa capillata*, *Stipa krylovii*, *Stipa baicalensis*, а также *Festuca lenensis*, *Poa attenuata*, *Helictotrichon schellianum*, *Carex pediformis*, *Agropyron cristatum*, *Leymus chinensis*, *Poa botryoides*, *Artemisia frigida*, эти виды также распространены и в реликтовых степных сообществах Якутии. Почти все эти виды имеют континентальный ареал, кроме трансконтинентальной *Artemisia frigida*. В настоящее время *Artemisia frigida* произрастает не только в степях, но и в рудеральных и пустошных фитоценозах от Поволжья до Северной Америки включительно.

Доминирование во флоре растений с азиатским ареалом вполне типично для степных флор Азии. Так, например, *Ephedra monosperma* и *Ar-*

Таблица 1

Виды растений, входящие в степную формацию палеофлористического комплекса

Table 1

Species of plants included in the steppe formation paleofloristic complex

Вид	Ареалогическая группа	Ценоотическая приуроченность
1	2	3
1. <i>Artemisia scoparia</i>	Евразийская	Степи, остепненные луга, берега рек, щебнистые и песчаные склоны
2. <i>Artemisia macrantha</i>	Азиатская	Остепненные луга и луговые степи, заросли кустарников, березовые колки, разреженные леса, каменистые склоны
3. <i>Artemisia gmelinii</i>	Азиатская	Луговые закустаренные степи, опушки, березовые колки, кустарниковые заросли
4. <i>Artemisia frigida</i>	Азиатско-североамериканская	Степи, щебнистые и каменистые склоны, старые залежи
5. <i>Artemisia dracunculus</i>	Евразийская	Степи, остепненные луга, березовые колки, опушки и полянки сухих лесов, кустарниковые заросли, берега рек, остепненные луга
6. <i>Artemisia commutata</i>	Азиатская	Степи, остепненные луга, сосновые боры и опушки, щебнистые и песчаные склоны
7. <i>Artemisia jacutica</i>	Восточносибирская	Степи, галечники, обочины дорог, мусорные места, пески, солонцы, берега соленых озер
8. <i>Aster alpinus</i>	Евразийская	Остепненные луга, луговые степи, каменистые и щебнистые горные тундры, щебнистые и каменистые склоны гор, известковые скалы, песчаные сосновые боры

1	2	3
9. <i>Phlox sibirica</i>	Азиатская	Сухие каменистые склоны, песчаные степи, сухие остепненные леса
10. <i>Potentilla longifolia</i>	Азиатская	Степи, суходольные луга, каменистые склоны, разреженные леса
11. <i>Sisymbrium polymorphum</i>	Сибирская	Степи, щебнистые и каменистые склоны, песчаные известняки, опушки светлохвойных лесов
12. <i>Lepidium latifolium</i>	Евразийская	Солонцеватые степи, засоленные луга, пашни и залежи
13. <i>Ceratoides papposa</i>	Евразийская	Степи и остепненные склоны
14. <i>Carex supina</i>	Евразийская	Степи, остепненные луга, сухие леса
15. <i>Carex pediformis</i>	Евразийская	Степи, остепненные леса, сухие склоны
16. <i>Carex duriuscula</i>	Сибирско-североамериканская	Равнинные и горные степи, степные каменистые склоны, сухие леса, остепненные луга с солонцеватой почвой
17. <i>Carex argunensis</i>	Азиатская	Щебнистые склоны, скалы, песчаные участки, остепненные сосновые леса на песке
18. <i>Kobresia filifolia</i>	Сибирская	Степные, луговые, каменистые и щебнистые склоны, скалы, сухие редколесья, суходольные и пойменные луга
19. <i>Poa attenuata</i>	Азиатская	Высокогорные степи, каменистые склоны
20. <i>Helictotrichon krylovii</i>	Восточносибирская	Степи, сухие луга, лесные поляны, лиственничные и сосновые леса
21. <i>Agropyron cristatum</i>	Азиатская	Степи, остепненные сухие карбонатные склоны, сухие надпойменные террасы
22. <i>Poa botryoides</i>	Сибирско-дальневосточная	Остепненные склоны гор, остепненные луга, редкостойные сосновые леса, скалы, песчаные бугры, галечники
23. <i>Koeleria cristata</i>	Циркумбореальная	Разнотравные, разнотравно-злаковые и луговые степи, остепненные, пойменные, солонцеватые луга, пойменные галечники, обочины дорог
24. <i>Ephedra monosperma</i>	Азиатская	Сухие карбонатные скалы, степные склоны, остепненные опушки, каменистые степи и пустоши
25. <i>Selaginella rupestris</i>	Азиатско-североамериканская	Скалы, осыпи, остепненные луга, степи, заросли кедрового стланика, сухие сосновые боры и сосново-лиственничные леса на песчаной почве, щебнистые тундры
26. <i>Plantago canescens</i>	Восточносибирско-североамериканская	Луга, луговые степи, песчаные склоны, опушки, вдоль дорог
27. <i>Thymus</i> sp.	Азиатская	Сухие склоны, скалы, степи, песчаные берега рек
28. <i>Eritrichium sericeum</i>	Восточносибирская	Каменистые и щебнистые степные склоны
29. <i>Suaeda corniculata</i>	Азиатская	Солончаки
30. <i>Pulsatilla flavescens</i>	Сибирская	Степи, склоны, луга, березовые и светлохвойные леса
31. <i>Silene repens</i>	Азиатская	Луга, настоящие степи, каменистые склоны, солонцеватые луга
32. <i>Lychnis sibirica</i>	Сибирская	Щебнистые и каменистые склоны, сосновые и березовые леса
33. <i>Eremogone tschuktschorum</i>	Восточносибирская	Каменисто-щебнистые и скалистые склоны, каменистые и лишайниковые тундры, остепненные участки лиственничных редколесий
34. <i>Ulmus pumila</i>	Азиатская	Сосновые леса, степи, скалы, по склонам долин
35. <i>Allium strictum</i>	Сибирская	Каменистые склоны, степи, лиственничные леса

Трансберингийские связи степной флоры

Table 2

Transberingian communications of the steppe flora

Западная Берингия	Восточная Берингия	Исторический период	Доминирующие экосистемы
<i>Stipa capillata</i> , <i>Stipa pennata</i>	<i>Stipa spartea</i> , <i>Stipa commata</i>	Неоген (миоцен–плиоцен)	Равнинные степи
<i>Helictotrichon mongolicum</i> , <i>Helictotrichon hookeri</i> , <i>Helictotrichon schellianum</i>	<i>Helictotrichon asiaticum</i> , <i>Helictotrichon mortonianum</i>	Ранний плейстоцен	Горные степи
<i>Festuca lenensis</i> <i>Carex duriuscula</i> , <i>Artemisia frigida</i> , <i>Selaginella rupestris</i> , <i>Koeleria cristata</i>	<i>Festuca lenensis</i> <i>Carex duriuscula</i> , <i>Artemisia frigida</i> , <i>Selaginella rupestris</i> , <i>Koeleria cristata</i>	Средний плейстоцен	Криоксерофитные
<i>Artemisia jacutica</i> , <i>Potentilla tollii</i> , <i>Eritrichium sericeum</i> , <i>Eremogone tschuktschorum</i>	—	Поздний плейстоцен	Криоксерофитные

temisia commutata являются реликтами плиоценовых степей [14], как и большая часть степных видов с евразийскими и азиатскими ареалами. Преобладание азиатского хорологического элемента в степных флорах Г.А. Пешкова [15] считает свидетельством автохтонных тенденций во флорогенезе плиоценовых степей. При этом В.А. Шелудякова [16], М.Н. Караваев [17] и Б.А. Юрцев [2] отмечают, что более половины представителей степных сообществ северо-востока Якутии имеют близких родственников в ксерофильных флорах Северной Америки. Но, одновременно с этим, там и здесь существует очень мало одинаковых видов. Эта особенность указывает на автохтонные тенденции во флорогенезе степных флор по обе стороны Берингова пролива, но уже в более позднее время (табл. 2).

В качестве примера викарных видов, указывающих на древние флорогенетические связи между степными и горностепными флорами Азии и Северной Америки, можно привести *Helictotrichon mongolicum*, распространенный в Западной Сибири и Средней Азии, и *Helictotrichon mortonianum*, произрастающий в Кордильерах [18] (см. табл. 2). Б.А.Юрцев [2] также приводит в пример виды *Helictotrichon asiaticum*, встречающийся на Юконе и в Скалистых горах, и *Helictotrichon hookeri*, ареал распространения которого охватывает Европу, Центральную Азию, юг Сибири, се-

вер Китая и который в Якутии замещается близкородственным видом *Helictotrichon schellianum*. Основываясь на приведенных и других примерах викарных видов степной флоры Азии и Северной Америки, Б.А. Юрцев [2] делает вывод, что обмен ксерофильными таксонами, к настоящему времени обособленными на уровне викарных видов, произошел в раннем плейстоцене (см. табл. 2).

Трансберингийский ареал *Plantago canescens*, *Selaginella rupestris*, *Koeleria cristata*, *Carex duriuscula*, *Artemisia frigida* дает основания предполагать, что расселение их через Берингию произошло в среднем плейстоцене, а возможное смыкание ранее разобщенных в периоды трансгрессий Берингова моря ареалов могло происходить и в позднем плейстоцене [2]. При этом ценоморфная приуроченность к сухим щебнистым, скальным и галечниковым местообитаниям позволила этим растениям петрофитам удержаться в тундровой зоне в голоцене [4]. Позднеплейстоценовые и среднеплейстоценовые трансберингийские связи этих растений объясняются, скорее всего, не смыканием настоящих степей Азии и Северной Америки в эти периоды, а слиянием криоксерофильных петрофитных биотопов.

Восточносибирские и сибирские эндемики, такие как *Eremogone tschuktschorum*, *Pulsatilla flavescens*, *Helictotrichon krylovii*, *Sisymbrium polymorphum*, как и трансберингийские горностеп-

ные виды *Carex duriuscula*, *Artemisia frigida*, *Koeleria cristata*, достаточно эвритопны, произрастая как на степных участках, так и на лугах и опушках сухих светлехвойных лесов, щебнистых склонах и галечниках. Их формообразование происходило в плейстоцене в горных районах, в современности в верховьях рек Ангара и Лена [14, 19].

В этот период степная растительность под влиянием глобального похолодания трансформировалась в криоксерофильные флорокомплексы, приуроченные к фациям открытых сухих склонов, светлехвойных лесов, остепненных лугов и галечников.

В плейстоцене, скорее всего, было две волны трансберингийского обмена степными флорами (табл. 2). Первая волна, предположительно, относится к раннему плейстоцену, когда степная флора модифицировалась в горностепную; вторая волна относится к среднему плейстоцену, вероятнее всего, это случилось во время самаровского оледенения. Именно в это время горностепные и горнотундровые виды, спускаясь в равнины, начинают произрастать на похожих сухих щебнистых и песчаных местопрорастаниях.

Фитоценогенетическая приуроченность таких горнотундровых растений, как *Dryas punctata*, к сухим щебнистым и скальным субстратам в ходе нарастания криоаридных процессов по мере деградации лесной и равнинно-степной растительности в среднем плейстоцене позволила принять участие в формировании криоксерофильных сообществ на плакорах. Такие криоксерофильные сообщества характеризуются ослабленными фитоценоотическими связями и подавляющим влиянием абиотических факторов в их функционировании. Схожие условия, возможно, формировались в сартанское время, но на довольно короткое время.

Определяющее значение во флорогенезе растительного покрова Северной Якутии, скорее всего, имело самаровское оледенение среднего плейстоцена, когда наряду с выпадением большого количества термофильных степных и бореальных таксонов происходило флористическое пополнение тундровых, светлехвойных и степных формаций представителями высокогорной флоры. Флора Якутии приобрела современный облик в среднем плейстоцене.

В термохроны позднего плейстоцена многие термофильные виды растений, как, например, *Ul-*

mus pumila, произрастали далеко севернее своего нынешнего ареала, а криоксерофильные сообщества сокращали свое участие в растительном покрове Северной Якутии, уступая место лесным формациям. Зональная степная растительность в позднем плейстоцене не восстанавливалась. В течение позднего плейстоцена горностепные криоксерофильные сообщества, аналогичные современным, то расширяли свои площади, то сокращали их; максимальное их распространение отмечается в сартанский криохрон.

Развивающиеся на возвышенностях со сдуваемым зимой снежным покровом и повышенным летним иссушением почвенной поверхности криоксерофильные сообщества отличались малой продуктивностью. На основании зооиндикационных особенностей жука-пилюльщика – *Morychus viridis*, Д.И. Берман [20] предполагает широкое распространение в позднем плейстоцене ассоциаций, образованных *Carex argunensis* и *Polytrichum piliferum*. Исходя из особенностей современного дизъюнктивного ареала *Carex argunensis* с наличием реликтовой популяции в верховьях Колымы и частоты встречаемости остатков жука-пилюльщика в позднеплейстоценовых ориктоценозах, можно предположить, что в сартанское время сообщества с участием этой осоки были намного больше распространены, чем в настоящее время. Ценоморфная приуроченность *Carex argunensis* к горнотундровым экотопам, сухим щебнистым склонам, осыпям, сухим лесам и редколесьям, приречным пескам [21] указывает на то, что ее формообразование происходило в более выраженных горнотундровых криоксерофильных условиях. Климатические условия распространения жука-пилюльщика характеризовались малоснежностью и сильными зимними ветрами, летней сухостью, широким распространением в растительном покрове разреженных хионофобных группировок в сочетании степных и тундровых растений [20].

Экстремально низкие зимние температуры наряду с малоснежностью, способствовавшей выхолаживанию почвы, и летним иссушением в криохроны плейстоцена приводили к вымиранию доминировавших растительных сообществ на пологих возвышенностях рельефа, где свободный грунт затем занимали горностепные, горнотундровые и рудеральные растения, фитоценоотически между собой не связанные. Одним из основных факторов отбора растений для произрастания

в таких пустошных или рудеральных местообитаниях была ксерофильность в сочетании с терпимостью к выхолаживанию в зимних условиях при отсутствии снежного покрова, что могло выработаться эволюционным путем только в горных, достаточно сухих и холодных условиях.

В настоящее время подобные разреженные растительные сообщества характеризуются отсутствием или слабой выраженностью фитоценотических связей. Их формирование происходит стохастически под абсолютным воздействием внешних факторов и генетически целиком зависит от окружающей растительности, выступающей донором патиентных и эксплерентных видов, приспособленных к тем климатическим и эдафическим условиям, которые являются определяющими в таких диссипативных сообществах.

В позднем плейстоцене такие биотопы могли заселяться как синузильными группировками *Carex argunensis*, *Dryas punctata*, *Selaginella rupestris*, *Empetrum nigrum*, различных степных злаков, так и различными видами полыней, ив, крупок, маревых, создавая тундростепной аспект интерпретации позднеплейстоценовых спорово-пыльцевых спектров.

Малая продуктивность таких биотопов не позволяла им выступать основными пастбищами для представителей мамонтовой мегафауны, возможно, кроме *Saiga tatarica* [22]. Сайгак, начиная с 19 в., является одним из главных доводов тундростепного облика мамонтовой фауны, олицетворяя ее степную часть. Но современные исследования экологии и биологии сайгака указывают на ее приуроченность не к степным, а больше к полупустынным сообществам [23]. Очень интересные исследования по пищевому предпочтению сайгаков провели Б.Д. Абатуров с коллегами [24, 25], в результате которых выяснилось, что сайгаки при наличии маревых и гречишных в пастбищах стараются избегать поедания злаков, что сразу ставит вопрос о степной приуроченности сайгаков. В результате исследований также выяснилось, что сайгаки предпочитают биотопы, подвергшиеся пастбищной дигрессии с большим количеством сорных растений – *Kochia prostrata*, *Ceratocarpus arenarius*, *Bassia sedoides*, *Chenopodium alba* из семейства маревых, *Polygonum aviculare*, *Polygonum patulum* из семейства гречишных, *Potentilla bifurca* из розоцветных и другие. Некоторые из этих видов отмечаются в

палеофлористическом комплексе позднего плейстоцена Якутии, как *Polygonum aviculare*, *Descurainia sophia* (см. табл. 1), а другие, как *Kochia prostrata*, присутствуют в современной якутской флоре и, скорее всего, были гораздо шире распространены на позднеплейстоценовых стадиях сайгака. К сходным результатам о превалировании в питании сайгака маревых пришли Дж. Юргенсен с коллегами в ходе изучения палеодиеты плейстоценовой антилопы радиоизотопным способом [26]. Таким образом, сайгак при широком распространении рудеральных сообществ на территории Якутии был обеспечен кормовой базой в достаточной мере.

Останки сайгака в плейстоценовых отложениях свидетельствуют о широком распространении рудеральных сообществ, составленных из представителей маревых, гречишных, крестоцветных, астровых и злаковых в позднем плейстоцене. Возможно, что даже о более широком распространении, чем сейчас, несмотря на возросшую в последнее время антропогенную нагрузку на фитоценозы, приведшую к увеличению площадей рудеральных сообществ антропогенного происхождения. Данный факт, вероятнее всего, связан с тем, что в позднем плейстоцене экзогенные факторы формирования растительного покрова преобладали над эндогенными, что в свою очередь и привело к возрастанию роли стохастических сообществ ценофобных рудералов в региональной природной системе и соответственно снижению роли климатических сообществ – тайги и настоящих ковыльных степей.

Наличие сайгака в позднеплейстоценовом фаунистическом комплексе Северной Якутии также свидетельствует о малой высоте снежного покрова зимой. Это хорошо соотносится с хинофобностью ассоциаций *Carex argunensis*, возможно, широко распространенных в позднем плейстоцене, если судить по количеству находок жука-пилюльщика.

Заключение

Находки сайгака, жука-пилюльщика, а также большого количества макроостатков злаков, астровых, маревых, гречишных и крестоцветных в позднеплейстоценовых ориктоценозах свидетельствуют о широком развитии криоксерофитных сообществ. Типологическое определение этих сообществ как степных вызывает довольно большие сомнения. Анализ ареалов ксерофитных видов растений, произрастающих в современных

реликтовых степных ассоциациях и представленных в криоксерофитных сообществах позднего плейстоцена Якутии, указывает на то, что настоящие, ковыльные степи отсутствуют на территории Якутии с раннего плейстоцена, а возможно, и плиоцена. Реконструированные на основе позднеплейстоценовых находок жука-пилюльщика сообщества степями не являются, а являются криоксерофитными, хионофобными, диссипативными, осочковыми ценозами. Подобные сообщества со значительным участием рудеральных видов являются репродуктивными стадиями сайгаков, еще до недавнего времени олицетворявшими степной облик позднеплейстоценовой растительности Якутии.

Такие сообщества могли образовываться и распространяться вследствие экстремальных макроклиматических факторов (низкие зимние и высокие летние температуры, малоснежная зима), приводящих к выхолаживанию в зимнее время и высыханию верхних горизонтов почвы летом. Также на их формирование влияли распространение многолетней мерзлоты с криогенными процессами вспучивания, приводящими к образованию микро- и мезоположительных форм рельефа, и вытаптывание травяного покрова крупными стадными млекопитающими, что инициировало и усиливало процессы пастбищной дигрессии.

Дерновинно-злаковые и луговые степи в Якутии деградировали и распались вследствие нарастающего похолодания уже к середине плейстоцена. Часть степных участков были замещены пустошами и рудеральными ассоциациями. В позднем плейстоцене, в межледниковья, широкое распространение получили высокопродуктивные луговые сообщества, местами с присутствием отдельных степных видов, также присутствовали лесные группировки и криоксерофитные рудерально-пустошные ценозы. Последние усиливали свои позиции в криохроны позднего плейстоцена. Растительный покров носил мозаичный характер саваннового облика. В позднем плейстоцене в Якутии степи представляли собой такой же экстразональный тип растительности, как и в настоящее время, являясь реликтами более ранних эпох.

Литература

1. *Пешкова Г.А.* Степная флора Байкальской Сибири. М.: Наука, 1972. 208 с.
2. *Юрцев Б.А.* Реликтовые степные комплексы Северо-Восточной Азии. Новосибирск, Наука, 1981. 168 с.
3. *Сочава В.Б.* Географические аспекты сибирской тайги. Новосибирск: Наука, 1980. 256 с.
4. *Кожевников Ю.П.* Растительный покров Северной Азии в исторической перспективе. СПб.: НПО «Мир и семья-95», 1996. 400 с.
5. *Zazula G.D., Froese D.G., Elias S.A., Kuzmina S., Mathewes R.W.* Arctic ground squirrels of the mammoth-steppe: paleoecology of Late Pleistocene middens (24000–29450 14 C yr BP), Yukon Territory, Canada // *Quaternary Science Reviews*. 2007. Vol. 26 P. 979–1003. doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.005
6. *Gaglioti B.V., Barnes B.M., Zazula G.D., Beau-doin A.B., Wooller M.J.* Late Pleistocene paleoecology of arctic ground squirrel (*Urocitellus parryi*) caches and nests from Interior Alaska's mammoth steppe ecosystem, USA // *Quaternary Research*. 2011. Vol. 76, No. 3. P. 679–693. doi:10.1016/j.yqres.2011.08.004
7. *Zimov S.A., Zimov N.S., Tikhonov A.N., Chapin F.S.* Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon // *Quaternary Science Reviews*. 2012. Vol. 57. P. 26–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
8. *MacDonald G.M., Beilman D.W., Kuzmin Y.V., Orlova L.A., Kremenetski K.V., Shapiro B., Wayne R.K., Van Valkenburgh B.* Pattern of extinction of the woolly mammoth in Beringia // *Nature Communication*. 2012. P. 35–51. doi: 10.1038/ncomms1881
9. *Протопопов А.В.* Динамика наземных экосистем Якутии в позднем плейстоцене и голоцене. Якутск: Алаас, 2017. 412 с.
10. *Флора Сибири.* Т. 1–13. Новосибирск: Наука, Сиб.отд-ние, 1988–1997.
11. *Толмачев А.И.* Введение в географию растений. Л., 1974. 244 с.
12. *Бельгард А.Л.* Лесная растительность Юго-Востока УССР. Киев: КГУ, 1950. 264 с.
13. *Ермаков Н.Б.* Разнообразие бореальной растительности Северной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. 232 с.
14. *Намзалов Б.-Ц.Б.* Реликты в растительности Байкальской Сибири // *Вестник Бурятского государственного университета*. 2012. Спец. вып. [3]. С. 148–150.
15. *Пешкова Г.А.* Флорогенетический анализ степной флоры гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 2001. 200 с.
16. *Шелудякова В.А.* Степная растительность Якутского Заполярья // *Труды Ин-та биол. ЯФ СО РАН СССР*. 1957. Вып. 3. С. 68–81.
17. *Караванов М.Н.* Фрагменты реликтовых степей с *Helictotrichon krylovii* (N. Pawl.) Henrard. на крайнем северо-востоке Сибири // *Ботанический журнал*. 1958. Т. 43, № 4. С. 481–489.
18. *Цвелев Н.Н.* Злаки СССР. Л.: Наука, 1976.
19. *Юрцев Б.А.* Флора Сунтар-Хаята. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1968. 236 с.
20. *Берман Д.И.* Экология животных Северо-Восточной Азии и реконструкция плейстоценовых ландшафтов Берингии: Дисс. на соискание научн. степени докт. биол. наук в виде доклада. М., 2007. 56 с.

21. Егорова А.А. Сосудистые растения Юго-Западной Якутии // Флора и растительность Якутии. М., 2013. 169 с.

22. Protopopov A., Protopopova V., Neyzvestnykh A. The importance of ecotonic habitats in the spatial organization of the Late Pleistocene ecosystems of Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/395/1/012025>

23. Сайгак: филогения, систематика, экология, охрана и использование / ред. В.Е. Соколов, Л.В. Жирнов. М.: Изд-во РАН, 1998. 358 с.

24. Абатуров Б.Д., Петрищев Б.И., Колесников М.П., Субботин А.Е. Сезонная динамика кормовых ресур-

сов и питание сайгака на естественном пастбище в полупустыне // Успехи соврем. биологии. 1998. Т. 118, вып. 5. С. 564–584.

25. Абатуров Б.Д. Кормовые ресурсы, обеспеченность пищей и жизнеспособность популяций растительноядных млекопитающих // Зоол. журн. 2005. Т. 84, № 10. С. 125–127.

26. Jürgensen J., Drucker D.G., Stuart A.J., Schneider M., Buuveibaatar B., Bocherens H. Diet and habitat of the saiga antelope during the late Quaternary using stable carbon and nitrogen isotope ratios // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 160. P. 150–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.01.022>

Поступила в редакцию 20.02.2020

Принята к публикации 03.05.2020

Об авторах

ПРОТОПОПОВ Альберт Васильевич, доктор биологических наук, заведующий отделом, Академия наук Республики Саха (Якутия), 677007, Якутск, пр. Ленина, 33, <http://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, a.protopopov@mail.ru;

ПРОТОПОПОВА Виктория Валерьевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, <http://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, protopopova.vic@yandex.ru.

Информация для цитирования

Протопопов А.В., Протопопова В.В. Степной компонент позднеплейстоценовых экосистем Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 98–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-8>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-8

Steppe component of the Late Pleistocene ecosystems of Yakutia

A.V. Protopopov¹, V.V. Protopopova²

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

²Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia

a.protopopov@mail.ru

Abstract. The article discusses the origin of relict steppe sites found in some regions of Yakutia, mainly in the central and northeastern parts, as well as their distribution in the Late Pleistocene as a resource niche for a mammoth megafaunistic complex. It was shown that the true steppes existed on the territory of Yakutia in the Pliocene and Early Pleistocene. Xerophytic plant communities of the Middle Pleistocene genetic related to mountain-steppe associations. In the Late Pleistocene, cryoxerophytic phytocenoses did not have trans-Bering links, but were more widespread than at present.

The wide distribution of cryoxerophytic barren communities in the Late Pleistocene was due to extreme cryoaridity of the climate and low rainfall, especially in winter, which led to soil surface cooling. Despite the extremely low productivity, cryoxerophytic wastelands gave an ecological niche to a rather large ungulate saiga, which for a long time served as an argument in paleobotanical reconstructions for the distribution of steppes in Late Pleistocene.

In the Late Pleistocene, modern relict steppe plots occupied a subordinate position in the vegetation cover of Yakutia, which is still observed today.

Key words: Yakutia, Beringia, Late Pleistocene, Late Pleistocene ecosystems, Transberingian connections, relict steppe areas, interglacial period, cryochron, saiga, xerophytes.

Acknowledgements. This work was supported by the RFBR grant 18-45-140007 p_a.

References

1. Peshkova G.A. Stepnaya flora Bajkalskoj Sibiri. M.: Nauka, 1972. 208 p.
2. Yurcev B.A. Reliktovye stepnye komplekсы Severo-Vostochnoj Azii. Novosibirsk: Nauka, 1981. 168 p.
3. Sochava V.B. Geograficheskie aspekty sibirskoj tajgi. Novosibirsk: Nauka, 1980. 256 p.
4. Kozhevnikov Yu.P. Rastitelnyj pokrov Severnoj Azii v istoricheskoj perspektive. SPb.: NPO «Mir i sem'ya-95», 1996. 400 p.
5. Zazula G.D., Froese D.G., Elias S.A., Kuzmina S., Mathewes R.W. Arctic ground squirrels of the mammoth-steppe: paleoecology of Late Pleistocene middens (24000–29450 14 C yr BP), Yukon Territory, Canada // Quaternary Science Reviews. 2007. Vol. 26. P. 979–1003. doi:10.1016/j.palaeo.2006.06.005
6. Gaglioti B.V., Barnes B.M., Zazula G.D., Beaudoin A.B., Wooller M.J. Late Pleistocene paleoecology of arctic ground squirrel (*Urocyon parryi*) caches and nests from Interior Alaska's mammoth steppe ecosystem, USA // Quaternary Research. Vol. 76, No. 3. 2011. P. 679–693. doi:10.1016/j.yqres.2011.08.004
7. Zimov S.A., Zimov N.S., Tikhonov A.N., Chapin F.S. Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon // Quaternary Science Reviews. 2012. Vol. 57. P. 26–45. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
8. MacDonald G.M., Beilman D.W., Kuzmin Y.V., Orlova L.A., Kremenetski K.V., Shapiro B., Wayne R.K., Van Valkenburgh B. Pattern of extinction of the woolly mammoth in Beringia // Nature Communication. 2012. P. 35–51. doi: 10.1038/ncomms1881
9. Protopopov A.V. Dinamika nazemnyh ekosistem Yakutii v pozdnem plejstocene i golocene. Yakutsk: Alaas, 2017. 412 p.
10. Flora Sibiri. T. 1–13. Novosibirsk: Nauka, Sib. otd-nie, 1988–1997.
11. Tolmachev A.I. Vvedenie v geografiyu rastenij. L., 1974. 244 p.
12. Bel'gard A.L. Lesnaya rastitel'nost' Yugo-Vostoka USSR. Kiev: KGU, 1950. 264 p.
13. Ermakov N.B. Raznoobrazie boreal'noj rastitel'nosti Severnoj Azii. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2003. 232 p.
14. Namzalov B.Cz.B. Relikty v rastitelnosti Bajkalskoj Sibiri // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. 2012. Specz. vyp. [3]. P. 148–150.
15. Peshkova G.A. Florogeneticheskij analiz stepnoj flory gor Yuzhnoj Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 2001. 200 p.
16. Sheludyakova V.A. Stepnaya rastitelnost Yakutskogo Zapolyarya // Trudy In-ta biol. YaF SO AN SSSR. 1957. Iss. 3. P. 68–81.
17. Karavaev M.N. Fragmenty reliktovyh stepej s *Helictotrichon krylovii* (N. Pawl.) Henrard. na krajnem severo-vostoke Sibiri // Botanicheskij zhurnal. 1958. Vol. 43, No. 4. P. 481–489.
18. Czelyov N.N. Zlaki SSSR. L.: Nauka, 1976.
19. Yurcev B.A. Flora Suntar-Xayata. L.: Nauka, Leningr. otd-nie, 1968. 236 p.
20. Berman D.I. Ekologiya zhivotnyh Severo-Vostochnoj Azii i rekonstrukciya plejstocenovyh landshaftov Beringii: Diss. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. biol. nauk v vide doklada. M., 2007. 56 p.
21. Egorova A.A. Sosudistye rasteniya Yugo-Zapadnoj Yakutii // Flora i rastitelnost Yakutii. M., 2013. 169 p.
22. Protopopov A., Protopopova V., Neyzvestnykh A. The importance of ecotonic habitats in the spatial organization of the Late Pleistocene ecosystems of Yakutia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/395/1/012025>
23. Sajgak: filogeniya, sistematika, e'kologiya, oxrana i ispol'zovanie / Pod. red. V.E. Sokolova, L.V. Zhirnova. M.: Izd-vo RAN, 1998. 358 p.
24. Abaturov B.D., Petrishhev B.I., Kolesnikov M.P., Subbotin A.E. Sezonnaya dinamika kormovyh resursov i pitanie sajgaka na estestvennom pastbishhe v polupustyne // Uspexi sovrem. biologii. 1998. Vol. 118, Iss. 5. P. 564–584.
25. Abaturov B.D. Kormovye resursy, obespechenost pishhej i zhiznesposobnost populyacij rastitel'noyadnyh mlekopitayushhih // Zool. zhurn. 2005. Vol. 84, No. 10. P. 125–127.
26. Jürgensen J., Drucker D.G., Stuart A.J., Schneider M., Buuveibaatar B., Bocherens H. Diet and habitat of the saiga antelope during the late Quaternary using stable carbon and nitrogen isotope ratios // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 160. P. 150–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.01.022>

СТЕПНОЙ КОМПОНЕНТ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ЭКОСИСТЕМ ЯКУТИИ

About the authors

PROTOPOPOV Albert Vasilevich, doctor of biological sciences, head of department, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenin ave., Yakutsk, 677007, Russia,
<http://orcid.org/0000-0001-6543-4596>, a.protopopov@mail.ru;

PROTOPOPOVA Viktoria Valerevna, engineer-researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 41 Lenin ave., Yakutsk, 677980, Russia,
<http://orcid.org/0000-0001-8612-5960>, protopopova.vic@yandex.ru.

Citation

Protopopov A.V., Protopopova V.V. Steppe component of the Late Pleistocene ecosystems of Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 98–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-8>

Биологические ресурсы

УДК 598.279

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-9

Общий обзор фауны отряда Соколообразные (Falconiformes) долины Средней Лены и прилегающих к ней территорий

А.П. Исаев, В.В. Бочкарев, Н.Г. Соломонов, Р.А. Кириллин, Е.В. Шемякин, В.Ю. Габышев

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

Аннотация. Приведены результаты оригинальных наблюдений в период с 2003 по 2019 г., анализа литературных, архивных и опросных сведений по представителям отряда Соколообразные (Falconiformes) долины Средней Лены и прилегающих к ней территорий. Отмечено, что в настоящее время на исследованной территории регулярно встречаются 16 видов, из которых гнездящиеся являются 13, возможно гнездятся – 3 и встречаются во время сезонных миграций и кочевок – 2. В работе дана относительная оценка численности в длительной ретроспективе сапсана и современное состояние популяций других дневных хищных птиц региона. Отмечено, что до середины XX в. в долине Средней Лены многие представители отряда были обычными видами местной орнитофауны, заметное сокращение их численности началось с 60-х гг. прошлого столетия. В настоящее время на исследованной территории из дневных хищных птиц широко распространенными и обычными, местами многочисленными, являются только коршун и пустельга, остальные – малочисленные или редкие. В последние десятилетия большая часть долины Средней Лены подвергается интенсивной трансформации природных сообществ, на которую наиболее остро реагируют виды, занесенные в Красную книгу Якутии, такие как скопа, беркут и орлан-белохвост, отличающиеся известной нетерпимостью к изменению и сокращению среды обитания.

Ключевые слова: хищные птицы, отряд Соколообразные, изменение численности, долина Средней Лены, Центральная Якутия.

Благодарности. Исследования проведены в рамках базового проекта ИБПК СО РАН VI.51.1.11 «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». В работе кроме собственных и литературных данных привлечены неопубликованные данные, любезно предоставленные д.б.н. Гермогеновым Н.И. и к.б.н. Борисовым З.З., использованы материалы опросных сведений местных жителей. Неоценимую помощь в полевых исследованиях оказали учителя Хангаласского района Ноговицын П.Р. (Ойская СОШ) и Федотов П.С. (Октемская СОШ), жители Намского района Никонов Т.П. (краевед) и Софронов Е.Ф. (учитель Бетюнской СОШ) и др.

Введение

Среднее течение реки Лена (или Средняя Лена) расположено между устьями рек Витим и Алдан (протяженность 1403 км) и имеет широкую и сложно террасированную долину. Примерно в 120 км южнее г. Якутск река имеет выраженную долину только на левобережье, а справа на многие сотни километров тянутся известковые скалы, подступающие к самой воде. Несколько выше устья р. Буотама борта долины р. Лена окаймляются террасовыми уступами высотой около 50 м, сложенными песчаниками. От г. Покровск

долина реки сильно расширяется (до 25 км), значительно увеличивается пойма (7–15 км), изобилующая вытянутыми вдоль реки старицами, протоками, ложбинами. Русло реки раздроблено на множество протоков, образующих многочисленные острова [1]. 70 % территории заняты тайгой – сочетанием хвойных (лиственничники, ельники, сосняки), мелколиственных (ивняки, березняки) лесов, кустарниковых зарослей, луговых сообществ и сельскохозяйственных угодий. Лесистость поймы местами может превышать 30 %, на надпойменных террасах достигает 50 % и бо-

лее, в наиболее освоенных человеком участках площади лесов сокращены до 10–15 % [2]. Средняя Лена характеризуется крайне континентальным климатом и коротким летом: средняя температура января $-43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля $+18,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность безморозного периода в г. Якутск равна 95 дням [3].

Судя по литературным данным [4–7], в конце 19–середины 20 вв. на Средней Лене многие представители отряда Соколообразные (*Falconiformes*) были обычными видами местной орнитофауны. Заметное сокращение численности хищных птиц началось здесь в 60-е гг. прошлого столетия [8], и количество многих с каждым годом снижалось. В последние десятилетия данная территория подвергается интенсивной трансформации природных сообществ, на которую наиболее остро реагируют хищные птицы, поскольку именно они стоят на вершине пирамиды и замыкают сложные, нестабильные во времени и пространстве трофические цепочки. Наиболее уязвимыми

из этих видов являются объекты международной охраны, занесенные в Красные страницы МСОП (сапсан, кречет, беркут, орлан-белохвост и филин), которые отличаются известной нетерпимостью к изменению и сокращению среды обитания. Эти обстоятельства подвигли нас на проведение исследований, позволяющих в какой-то мере оценить на данной территории современное состояние дневных хищных птиц.

В 80-е гг. прошлого столетия в основном была завершена инвентаризация фауны птиц Средней Лены, в том числе отряда соколообразных [9]. В бассейне Лены наблюдения за отдельными видами дневных хищных птиц были проведены в 1950–1960-х гг. [6, 10]. Нами с 2003 г. целенаправленно или попутно при проведении других работ были проведены исследования распространения, численности и некоторых сторон биологии дневных хищных птиц. За этот период работ по многим представителям соколообразных собран достаточно обширный материал, а

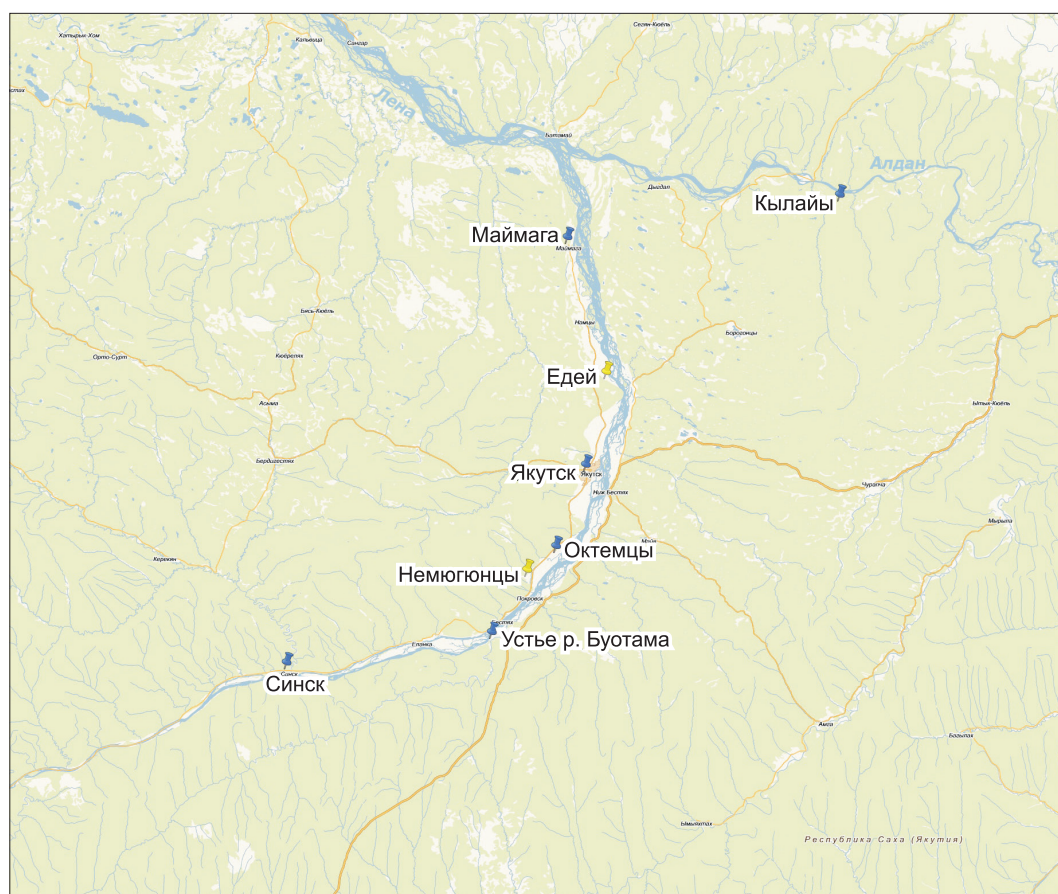


Рис. 1. Участки проведения учетных работ (желтые – площадочные, синие – точечные).

Fig. 1. Areas of counting work (yellow color: sites, blue color: points).

по отдельным видам опубликованы обобщающие обзоры [11–14]. Следует отметить, что на сегодня нами обследована лишь незначительная часть данной территории и представленный нами обзор является предварительным.

Материал и методика

Спорадичность распространения хищных птиц показывают, что традиционные методы учетов не всегда отражают их действительную численность [15, 16]. Поэтому при учетных работах, наряду с общепринятыми пешими маршрутными учетами [17], использовали адаптированные специально для пернатых хищников учеты [18, 19] площадочные – в окрестностях сел Немюгюнцы и Едей и точечные – в окрестностях г. Якутск, сел Синск, Октемцы, Кылайы и Маймага, устье р. Буотама (рис. 1). Более или менее подробные сведения по численности и распространению соколообразных птиц получены нами в период с 2008 по 2019 г., в основном в трех административных территориях, расположенных в бассейне среднего течения Лены (Хангаласский, Намский районы и Административная территория г. Якутск). Ежегодно с 2013 г. в июне–августе с поиском гнездовых территорий сапсана и других хищных птиц были проведены автомобильные, пешие и водные маршруты вдоль левого берега р. Лена от с. Кытыл-Джура до с. Булгуньяхтах (общая протяженность 180 км). В 2014–2015 гг. на правобережье организованы сплавы на лодках вдоль берега и пешие маршруты от точки напротив с. Кытыл-Джура до начала о. Харыйялах (160 км). В июле–августе 2016 г. были организованы учеты птиц на водном маршруте на катере и на автомобилях на обоих берегах р. Лена от с. Тинная до с. Тюбя (общая протяженность более 1050 км). Всего с 2003 по 2019 г. автомобильными учетными маршрутами пройдено более 2200 км, пешими – 246 км, водными (на катере, резиновых и моторных лодках) – около 1900 км. Поиски гнезд беркута проводили с 2006 г., в основном в марте–начале мая, когда не мешала листва и была возможность проезда на автомашинах по зимникам. Обнаруженные гнезда в течение летнего периода, по возможности, посещали заново для установления гнездования орлами. Гнезда и гнездовые участки других хищных птиц выявлялись в период с мая по сентябрь 2003–2019 гг. во время пеших, автомобильных и водных маршрутов.

Краткий обзор

Семейство Скопиные *Pandinidae* (Bonaparte, 1854)

Скопа *Pandion haliaetus* (Linnaeus, 1758) в Якутии имеет широкое распространение, которое носит спорадический характер. В Средней Лене в конце прошлого столетия встречалась лишь в пределах Лено-Амгинского и Алдано-Амгинского междуречий [20]. По Амге возможно гнездование в устьях рек Мундуруччу и Булун [21]. В конце 90-х в осенний период отмечена в притоках р. Алдан (Нуотара, Куолума, Амга и Татта), неоднократно наблюдали в долине р. Тамма (приток Лены) близ с. Хатылыма [22]. Ранее в долине Средней Лены до 50-х гг. XX в. скопа регулярно пребывала и гнездилась в районе от устья р. Алдан до устья р. Вилюй [8]. 12 июля 2011 г. в 20 км от с. Кылайы на левом берегу р. Алдан была встречена одна скопа. В Лено-Вилюйском междуречье А.И. Иванов [5] 15 августа 1926 г. на оз. Ченаали наблюдал сразу 9 птиц. В настоящее время присутствие скопы в долине Лены и Лено-Вилюйском междуречье не отмечено. Есть сведения о гнездовании скопы в бассейне Вилюя – окрестности с. Кирово Вилюйского улуса.

Семейство Ястребиные *Accipitridae* (Vigors, 1824)

Черный коршун *Milvus migrans* (Boddaert, 1783) в Средней Лене является широко распространенным и обычным, местами многочисленным, перелетно-гнездящимся видом. Как и в других местах ареала [23–26], эта птица избегает глухой тайги и проявляет явную привязанность к антропогенным территориям. Так, по наблюдениям А.И. Иванова [5], в начале прошлого столетия в г. Якутск «...на скотобойне коршун встречался в невероятном количестве». В настоящее время в окрестностях города скопление птиц отмечается в основном на полигоне бытовых отходов. Например, 15 августа 2017 г. здесь на площадке 200×200 м, где вываливали свежий мусор, за один раз насчитали 42 летящих коршунов и 47 – сидящих. Иногда скопления птиц наблюдаются в местах массового отдыха населения. Например, 23 июня 2018 г. вблизи города в местности «Ус-Хатын» во время якутского праздника «Ысыах» мы наблюдали до 23 одновременно парящих коршунов.

В 1961 г. в Лено-Амгинском междуречье в районе среднего течения р. Тамма на 15 км² гне-

зидилось 7 пар [27]. По данным учетов, в июне 1983 г. на центральной части водораздела этого междуречья численность черного коршуна составляла 0,13 особей/км², в ее восточной части – 0,03, в июле 1987–1988 гг. в долинах рек Татта и Суола плотность населения равнялась 0,21 особей/км², в облесенных местообитаниях – 0,25 [28]. В 90-х гг. прошлого столетия в долине среднего течения р. Амга вид встречался регулярно [21]. По данным учетов, в июне 2005 г. в долине Амги вблизи с. Болугур численность коршуна составляла 0,02 особей/км². На северной части Лено-Амгинского междуречья в окрестностях с. Кыллайы в мае–июле 2011–2012 гг. плотность населения хищника равнялась 0,2–0,7 особей/км².

В долинах Лены на ее левобережье по данным пеших маршрутных учетов в первой половине лета (июнь–июль) плотность населения коршуна в разные годы колебалась от 1,4 до 3,2 особей/км² (табл. 1). В культурных ландшафтах долины Лены в 1970–1972 гг. плотность населения этого хищника равнялась 0,7 особей/км² [29]. По данным учетов во время автомобильных маршрутов, в июне–июле 2017 г. в долине Туймаада встречаемость коршуна составила 1,4 особей/10 км маршрута, Эркээни – 1,6 и Энсиэли – 3,0. Следует отметить, что автомобильные трассы пролегают в основном посередине указанных долин и очевидны большие пропуски птиц. Например, 27 июня 2002 г. по трассе на 26 км маршруте встречены 3 особи, а при движении вдоль склонов коренного берега Эркээни протяженностью 31 км было учтено 73 коршуна. Хищники здесь слетались со всей долины и с близлежащих лесных участков надпойменной террасы, и в большинстве случаев были отмечены летящими вдоль склона, в поисках своего основного корма – суслика.

В Лено-Вилуйском междуречье вблизи г. Якутск на открытых участках (зарастающие пашни, луга, заболоченные участки) плотность населения коршуна по данным учетов 2016 г. составляла 0,05–1,8 особей/км² [30]. В южной части Средней Лены, где долина реки не выражена вблизи населенных пунктов Синск и Едей, плотность населения хищника в июне 2013 г. равнялась 0,3–0,8 особей/км², в северной части в окрестностях с. Маймага – 0,07–0,1 в середине мая 2014 и 2016 гг. и 3,5 в июле 2015 г.

В целом, на обоих междуречьях птицы наиболее обычны в поймах рек, открытых местах – лугах и полях, вблизи баз коневодов, сайылыков

Таблица 1

Плотность населения коршуна (особей/км²) в долинах Туймаада и Эркээни (июнь–июль)

Table 1

Black Kite population density (individuals/km²) in the Tuimaada and Erkeeni Valleys (June–July)

Долины р. Лены	2008 г.	2011 г.	2012 г.	2014 г.	2017 г.
Туймаада	1,7	–	–	–	1,4
Эркээни	1,8	2,6	3,2	1,8	–

(летние поселения для выпаса крупного рогатого скота), обочинах дорог, берегах озер и пр.

Прилет коршуна отмечается во 2–3-й декаде апреля [28, 31, наши данные]. Наиболее ранний прилет отмечен близ с. Тулагинцы 5 апреля 1961 г. [27]. Гнезда коршуны устраивают в основном на перестойных лиственницах и соснах, реже – березах. 22 мая 1989 г. на острове вблизи с. Павловск гнездо этого хищника было обнаружено на иве (сообщение Н.И. Гермогенова). Как и во многих местах обитания, обычно они несколько лет подряд занимают одно и то же гнездо, которое сооружают из веток произрастающих поблизости деревьев. Вблизи свалок встречаются постройки птиц, где вместе с ветками часто используются проволока, куски различных металлических и пластмассовых деталей. Как и на Лено-Амгинском междуречье [28], выстилка состоит из волос лошади, кусков земли, обрывков бумаги, тряпок. Кроме этого, в обследованных нами гнездах обычны сухие круглые экскременты лошадей, сухая трава, реже – куски полиэтиленовых пакетов, китайские перчатки, плюшевые игрушки, фрагменты шкур различных домашних и диких животных (лошадь, крупный рогатый скот, косуля, суслик, ондатра), чешуя рыб и т.п.

Как отмечено в литературе [7, 28] и по нашим наблюдениям, начало кладки коршуна приходится на вторую–третью декаду мая, начало вылупления – вторую–третью декаду июня, вылет птенцов – конец июля–начала августа, отлет – вторую половину сентября–начало октября.

Полевой лунь *Circus cyaneus* (Linnaeus, 1766) широко распространенный перелетно-гнездящийся вид. В начале прошлого века А.И. Иванов [5] отмечал, что лунь чаще встречался в долине Лены. До 70-х гг. прошлого столетия полевой лунь в долины Лены был обычным видом [9], и, по данным учетов 1970–1972 гг., в культурных

ландшафтах плотность населения этого хищника равнялась 0,4 особей/км² [29]. С 1980-х гг. лунь в Средней Лене можно характеризовать как малочисленный вид. Так, по данным маршрутных учетов в июне 1983 г., на центральной части водораздела Лено-Амгинского междуречья численность полевого луня составляла 0,1 особей/км². В долине Лены (окрестности Якутска), в 1985 – 0,05, в 70 км выше города – 0,5 [28]. В 1990-е и 2000-е гг. полевой лунь был обычен лишь в НПП «Ленские столбы» и чаще встречался в расширениях нижнего течения Буотамы, где сосредоточены основные сенокосные угодья [32]. На юге Средней Лены в местности Батамай в июле–августе 2017 г. плотность населения птиц составляла 0,2 особей/км², в центральной части (окрестности г. Якутск) в июле 2016 г. – 0,06, на северной (окрестности с. Маймага) в середине мая 2015 г. – 0,04.

На Лено-Вилуйском междуречье А.И. Ивановым [5] несколько птиц были добыты вблизи оз. Джюкая, в местностях Бадараннах и Амчах. Эти сведения указывают, что в те годы на исследованной территории вид здесь был нередок. В 1960–1962 гг. на этом междуречье в долине среднего течения р. Кенкеме этот лунь встречался сравнительно часто [33]. Во время пеших учетных работ нами на Лено-Вилуйском междуречье вид не отмечен. О том, что на междуречье вид довольно обычный, можно судить по их встречам при движении на автомобилях по Вилуйской трассе. Так, в июле 2005 г. от г. Якутск до с. Магарассы (102 км) встречены 2 птицы, в июне 2007 г. от г. Якутск – с. Бердыгестях (180 км) – 3.

Судя по литературным источникам [28, 31] и нашим наблюдениям, лунь появляется во второй декаде апреля–начале мая, наиболее часто эти птицы встречались на пролете с 12–14 мая. Начало кладки во второй декаде мая. Единственное гнездо было найдено в Лено-Амгинском междуречье Г.П. Ларионовым с коллегами [28] и располагалось на заломе, в тростниковых зарослях небольшого озера, было сооружено из сухих веток кустарников, стеблей камыша, тростника, осок и 20 мая содержало 6 яиц. Начало вылупления птенцов полевого луня приходится на вторую–третью декаду июня, из мест гнездовий отлетает в сентябре, наиболее поздняя встреча – 5 октября.

Восточный лунь *Circus spilonotus* (Kaup, 1847). В Якутском округе А.И. Иванов [5] этого луня характеризовал как очень редкий вид. Последую-

щие исследования показали, что восточный лунь действительно крайне редкая птица только в таежной части Лено-Вилуйском междуречье. Так, во время маршрутов в 1960–1962 гг. на этом междуречье в долине среднего течения р. Кенкеме этот лунь встречен лишь один раз [33]. На водоразделе Лено-Амгинского междуречья распространен крайне неравномерно и плотность населения колеблется от 0,03 до 0,32 особи/км² [28]. Авторы отмечают, что местами вид был здесь обычным. Например, в 1978–1987 гг. в северо-западной части водораздела на трех крупных тростниковых озерах, располагающихся в 2–3 км друг от друга, на площади около 30 км² ежегодно гнездились по 4–6 пар. Как было отмечено ранее, вблизи г. Якутск лунь не представлял редкости [7]. По нашим данным, в окрестностях города плотность населения восточного луня в середине июля в 2015–2019 гг. составляла 0,3–0,5 особей/км², что указывает на относительно высокую численность. В 50 км выше г. Якутск вблизи с. Октемцы, по данным учетных работ, в третьей декаде мая 2008 г. плотность населения луня составляла 0,3 особей/км² и там же при учетах в середине июня 2011 г. – 0,1.

В долине р. Лена гнездится на пойменных и надпойменных тростниковых водоемах [9]. На водоразделе также тяготеет к крупным и средним озерам с развитыми зарослями тростника или камыша, но селится и по закоряженным, поросшим редкими кустарниковыми насаждениями берегам небольших озер [28].

Как отмечено в литературных источниках [5, 7, 28] и по нашим наблюдениям, восточный лунь в местах гнездования появляется во второй декаде апреля–первой декаде мая, наиболее раннее появление отмечено в 1989 г. – 17 апреля, начало кладки во второй декаде мая–первой декаде июня, начало вылупления – вторая декада июня–первая декада июля, отлет – в сентябре, наиболее поздняя встреча – 1 октября. Брачные игры луней мы наблюдали 14 мая 2018 г. (рис. 2).

Тетеревятник *Accipiter gentilis* (Linnaeus, 1758) предпочитает населять сплошные массивы леса, в древостое которого преобладает лиственница. Однако регулярно отмечается и в долинах рек, в пойменных ивняках.

В центральной части Якутии в 50-х гг. прошлого столетия ястреб-тетеревятник был обычной птицей [34], а с 70–80-х стал встречаться довольно редко [35]. Ранее, в зависимости от количества основного корма (заяц-беляк), числен-



Рис. 2. Брачные игры восточных луней. 14 мая 2018 г. Фото Р.А. Кириллина.

Fig. 2. Mating games of Eastern Harriers. May 14, 2018. Photo by Ruslan A. Kirillin.

ность тетеревятника была подвержена заметным колебаниям. Так, в 1940–1950-х гг. этот хищник в отдельные зимы был характерной, местами довольно многочисленной птицей, а в годы низкой численности зайца – крайне редкой [27]. Следует отметить, что в Центральной Якутии с 1980-х гг. отмечается продолжительная депрессия численности зайца-беляка, и, скорее всего поэтому, в настоящее время тетеревятник в Средней Лене является довольно редкой птицей. В зимний сезон 2001–2002 гг. во время зимних маршрутных учетов тетеревиных птиц в бассейне Средней Лены на автомаршрутах общей протяженностью 1973 км тетеревятник встречен лишь 1 раз. Некоторое повышение численности тетеревятника отмечено в зиму 2004 г., в год высокой численности каменного глухаря и тетерева, когда на Лено-Амгинском междуречье на автомаршрутах общей протяженностью 360 км ястреб был встречен нами в 3 удаленных друг от друга участках. На этом междуречье некоторые повышения численности тетеревятника были отме-

чены ранее в долинах рек Суола и Татта. Так, по данным маршрутных учетов в 1987–1988 гг., в долинах этих рек плотность населения вида составляла 0,4 особи/км² [28].

В Лено-Вилуйском междуречье вид тоже встречается довольно редко. Так, во время регулярных автомобильных и наших пеших маршрутов в зимние периоды 2010–2018 гг. в Хангаласском районе тетеревятник встречен всего 2 раза. В районе г. Якутск, судя по данным учетов в августе–сентябре 1988 г., плотность населения тетеревятника составляла 0,05 особи/км² [28]. В весенние периоды 2014–2019 гг. вблизи дач Сергеев (окрестности г. Якутск) на участке площадью 5×10 км держались сначала 1 пара, затем 2 пары этих хищных птиц. Здесь в двух местах держат домашних голубей, и ястреба время от времени ловят их. Примерно в 30 км от города плотность населения тетеревятника в июне–июле 2010 г. составляла 0,09 особи/км² [30].

В целом, в настоящее время вид на Средней Лене является довольно редким, и наблюдается

повышение его численности в местах концентрации кормов.

В Лено-Амгинском междуречье гнезда хищник устраивает в 300-метровой приопушечной полосе леса на крупных и средних лиственницах, в центральной или нижней части их крон, на ветвях первого порядка, вплотную к стволам, на высоте 3—10 м.

Гнезда сооружаются из сухих веток лиственницы, сосны; лоток выстилается хвоей и корой сосны, лиственницы, пухом и перьями птиц [28]. По нашим наблюдениям, тетеревиатник использует одно гнездо несколько лет подряд или может занимать поочередно одно гнездо из 3–4 имеющихся на участке.

По литературным сведениям [28, 36] и по нашим данным, начало кладки тетеревиатника наблюдается в третьей декаде апреля–первой декаде мая, начало вылупления – первая–вторая декада июня, птенцы покидают гнездо в третьей декаде июля.

Перепелятник *Accipiter nisus* (Linnaeus, 1758). В Средней Лене населяет долинную и водораздельную тайгу, обитая в опушечной части лесных массивов. В Лено-Амгинском междуречье гнездится в густом смешанном лесу, чаще вблизи (50—300 м) озер или мелких речек [28].

В Лено-Амгинском междуречье перепелятник довольно обычный гнездящийся вид. Так, в центральной части междуречья на территории I Хаптагайского наслеста (Мегино-Кангаласский район) в 1953 г. в радиусе 2 км было обнаружено три выводка [10], а по долине р. Суола плотность населения составляла 0,4 особей/км² [28], в северной части в окрестностях с. Кылайы в начале сентября 2013 г. – 0,4 особей/км².

Вид в долине Лены местами довольно обычный. Так, в центральной части Средней Лены, в островках леса вблизи с. Октемцы, во время учетных работ в середине июня 2011 г. плотность населения составляла 2,0 особей/км²; в южной части – на острове Харыйалах в начале июня 2014 г. – 1,5; в окрестностях сел Синск и Едей в конце июня 2013 г. – 0,8.

В Лено-Вилуйском междуречье А.И. Ивановым [5] на маршруте в 900 км в 1926 г. встречен лишь один раз около уроч. Хара-Сахыл. В то же время в 1960-х гг. он был довольно многочисленным в долине среднего течения р. Кенкеме [33]. В 2012 г. наибольшая плотность этих птиц нами зафиксирована на 26 км Вилуйского тракта, где на расстоянии менее 1 км обнаружены 2 гнезда.

В местах гнездовой весной перепелятник появляется во второй–третьей декаде апреля. Судя по литературным сведениям [10, 28] и нашим наблюдениям, кладки отмечены во вторую–третью декаду мая–первую декаду июня, начало вылупления – во вторую декаду июня, вылет птенцов – в начале августа. Перепелятник каждый год строит новое гнездо, но занимает один и тот же участок. Предпочитает гнездиться недалеко от открытых участков: у лесных дорог, на опушке леса, у болот, но всегда среди густого древостоя. Гнездо строит из сухих веток лиственницы, в подстилке использует кору. Обычно гнездо строит относительно невысоко – 4–6 м, но бывает и на высоте 11–12 м. Отлет птиц происходит в сентябре–октябре.

Зимняк *Buteo lagopus* (Pontoppidan, 1763). Обычен лишь во время сезонных миграций, главным образом по долинам крупных рек. По литературным сведениям [28, 36] и нашим данным, пролет весной отмечается во второй–третьей декаде апреля. В долине Лены наиболее раннее появление зимняка весной регистрировалось 19 апреля 1975 г. [28]. Мигрирующие одиночные особи отмечаются до середины мая. Осенний пролет наблюдается со второй половины сентября до середины октября, массовый – в начале октября, наиболее поздние встречи – 18 октября.

Канюк *Buteo buteo* (Linnaeus, 1758). Обитатель южной части Якутии. Гнездится канюк в тех же биотопах, что и черный коршун. Гнезда размещаются на лиственнице, изредка на елях и ивах, обычно в нижней части крон, на ветвях первого порядка, вплотную к стволам, на высоте 3–10 м.

В Лено-Амгинском междуречье в июне 1983 г. численность канюка на аласных лугах центральной части водораздела составляла 0,1 особей/км², в 1987–1988 гг. в июле в долинах рек Суола и Татта на лугах – 0,05, в облесенных местообитаниях – 0,4.

В долине р. Лена в июле 1985 г. на участке между устьями рек Буотамы и Лютенга в лиственничниках – 1,0, в сосняках – 1,1 особей/км² [28]. В долине левобережья Лены вблизи с. Октемцы, по данным учетов, в середине июля 2011 г. плотность населения составила 2 особей/км².

В Лено-Вилуйском междуречье в ее таежной зоне в 30 км от Якутска в июне 2015 г. плотность населения канюка составляла 0,03 особей/км² [30].

Судя по литературным источникам [28, 37] и по нашим наблюдениям, в местах гнездовой весной канюк появляется в конце второй–начале

третьей декады апреля. Размножение начинается в первых числах мая, массовое во второй декаде мая. Материалом для постройки гнезд служат сухие ветки лиственницы, сосны, ивы, кора лиственницы; лоток выкладывается зелеными побегами сосны и лиственницы. Начало вылупления птенцов отмечается в первой декаде июня. Птенцы покидают гнезда и поднимаются на крыло в последней декаде июля–первой половине августа. Осенью канюк из мест гнездовой отлетает в сентябре–начале октября. Наиболее поздняя встреча – 6 октября.

Беркут *Aquila chrysaetos* (Linnaeus, 1758). Ранее этот орел был распространен на гнездовье по всей таежной Якутии [7]. А.И. Иванов [5] указывает, что в Зоологическом музее АН хранятся тушки двух птенцов, добытых в окрестностях г. Якутск. Этот же автор отмечает, что в окрестностях города летом 1926 г. добыли еще нелетную молодую птицу. Эти данные свидетельствуют, что здесь в начале XX в. беркут был обычным гнездящимся видом. В 50-х гг. вблизи города гнездование этого вида отмечено на Табагинском мысе. Гнездо было обнаружено в 1955 г. [13], в 1961 г. еще одно жилое гнездо было обнаружено здесь в долине р. Кенкеме [7]. В 70-е годы XX в. беркут перестал гнездиться в окрестностях с. Тулагинцы [38]. В долине Энсиэли в окрестностях с. Едей (Намский район) 25 июня 1975 г. было обнаружено жилое гнездо на лиственнице [39]. В гнезде был один птенец. На следующий год жилое гнездо с одним птенцом найдено в 1 км от этого гнезда. Случаи гнездования беркута были известны также на левобережье Лены, на северо-западе Лено-Алданского междуречья, где в 1981–1982 гг. отмечены два жилых гнезда [28]. Найденные гнезда размещались на промежуточной площадке триангуляционной вышки и на крупной высохшей лиственнице. В гнезде, найденном 24 мая 1981 г., находилось 1 яйцо и 2 разновозрастных птенца в пуховом наряде. 9 июля 1982 г. недалеко от упомянутого гнезда нашли другое, которое оказалось брошенным (в нем находились 2 расклеванных яйца). В обоих случаях птицы гнездились в этих постройках только по одному году.

На сегодня в Средней Лене известно 33 гнездовой беркута (рис. 3) и из них в последние годы гнездились в 11 [13]. Гнезда беркуты устраивают в основном на перестойных лиственницах возрастом 120 лет и более (лишь в одном случае на сухостое) высотой $16,6 \pm 3,3$ м ($n = 11$),

в 4 случаях на соснах высотой $14,4 \pm 1,6$ м. Гнезда расположены на высоте $10,0 \pm 1,1$ ($n = 15$) и сделаны из толстых сучьев, подстилкой служат ветки сосны, шерсть и т. п. Постройка обновляется и с годами увеличивается до 1,6 м в диаметре и 1,7 м высоты ($n = 15$). В 7 гнездовых участках обнаружены по 2 гнезда, расположенные друг от друга от 40 м до более 1 км.

Следует отметить, что с начала 2000-х гг. идет постепенное повышение численности птиц и появление гнездовой на территориях, где долгое время орлы в гнездовой период отсутствовали. Так, в окрестностях г. Якутск последнее жилое гнездо было отмечено в долине р. Кенкеме в 1978 г. [4]. После этого только через 38 лет 28 июня 2016 г. в окрестностях с. Кильдямцы на склоне коренного берега геологами А.В. Костиным и О.Б. Олейниковым было обнаружено гнездо беркута на сосне. При посещении 7 июля этого же года в гнезде находились два птенца. Через год 16 апреля самка насиживала яйца, 1 июня – в гнезде 2 пуховых птенца двухнедельного возраста. В 2018 г. это гнездо было не жилым, новое найдено в 1,3 км от старого.

Прилет беркута в долину Средней Лены и в прилегающих к ней территориях обычно отмечается в период второй декады марта по первую декаду апреля. Самые ранние прилеты орла отмечены вблизи с. Нижний Бестях 29 февраля 2016 г. (сообщение А.С. Владимирова) и в долине Эркээни 28 февраля 2020 г. (сообщение



Рис. 3. Беркут. Хангаласский улус. 22 июня 2018 г. Фото Р.А. Кириллина.

Fig. 3. Golden Eagle. Khangalassky Ulus. June 22, 2018. Photo by Ruslan A. Kirillin.



Рис. 4. Гнездо орлана на берегу оз. Белое. 13.07.2013. Фото Т.П. Никонова.

Fig. 4. The Eagle's nest on the Beloye Lake shore. July 13, 2013. Photo by T. P. Nikonov.

П.С.Федотова). Кладка беркута происходит в апреле. Ранние насиживающие птицы отмечены 3 апреля 2019 г. (р. Улах-Ан) и 4 апреля 2020 г. (Намский район). Птенцы выводятся в мае, отлет – в сентябре–октябре.

Орлан-белохвост *Haliaeetus albicilla* (Linnaeus, 1758) до середины 50-х гг. прошлого столетия в Центральной Якутии был обычным гнездящимся видом [8]. Вблизи г. Якутск возле с. Тулагинцы орлан встречался вплоть до 1970-х гг. [38]. К 1975–1976 гг. стал редким и перестал регулярно гнездиться в долине Лены. Последнее гнездование на водоразделе Лено-Амгинского междуречья отмечалось в 1976 г. и в пойме недалеко от с. Куокуй – 1982 г. [28].

Селится по опушкам леса, по берегам крупных озер и долин крупных рек. Гнезда размещались на крупной высохшей лиственнице и промежуточной площадке триангуляционной вышки на высоте 25–30 м.

В долине Лены весной орлан-белохвост появляется 12–21 апреля [28]. По фотографиям, сделанным Т.П. Никоновым 13 июля 2013 г., видно, что на берегу оз. Белое, которое находится на севере Намского улуса, орланы успешно вывели

2 птенцов (рис. 4). По его сообщению, птицы гнездятся здесь еще с 1970-х годов. Осенью из мест гнездовый отлетает в сентябре–начале октября. Даты наиболее поздних встреч приходятся на вторую декаду октября.

Хохлатый осоед *Pernis ptilorhynchus* (Temminck, 1821). В Якутии ранее встречался только в юго-западной части – в районе Олекмо-Чарского нагорья. В последние годы в Средней Лене осоед отмечен в нескольких местах. 11 августа 2005 г. в местности Ой-Муран палеонтолог П. Пархаев сфотографировал одну особь. В августе 2015 г. вблизи с. Исит мы наблюдали одиночную птицу, 30 июля 2016 г. три взрослые особи держались вместе на устье р. Мухатта, летом 2016 и 2017 гг. две птицы отмечены в окрестностях с. Кытыл-Дьюра. В июле и в августе 2017 г. одна особь держалась вблизи с. Красный Ручей.

Семейство соколиные *Falconidae* (Leach, 1820)

Креchet *Falco rusticolus* (Linnaeus, 1758). Б.Н. Сидоров [35] отнес его к категории редко зимующих птиц центральной Якутии. Нами отмечен 15 сентября 2012 г. возле г. Якутск, и 17 сентября того же года в окрестностях с. Кильдямы был встречен, скорее всего, самец этого вида. 17 мар-

та 2018 г. в с. Кылайы (Усть-Алданский улус) наблюдали белого сокола с редкими темными пестринами на спине.

Сапсан *Falco peregrinus* (Tunstall, 1771). В Средней Лене до середины XX в. характеризовался как обычный вид, а на скалистых берегах Лены – многочисленный [5–7, 10]. В 80-х гг. прошлого столетия в долине среднего течения Лены этот сокол сохранился лишь на береговых скалах, расположенных в устьях ее притоков [9], и до 90-х годов этот хищник здесь характеризовался как редкий вид [20, 28]. В 2013–2019 гг. по правому берегу Лены наибольшие концентрации гнездовых территорий отмечены на участках долины от устья с. Кытыл-Джура до с. Синск (6 гнездовых территорий через каждые 9 км), от уч. Кетеме до Еланки (4 через каждые 3 км) и ниже по течению в 8 км от с. Улахан-Ан (3 через 1,5 км). По левому берегу гнездовые участки были удалены на 10 км и более, лишь на скалах в устье р. Лабыя 3 гнездовые территории были расположены на расстоянии 5 и 2 км. В целом, судя по нашим исследованиям, на скальных берегах р. Лена на участке от с. Кытыл-Джура до с. Булгуньтах встречается 1,2 гнездовые территории на 10 км береговой линии. Из 14 обнаруженных гнезд сокола 4 располагались в пещерках, 5 – в нишах с карнизами среди отвесных скал, 2 – в трещинах скал и 3 – на земле под скалой. В целом, результаты исследований последних лет показали, что численность сапсана в Средней Лене начала постепенно восстанавливаться.

По данным З.З. Борисова [40], в окрестностях с. Хомустах (в 60 км севернее города) на 10-километровом участке коренного берега реки в 1965 и 1966 гг. гнездились 3 пары сапсана, в 1971 г. – 1 пара, а в 1978, 1979 гг. гнездящиеся соколы не наблюдались. Нами в летне-осенние сезоны 2015–2017 гг. был тщательно обследован указанный участок и на гнездовые сапсан не был обнаружен, хотя 16 августа 2016 г. был отмечен одинокий сокол. В конце августа 2014 г. двух сапсанов наблюдали у «Дома рыбака», расположенном на Кангаласском мысу.

Прилет сапсана наблюдается в третьей декаде апреля–первой декаде мая. Самый ранний прилет сапсана отмечен в местности Туойдах (Олекминский район) 25 марта 2006 г. (сообщение А.А. Кривошапкина). Начало кладки отмечается во второй декаде мая, начало вылупления – в первой декаде июля, отлет – в сентябре. Наиболее поздняя встреча — 30 сентября.

Чеглок *Falco subbuteo* (Linnaeus, 1758). В Средней Лене малочисленный вид. Встречается в сплошных лесных массивах, перемежающихся с открытыми пространствами (вблизи озер, мелких травяных речек, на марях, зарастающих вырубках и гарях).

В Лено-Амгинском междуречье в долинах рек Суола и Татта в облесенных местообитаниях численность чеглока в июне–июле 1986–1988 гг. составляла 0,4 особей/км² [28]. На правобережье Лены в окрестностях с. Красный ручей, по данным учетов в июле 2018 г., плотность населения вида равнялась 0,5 особей/км². На левобережье р. Лена в долине Эркээни вблизи с. Октемцы, по данным учетов в июле 2011 г., плотность населения этого сокола составляла 0,3 особей/км². В 25 км южнее от этого села в лесных массивах вблизи с. Немюгюнцы в начале октября 2011 г. численность чеглока равнялась 0,6 особей/км². В районе Якутска в 1986–1988 гг. в июне–июле плотность населения хищника составляла 0,4 особей/км² [28]. В 45 км севернее города в окрестностях с. Едей в июле 2013 г. численность чеглока равнялась 0,3 особей/км².

Прилет чеглока наблюдается в третьей декаде апреля. Часто использует гнезда вороны, иногда коршуна. Начало кладки отмечено в конце мая, начало вылупления – в третьей декаде июня, отлет – в августе–сентябре.

Дербник *Falco columbarius* (Linnaeus, 1758). Регулярно встречается на пролете, изредка гнездится в долине Лены [9]. В Лено-Амгинском междуречье несколько встреч сокола зарегистрировано и на водоразделе, однако фактов по его гнездованию нет [28].

Пролет дербника наблюдается во второй декаде апреля–первой декаде мая. Мигрирующие птицы отмечаются до середины мая. В 1975 г. концентрация мигрирующих пар дербника отмечена на скалистых обнажениях Табагинского мыса (30 км выше Якутска по Лене), где на 8-километровом участке берега было учтено 7 пар [28].

В Лено-Амгинском междуречье на осеннем пролете крайне редок. Отмечались лишь единичные встречи в августе–сентябре.

Обыкновенная пустельга *Falco tinnunculus* (Linnaeus, 1758) обычный гнездящийся вид и более многочислен по долине Лены [9].

В таежной части Лено-Амгинского междуречья распространение пустельги тесно связано с открытыми луговыми угодьями и селится она, как правило, по опушкам лесных массивов [28].

Таблица 2
Плотность населения пустельги (особей/км²)
в долинах Туймаада и Эркээни (июнь–июль)

Table 2
Kestrels population density (individuals/km²)
in the Tuimaada and Erkeeni Valleys (June–July)

Название долины р. Лен	2008 г.	2011 г.	2014 г.	2017 г.	2019 г.
Туймаада	0,1	–	0,2	–	0,1
Эркээни	0,4	0,5	0,7	0,5	0,3

Кормовые биотопы представляют собой открытые пространства в относительной близости от гнездового участка. В лесной части в долине Амги гнездование пустельги наблюдалось по долине реки и птицы наиболее часто встречались на участке устье р. Булуну–устье р. Улахан-Хатын, где отмечается сочетание протяженных скальных образований с довольно значительными площадями лугов [21]. По данным маршрутных учетов, в Лено-Амгинском междуречье в долинах рек Суола и Тагта в июле 1987, 1988 гг. плотность населения птиц составляла 0,3 особей/км [28]. На севере междуречья в окрестностях с. Кыллай во время учетных работ с 2011 по 2015 г. вид не отмечен.

В долине Лены в начале 20 в. вид характеризовался как более или менее обыкновенный [5]. В 1970–1980-х гг. на каменистых берегах между устьями рек Мухатта и Едей встречались 2,1 пары пустельги на 10 км, селами Еланка и Булгуньятах – 1,6 [9]. По данным маршрутных учетов, в июне 1985 г. на лугах в долине Лены (район Якутска) численность сокола составляла 0,3 особей/км², в 70 км выше города – 0,9 [28]. В культурных ландшафтах долины средней Лены по учетам методом учетных полос в 1970–1972 гг. численность вида равнялся 0,7 особей/км [29]. В 2008–2019 гг. в долине р. Лена Эркээни плотность населения пустельги колебалась от 0,3 до 0,7 особей/км², Туймаада – 0,1–0,2 (табл. 2).

По данным учетов во время автомобильных маршрутов в июне–июле 2017 г., в долине Туймаада встречаемость пустельги составила 0,2 особей/10 км маршрута, Эркээни – 0,6 и Энсиэли – 0,08. На постоянном маршруте вдоль берега реки от местности Батамай до с. Булгуньятах (общая протяженность 73 км) в июле–начале августа 2013–2019 гг. встречаемость вида колебалась от 0,10 до 0,78 особей/10 км маршрута (рис. 5).

В Лено-Вилуйском междуречье в 60-х годах прошлого столетия в бассейне среднего течения р. Кенкеме пустельга встречалась единично [33]. На пешем маршруте протяженностью 16 км по долине этой реки в начале мая 2001 г. встречены 3 птицы. В июне 2016 г. в лесах, расположенных в долине среднего течения р. Кенкеме, вид не был встречен, а на открытых участках (луга, залежи, озера и пр.) плотность населения пустельги была довольно высокой и составляла 0,6–1 особей/км².

Судя по литературным источникам [7, 28, 31] и по нашим наблюдениям, прилет пустельги наблюдается во второй–третьей декаде апреля. В последнее десятилетие, вероятно, весенний прилет сместился на более ранние сроки по сравнению с наблюдениями прежних лет и отмечены встречи птиц в зимний период [30]. Гнезда расположены в обрывах речных берегов (глинистых и скалистых), в нишах скал, в сооружениях (дома и т.п.), в дуплах перестойных деревьев, в старых гнездах вороны на лиственницах, соснах и на других деревьях, реже на земле. Размножение начинается в середине мая, начало кладки – в третьей декаде мая, начало вылупления – во второй декаде июня, в середине июля птенцы начинают покидать гнезда. Отлет птиц наблюдается в сентябре–октябре.

Залетные виды

Белоплечий орлан (*Haliaeetus pelagicus* Pall., 1811). Известны два случая залета на территорию Якутии молодых особей белоплечего орлана: одна во втором наряде была добыта в районе Якутска 12 июля 1895 г. [5], вторая отмечена и

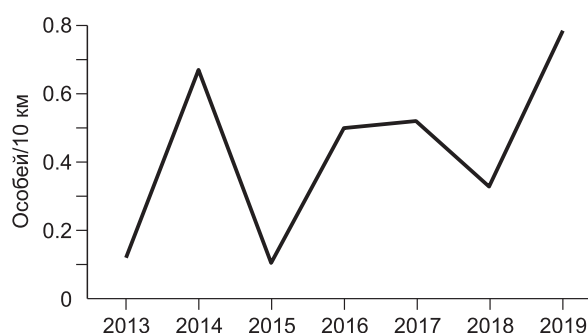


Рис. 5. Встречаемость пустельги в июле–начале августа 2013–2019 гг. (на маршруте от местности Батамай до с. Булгуньятах).

Fig. 5. Reporting on sightings of Kestrels in July–early August, 2013–2019 (on the route from Batamai Site to Bulgunnyah village).

затем найдена мертвой в ноябре 2016 г. в с. Хоринцы Олекминского улуса [41].

Черный гриф. В 2007 г. отмечен в окрестностях с. Кэптэни Усть-Алданского улуса [42].

Степной орел *Aquila nipalensis* (Hodgson, 1833) отмечен в Якутии только один раз. 26 июля 2019 г. на долине р. Лена в 15 км юго-западнее г. Якутск наблюдали молодую особь степного орла в оперении третьего года жизни [43].

Пегий лунь *Circus melanoleucos* (Pennant, 1769). В мае 2019 г. охотниками была добыта ранее им неизвестная птица, в окрестностях с. Владимировка (долина Туймаада). Первоначально охотники приняли птиц за чаек, но при более детальном визуальном наблюдении обнаружили большие отличия и решили добыть их. Удалось добыть только одну особь, впоследствии определенную как самец пегого луны. Ранее этих птиц орнитологи на территории Республики Саха (Якутия) не наблюдали.

Птица, определенная как **белоголовый сип** [42], была найдена мертвой вблизи с. Улахан-Ан Хангаласского улуса в 1990 г.

Выводы

В долине Средней Лены и прилегающих к ней территориях в последние десятилетия отмечается интенсивная трансформация природных сообществ, на которую наиболее остро реагируют хищные птицы. Наиболее уязвимы из них объекты международной охраны, занесенные в Красные страницы МСОП (сапсан, кречет, беркут, орлан-белохвост и филин), которые отличаются известной нетерпимостью к изменению и сокращению среды обитания.

В настоящее время на территории Средней Лены регулярно встречаются 16 представителей отряда Соколообразные (Falconiformes), из них достоверно гнездящимися являются 13 видов, возможны гнездования скопы, хохлатого осоеда и дербника, встречаются во время сезонных миграций зимняк и изредка, во время кочевок, – кречет. Кроме этого, известны единичные залеты белоплечего орлана, степного орла, пегого луны и двух видов грифа. Из гнездящихся птиц оседлым видом является тетеревятник, остальные – перелетно-гнездящиеся.

В конце 19–начале–середине 20 вв. на Средней Лене многие представители отряда Соколообразные были обычными видами местной орнитофауны. Заметное сокращение численности хищных птиц началось здесь в 60-е гг. прошлого

столетия. В настоящее время на исследованной территории широко распространенными и обычными, местами многочисленными являются коршун и пустельга. Малочисленными видами, которые могут быть обычными в предпочитаемых биотопах, являются тетеревятник, обыкновенный канюк, восточный болотный лунь, чеглок и перепелятник. В последнее десятилетие на скалистых берегах Лены наблюдается некоторое повышение численности сапсана. С начала 2000-х гг. идет постепенное повышение численности беркута и появление гнездовий на территориях, где долгое время орлы в гнездовой период отсутствовали. В последние годы в Средней Лене отмечено постоянное присутствие осоеда. На исследованной территории с 80-х гг. прошлого столетия полевого луны можно характеризовать как малочисленный вид. Стал редким и перестал регулярно гнездиться в долине Лены орлан-белохвост. В настоящее время присутствие скопы в долине Лены и на Лено-Вилуйском междуречье не отмечено, возможно гнездование в Лено-Амгинском междуречье. На пролете обычны зимняк и дербник, редко в зимний период встречается кречет.

Основная масса Соколообразных прилетает в конце апреля и в начале мая, к гнездованию приступают с середины мая до начала июня, а отлет происходит в течение сентября. Наиболее поздние встречи приходятся на начало октября.

Литература

1. Мостахов С.Е. Река Лена. Якутск: Кн. изд-во, 1972. 126 с.
2. Ефимова А.П. Леса долины Средней Лены (Центральная Якутия). Новосибирск, 2011. 160 с.
3. Витвицкий Г.Н. Климат // Якутия. М., 1965. С. 115–138.
4. Маак Р.К. Вилуйский округ Якутской области. СПб., 1886. Ч. 2. 192 с.
5. Иванов А.И. Птицы Якутского округа // Матер. комиссии по изучению производительных сил Якутской социалистической республики. Л., 1929. 205 с.
6. Егоров О.В. Материалы по экологии якутского сапсана // Зоологический журн. 1959. Т. 38, вып. 1. С. 112–126.
7. Воробьев К.А. Птицы Якутии. М., 1963. 336 с.
8. Соломонов Н.Г., Борисов З.З., Ларионов Г.П. Влияние человеческой деятельности на фауну наземных позвоночных долины средней Лены // Охрана природы Центральной Якутии. Сб. науч. труд. Якутск, 1985. С. 66–77.
9. Борисов З.З. Птицы долины Средней Лены. Новосибирск: Наука, 1987. 120 с.

10. Ларионов П.Д. Материалы по питанию и размножению восточно-сибирского перепелятника (*Ascipiter nisus nisosimilis* Tiskell) и якутского сокола (*Falco peregrinus Kleinschmidt* Dem.) // Учен. зап. Якутск. гос. ун-та. 1957. Вып. 1. С. 120–132.
11. Исаев А.П., Соломонов Н.Г., Бочкарев В.В., Ноговицын П.Р., Федотов П.С., Шемякин Е.В., Габышев В.Ю. Современное состояние среднеленской популяции беркута // Хищные птицы Северной Евразии: проблемы и адаптации в современных условиях. Мат. VII Международной конференции РГСС. Ростов-на-Дону, 2016. С. 256–259.
12. Исаев А.П., Соломонов Н.Г., Бочкарев В.В., Кириллин Р.А. Сапсан *Falco Peregrinus* в долине среднего течения реки Лены // Русский орнитологический журнал. 2017. Т. 26, № 1472. С. 2965–2967.
13. Исаев А.П., Кириллин Р., Федотов П., Соломонов Н., Бочкарев В., Ноговицын П., Шемякин Е., Габышев В. Гнездование беркута на Средней Лене, Якутия, Россия // Пернатые хищники и их охрана. 2019. № 38. С. 137–146.
14. Бочкарев В.В., Кириллин Р.А., Васильева В.К., Шемякин Е.В., Исаев А.П. К экологии болотного луны (*Circus aeruginosus*) в окрестностях города Якутска // Луны Палеарктики. Систематика, распространение и особенности экологии в Северной Евразии. Материалы VII Международной конференции РГСС, г. Сочи, 19–24 сентября 2016 г. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2016. С. 144–147.
15. Галушин В.И. Хищные птицы леса. М.: Лесная промышленность, 1980. 158 с.
16. Брауде М.И. Некоторые формы учета редких видов хищных птиц на больших территориях (на примере севера Западной Сибири) // Методы изучения и охраны хищных птиц (Методические рекомендации). М., 1989. С. 21–22.
17. Равкин Ю.С., Ливанов С.Г. Факторная зоогеография: принципы, методы и теоретические представления. Новосибирск: Наука, 2008. 205 с.
18. Галушин В.М. Численность и территориальное распределение хищных птиц Европейского центра СССР // Тр. Окского гос. заповедника. М., 1971. Вып. VIII. С. 5–133.
19. Карякин И.В. Пернатые хищники (методические рекомендации по изучению соколообразных и совообразных). Нижний Новгород: Поволжье, 2004. 351 с.
20. Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 2. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных (насекомые, рыбы, земноводные, пресмыкающиеся, птицы, млекопитающие). Якутск, 2003. 208 с.
21. Дегтярев В.Г. Птицы // Экология средней Амги. Якутск: Институт прикладной экологии Севера СО РАН, 1993. С. 58–62.
22. Лабутин Ю.В., Егоров Н.Н., Исаев А.П. Распространение скопы (*Pandion haliaetus*) в Якутии // Зоологический журнал. 2009. Т. 88, № 6. С. 703–707.
23. Галушин В.М. Крупная синантропная популяция черных коршунов в Дели (Индия) // Орнитология в СССР. Кн. вторая (Тезисы пятой Всесоюзной орнитологической конференции). Ашхабад, 1969. С. 161–164.
24. Карякин И.В. Пернатые хищники Уральского региона. Соколообразные (*Falconiformes*), Сovoобразные (*Strigiformes*). Пермь: Изд-во Центра полевых исследований Союза охраны животных Урала, 1998. 475 с.
25. Богомолов Д.В. Черный коршун в антропогенно-трансформированном ландшафте Республики Алтай // Изучение и охрана хищных птиц Северной Евразии. Матер. 5-й международной конференции по хищным птицам Северной Евразии. Иваново, 2008. С. 191–192.
26. Бахтин Р.Ф. Особенности экологии черного коршуна (*Milvus migrans* Bodd.) в условиях антропогенных ландшафтов: Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. биол. наук. Барнаул, 2012. 18 с.
27. Лабутин Ю.В., Соломонов Н.Г., Ларионов Г.П., Пиенников А.Е. К экологии некоторых хищных птиц Центральной Якутии // Учен. зап. Якут. гос. ун-та. Вып. 15. Якутск: Кн. изд-во, 1965. С. 65–79.
28. Ларионов Г.П., Дегтярев В.Г., Ларионов А.Г. Птицы Лено-Амгинского междуречья. Новосибирск, 1991. 189 с.
29. Соловьев Ф.П. Материалы по распространению и численности птиц культурных ландшафтов долины Средней Лены // Биологические проблемы Севера. VI симпозиум. Вып. 1. Териология, орнитология, физиология животных (тезисы докладов). Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1974. С. 130–146.
30. Ларионов А.Г., Егоров Н.Н. Летнее население птиц на Лено-Вилуйском междуречье в районе города Якутска // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 4 (52). С. 111–116.
31. Воробьева К.Е. Материалы для характеристики пролета птиц в окрестностях г. Якутск (по наблюдениям 1927–1928 гг.) // Ежегодник Зоол. музея. 1931. Т. 32. С. 157–210.
32. Борисов З.З., Исаев А.П., Борисов Б.З. Анализ качественного и количественного состава орнитофауны ПП «Ленские столбы» // Природный парк «Ленские столбы»: прошлое, настоящее и будущее. Якутск, 2007. С. 199–215.
33. Лабутин Ю.В. Хищные птицы долины среднего течения р. Кенкеме // Зоогеографические и экологические исследования животного мира. Якутск, 1992. С. 43–48.
34. Ларионов П.Д. Материалы о зимней орнитофауне окрестностей Якутска // Зоологический журнал. 1959. Т. 38, вып. 2. С. 253–260.

35. Сидоров Б.И. Зимующие птицы Якутии. Якутск: Литограф, 1996. 96 с.
36. Ларионов Г.П., Гермогенов Н.И., Сидоров Б.И. Фауна и экология зимующих птиц Лено-Вилуйского междуречья // Фауна и экология наземных позвоночных таежной Якутии. Якутск: Изд. Якутского государственного университета, 1980. С. 85–141.
37. Ларионов Г.П. О сроках размножения птиц центральной якутской тайги // Миграции и экология птиц Сибири. Новосибирск: Наука, 1982. С.66–73.
38. Соломонов Н.Г., Ларионов Г.П. Фауна наземных позвоночных долины средней Лены и ее изменения под влиянием деятельности человека // Охрана природы Якутии. Мат-лы V Респ. совещ. по охране природы. – Иркутск, 1976. С. 183–190.
39. Седалищев В.Т., Винокуров В.Н. К экологии беркута в Центральной Якутии // Тезисы Всероссийской конф. молодых ученых «Экология гнездования птиц и методы их изучения». Самарканд, 1979. С. 195.
40. Борисов З.З. Некоторые аспекты биологии хищных птиц в окультуренных ландшафтах долины р. Лены // Водно-болотные виды птиц долины Средней Лены. Якутск, 1978. С. 117–124.
41. Кириллин Р.А. Залет белоплечего орлана *Haliaeetus pelagicus* (Pallas, 1811) в Якутии // Байкальский зоологический журнал. 2018. № 1 (22). С.102–103.
42. Находкин Н.А., Гермогенов Н.И., Сидоров Б.И. Птицы Якутии: полевой справочник. Якутск: Октаэдр, 2008. 384 с.
43. Кириллин Р.А. Первый случай залёта степного орла *Aquila nipalensis* в Якутию // Русский орнитологический журнал. 2019. Т. 28, № 1860. С. 5773–5775.

Поступила в редакцию 07.03.2020

Принята к публикации 22.05.2020

Об авторах

ИСАЕВ Аркадий Петрович, доктор биологических наук, и.о. зав. лаб. экосистемных исследований холодных регионов, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 41,

Researcher ID: Q-5688-2019, Isaev_Ark@rambler.ru;

БОЧКАРЕВ Владимир Владимирович, специалист отдела природы ГБУ РС(Я) «Якутский государственный объединенный музей истории и культуры народов Севера им. Ем. Ярославского», 677000, Якутск, пр. Ленина, 5/2,

vovabochkarev89@mail.ru;

СОЛОМОНОВ Никита Гаврилович, доктор биологических наук, профессор, г.н.с. лаб. экосистемных исследований холодных регионов, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, ул. Белинского, 58, Researcher ID: M-2634-2018;

КИРИЛЛИН Руслан Анатольевич, инженер-исследователь лаб. экосистемных исследований холодных регионов, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 41,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6369-085X>, ruslan.kirillin@gmail.com;

ШЕМЯКИН Евгений Владимирович, кандидат биологических наук, н.с. лаб. экосистемных исследований холодных регионов, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 41,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3840-8645>, shemyakine@mail.ru;

ГАБЫШЕВ Вячеслав Юрьевич, лаборант лаб. экосистемных исследований холодных регионов, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41,

gabyshev9403@gmail.com

Информация для цитирования

Исаев А.П., Бочкарев В.В., Соломонов Н.Г., Кириллин Р.А., Шемякин Е.В., Габышев В.Ю. Общий обзор фауны отряда Соколообразные (*Falconiformes*) долины Средней Лены и прилегающих к ней территорий // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 108–124. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-9>

General overview of the Falconiformes fauna of the Middle Lena valley and adjacent territories

A.P. Isaev, V.V. Bochkarev, N.G. Solomonov, R.A. Kirillin, E.V. Shemyakin, V.Yu. Gabyshev

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk, Russia
isaev_ark@rambler.ru*

Abstract. The article presents the results of original observations during the years 2003 to 2019, analysis of literature data, archival and questionnaire information on the representatives of the Falconiformes order inhabiting or seen in the Middle Lena valley and adjacent territories. At present, 16 species are regularly found in the study area. Among them, 13 species are nesting here, 3 are possible nesters, and 2 species occur during seasonal migrations and shifts. The paper gives a relative estimate of the abundance in a long-term retrospective of Peregrine falcon and the current states for populations of other daytime birds of prey in the region. It is noted that until the middle of the 20th century, many representatives of the order were common species of the local avifauna at the Middle Lena valley, and a noticeable reduction of their number began in the 60s of the past century. At present, from all the daytime birds of prey in the study area, only Kites and Kestrels are widespread, common and locally numerous, and the rest are not numerous or rare. In the recent decades, most of the Middle Lena territory has undergone an intensive transformation of natural communities, and the species listed in the Red Book react most acutely to this process, like Osprey, Golden eagle and White-tailed eagle known for their intolerance to changes and reduction in the areas of their habitats.

Key words: birds of prey, Falconiformes order, number change, the valley of the Middle Lena, Central Yakutia.

Acknowledgements. The studies were carried out as part of project VI.51.1.11 “The structure and dynamics of animal populations and communities in the cold region of the North-East of Russia in modern conditions of global climate change and anthropogenic transformation of northern ecosystems: factors, mechanisms, adaptations, conservation”. In addition to his own and literary data, the work involved unpublished data, kindly provided by Dr. Germogenov N.I. and Ph.D. Borisov Z.Z., used the materials of the survey information of local residents. Invaluable help in field research was provided by teachers of the Khangalassky district Prokopyy Nogovitsyn (Oyskaya secondary school) and Fedotov P.S. (Oktenskaya secondary school), residents of the Namskiy district, Nikonov T.P. (local historian) and Sofronov E.F. (teacher of the Bethune secondary school), etc.

References

1. Mostahov S.E. Reka Lena. Yakutsk: Kniz. izd-vo, 1972. 126 p.
2. Efimova A.P. Lesa doliny Srednej Leny (Centralnaya Yakutiya). Novosibirsk, 2011. 160 p.
3. Vitvickij G.N. Klimat // Yakutiya. M., 1965. P. 115–138.
4. Maak R.K. Vilyujskij okrug Yakutskoj oblasti. SPb., 1886. Ch. 2. 192 p.
5. Ivanov A.I. Pticy Yakutskogo okruga // Materialy komissii po izucheniyu proizvoditelnyh sil Yakutskoj sotsialisticheskoy respubliky. L., 1929. 205 p.
6. Egorov O.V. Materialy po ekologii yakutskogo sapsana // Zoologicheskij zhurn. 1959. Vol. 38. Iss. 1. P. 112–126.
7. Vorobev K.A. Pticy Yakutii. M., 1963. 336 p.
8. Solomonov N.G., Borisov Z.Z., Larionov G.P. Vliyaniye chelovecheskoj deyatel'nosti na faunu nazemnyh pozvonochnyh doliny srednej Leny // Ohrana prirody Centralnoj Yakutii. Sb. nauch. trud. Yakutsk, 1985. P. 66–77.
9. Borisov Z.Z. Pticy doliny Srednej Leny. Novosibirsk: Nauka, 1987. 120 p.
10. Larionov P.D. Materialy po pitaniyu i razmnozheniyu vostochno-sibirskogo perepelyatnika (Accipiter nisus nisosimilis Tiskell) i yakutskogo sokola (Falco peregrinus Kleinschmidt Dem.) // Uchen. zapiski. Yakutsk. gos. un-ta. 1957. Iss. 1. P. 120–132.
11. Isaev A.P., Solomonov N.G., Bochkarev V.V., Nogovitsyn P.R., Fedotov P.S., Shemyakin E.V., Gabyshev V.Yu. Sovremennoe sostoyaniye srednelenskoy populyatsii berkuta – Hishhnye pticy Severnoj Evrazii: problemy i adaptatsii v sovremennyh usloviyah // Materialy

VII Mezhdunarodnoj konferencii RGSS. Rostov-na-Donu, 2016. P. 256–259.

12. Isaev A.P., Solomonov N.G., Bochkaryov V.V., Kirillin R.A. Sapsan Falco Peregrinus v doline srednego techeniya reki Leny // Russkij ornitologicheskij zhurnal. 2017. Vol. 26, No. 1472. P. 2965–2967.

13. Isaev A.P., Kirillin R., Fedotov P., Solomonov N., Bochkaryov V., Nogovicyn P., Shemyakin E., Gabyshev V. Gnezдование berkuta na Srednej Lene, Yakutiya, Rossiya // Pernatye hishhniki i ih ohrana. 2019. No. 38. P. 137–146.

14. Bochkarev V.V., Kirillin R.A., Vasileva V.K., Shemyakin E.V., Isaev A.P. K ekologii bolotnogo lunya (Circus aeruginosus) v okrestnostyah goroda Yakutska // Luni Palearktiki. Sistematika, rasprostranenie i osobennosti e'kologii v Severnoj Evrazii. Mater. VII Mezhdunarodnoj konferencii RGSS, g. Sochi, 19–24 sentyabrya 2016 g. Rostov-na-Donu: Izd-vo Yuzhnogo federal'nogo universiteta, 2016. P. 144–147.

15. Galushin V.I. Hishhnye pticy lesa. M.: Lesnaya promyshlennost, 1980. 158 p.

16. Braude M.I. Nekotorye formy ucheta redkih vidov hishhnyh ptic na bolshih territoriyah (na primere severa Zapadnoj Sibiri) // Metody izucheniya i ohrany hishhnyh ptic (Metodicheskie rekomendacii). M., 1989. P. 21–22.

17. Ravkin Yu.S., Livanov S.G. Faktornaya zoogeografiya: principy, metody i teoreticheskie predstavleniya. Novosibirsk: Nauka, 2008. 205 p.

18. Galushin V.M. Chislennost i territorialnoe raspredelenie hishhnyh ptic Evropejskogo centra SSSR // Tr. Okskogo gos. zapovednika. M., 1971. Iss. VIII. P. 5–133.

19. Karyakin I.V. Pernatye hishhniki (metodicheskie rekomendacii po izucheniyu sokoloobraznyh i sovoobraznyh). Nizhnij Novgorod: Povolzhe, 2004. 351 p.

20. Krasnaya kniga Respubliki Saxa (Yakutiya). Vol 2. Redkie i nahodyashhiesya pod ugrozoy ischeznoventiya vidy zhivotnyh (nasekomye, ryby, zemnovodnye, presmykayushhiesya, pticy, mlekopitayushhie). Yakutsk, 2003. 208 p.

21. Degtyarev V.G. Pticy // Ekologiya srednej Amgi. Yakutsk: Institut prikladnoj ekologii Severa SO RAN, 1993. P. 58–62.

22. Labutin Yu.V., Egorov N.N., Isaev A.P. Rasprostranenie skopy (Pandion haliaetus) v Yakutii // Zoologicheskij zhurnal. 2009. Vol. 88, No. 6. P. 703–707.

23. Galushin V.M. Krupnaya sinantropnaya populyaciya chernyh korshunov v Deli (Indiya) // Ornitologiya v SSSR. Kniga vtoraya (Tezisy pyatoy Vsesoyuznoj ornitologicheskoy konferencii). Ashchabad, 1969. P. 161164.

24. Karyakin I.V. Pernatye hishhniki Ural'skogo regiona. Sokoloobraznye (Falconiformes), Sovoobraznye (Strigiformes). Perm: Izd-vo Centra polevyh issledovanij Soyuza ohrany zhivotnyh Urala, 1998. 475 p.

25. Bogomolov D.V. Chernyj korshun v antropogennno-transformirovannom landshafte Respubliki Altaj // Izuchenie i ohrana hishhnyh ptic Severnoj Evrazii // Materialy` 5-j mezhdunarodnoj konferencii po hishhny'm pticam Severnoj Evrazii. Ivanovo, 2008. P. 191–192.

26. Baxtin R.F. Osobennosti ekologii chernogo korshuna (Milvus migrans Bodd.) v usloviyah antropogennyh landshaftov. Avtoref. diss. na soisk. uch. st. kand. biol. nauk. Barnaul, 2012. 18 p.

27. Labutin Yu.V., Solomonov N.G., Larionov G.P., Pshennikov A.E. K ekologii nekotoryh hishhnyh ptic Centralnoj Yakutii // Uchen. zap. Yakut. gos. un-ta. Iss. 15. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1965. P. 65–79.

28. Larionov G.P., Degtyarev V.G., Larionov A.G. Pticy Leno-Amginskogo mezhdurechya. Novosibirsk, 1991. 189 p.

29. Solov'ev F.P. Materialy` po rasprostraneniyu i chislennosti ptic kulturnyh landshaftov doliny Srednej Leny // Biologicheskie problemy Severa. VI simpozium. Vyp. 1. Teriologiya, ornitologiya, fiziologiya zhivotnyh (tezisy dokladov). Yakutsk: Izd-vo YaF SO AN SSSR, 1974. P. 130–146.

30. Larionov A.G., Egorov N.N. Letnee naselenie ptic na Leno-Vilyujskom mezhdureche v rajone goroda Yakutska // Astrahanskij vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2019. No. 4 (52). P. 111–116.

31. Vorobeva K.E. Materialy dlya harakteristiki proleta ptic v okrestnostyah g. Yakutsk (po nablyudeniyam 1927–1928 gg.) // Ezhegodnik Zool. muzeya. 1931. Vol. 32. P.157–210.

32. Borisov Z.Z., Isaev A.P., Borisov B.Z. Analiz kachestvennogo i kolichestvennogo sostava ornitofauny` PP «Lenskie stolby» // Prirodnyj park «Lenskie stolby»: proshloe, nastoyashhee i budushhee. Yakutsk, 2007. P. 199–215.

33. Labutin Yu.V. Hishhnye pticy doliny srednego techeniya r. Kenkeme // Zoogeograficheskie i ekologicheskie issledovaniya zhivotnogo mira. Yakutsk, 1992. P. 43–48.

34. Larionov P.D. Materialy o zimnej ornitofaune okrestnostej Yakutska // Zoologicheskij zhurnal. 1959. Vol. 38, Iss. 2. P. 253–260.

35. Sidorov B.I. Zimuyushhie pticy Yakutii. Yakutsk: Litograf, 1996. 96 p.

36. Larionov G.P., Germogenov N.I., Sidorov B.I. Fauna i ekologiya zimuyushhijh ptic Leno-Vilyujskogo mezhdurech'ya // Fauna i e'kologiya nazemnyh pozvonochnyh taezhnoj Yakutii. Yakutsk: Izd. Yakutskogo gosuniversiteta, 1980. P. 85–141.

37. Larionov G.P. O srokax razmnzheniya ptic centralnoj yakutskoj tajgi // Migracii i ekologiya ptic Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1982. P. 66–73.

38. Solomonov N.G., Larionov G.P. Fauna nazemnyh pozvonochnyh doliny srednej Leny i eyo izmeneniya pod vliyaniem deyatel'nosti cheloveka // Ohrana prirody Ya-

kutii. Mat-ly' V Resp. soveshh. po ohrane prirody'. Irkutsk, 1976 P. 183–190.

39. Sedalishhev V.T., Vinokurov V.N. K ekologii ber-kuta v Centralnoj Yakutii // Tezisy' Vserossijskoj konf. molodyh uchenyh «Ekologiya gnezдовaniya ptic i metody ih izucheniya». Samarkand, 1979. 195 p.

40. Borisov Z.Z. Nekotorye aspekty biologii hishnyh ptic v okulturennyh landshaftah doliny r. Leny // Vodno-bolotnye vidy ptic doliny Srednej Leny. Yakutsk, 1978. P. 117–124.

41. Kirillin R.A. Zalet beloplechego orlana *Haliaeetus pelagicus* (Pallas, 1811) v Yakutii // Bajkalskij zoologicheskij zhurnal. 2018. No. 1 (22). P. 102–103.

42. Nahodkin N.A., Germogenov N.I., Sidorov B.I. Pticy Yakutii: polevoj spravochnik. Yakutsk: Oktaedr, 2008. 384 p.

43. Kirillin R.A. Pervyj sluchaj zalyota stepnogo orla *Aquila nipalensis* v Yakutiyu // Russkij ornitologicheskij zhurnal. 2019. Vol. 28, No. 1860. P. 5773–5775.

About the authors

ISAEV Arkady Petrovich, doctor of biological sciences, head of the Laboratory of Ecosystem Studies of Cold Regions, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS. 677980, Yakutsk, 41 Lenina, Researcher ID: Q-5688-2019. E-mail: Isaev_Ark@rambler.ru;

BOCHKAREV Vladimir Vladimirovich, specialist of the nature department of GBU RS (y), Yakutsk State United Museum of History and Culture of the North named after Em. Yaroslavsky. 677000, Yakutsk, 5/2 Lenina, vovabochkarev89@mail.ru;

SOLOMONOV Nikita Gavrilovich, doctor of biological sciences, professor, Lab. of Ecosystem Studies of Cold Regions, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 677980, Yakutsk, 41 Lenina. Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov. Yakutsk, 58 Belinsky str., Researcher ID: M-2634-2018;

KIRILLIN Ruslan Anatolyevich, research engineer, Lab. of Ecosystem Studies of Cold Regions, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, 677980, Yakutsk, 41 Lenina, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6369-085X>, ruslan.kirillin@gmail.com;

SHEMYAKIN Evgeny Vladimirovich, candidate of biological sciences, researcher, Lab. of Ecosystem Studies of Cold Regions, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 677980, Yakutsk, 41 Lenina, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3840-8645>, shemyakine@mail.ru;

GABYSHEV Vyacheslav Yuryevich, laboratory assistant, Lab. of Ecosystem Studies of Cold Regions, Institute of Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 677980, Yakutsk, 41 Lenina, gabyshev9403@gmail.com.

Citation

Isaev A.P., Bochkarev V.V., Solomonov N.G., Kirillin R.A., Shemyakin E.V., Gabyshev V.Yu. General overview of the Falconiformes fauna on valley of the Middle Lena and adjacent territories // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 108–124. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-9>

Сравнительная характеристика лесных массивов с использованием дешифрирования снимков сверхвысокого разрешения

Ю.Ф. Рожков^{1,*}, М.Ю. Кондакова²

¹ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», Олекминск, Россия

²ФГБУ «Гидрохимический институт», Ростов-на-Дону, Россия

*olekmazar-nauka@yandex.ru

Аннотация. Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование возможностей дистанционных методов. На мультиспектральных космических снимках DigitalGlobe территории государственного природного заповедника «Олекминский» выделены фрагменты площадью 0,819 км² (масштаб 1:3200) с доминированием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.). Затем были сохранены полигоны по четырем уровням детализации – 4, 16, 64, 256 с масштабами 1:1600, 1:800, 1:400, 1:200 соответственно. При дешифрировании проводилась неуправляемая классификация фрагмента полигонов методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) на 2, 4, 10 классов. По результатам классификации на 2 класса показана взаимосвязь между индексом лесистости и количеством деревьев, отмеченных на полигонах. Были построены кривые распределения значений индекса лесистости для полигонов 4 уровня детализации. Характер кривых близок к нормальному распределению. По результатам классификации на 4 и 10 классов была проведена статобработка с расчетом показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и теста Фишера (F-тест). Выделены наиболее похожие пары полигонов на разных уровнях детализации. Рассмотрены результаты изменения дисперсии генеральной совокупности и F-теста на разных уровнях детализации.

Ключевые слова: дешифрирование космических снимков, классификация Isodata, индекс лесистости, дисперсия, F-тест.

Введение

Для целей мониторинга состояния лесных экосистем наиболее эффективно использование дистанционных методов. В качестве реперов для оценки сохранности биоразнообразия лесов могут служить такие параметры, как общая лесистость, фрагментация лесного покрова, доля вторичных (мелколиственных) лесов, развитие антропогенной инфраструктуры и доля охраняемых территорий разного подчинения [1, 2]. Дистанционные методы анализа космических снимков используются при определении основных таксационно-дешифровочных показателей [3–8], трехмерном моделировании структуры и динамики таежных ландшафтов [9], почвенно-растительного покрова [10]. Снимки сверхвысокого разрешения позволяют определять такие таксационные характеристики, как сомкнутость крон, класс бонитета [11], высота яруса, средний диаметр и высота древостоя, относительная полнота, запас,

сомкнутость полога, проекции крон [12, 13], проективное покрытие [14]. В качестве инструментов дешифрирования широко распространен кластерный анализ [15–18].

Целью настоящего исследования является сравнение двух лесных массивов с использованием инструментов дешифрирования космических снимков сверхвысокого разрешения.

Материалы и методы

При осуществлении непрерывного мониторинга за состоянием бореальных лесов использовалось дешифрирование RGB-покрытия DigitalGlobe сверхвысокого разрешения (разрешение 0,6 м/пикс.), полученного в общедоступных сервисах GoogleEarth, SasPlanet. Исследования проводились на территории Олекминского заповедника Юго-Западной Якутии. Для сравнения были выбраны два полигона площадью 0,819 км² (масштаб 1:3200) с доминированием лиственницы

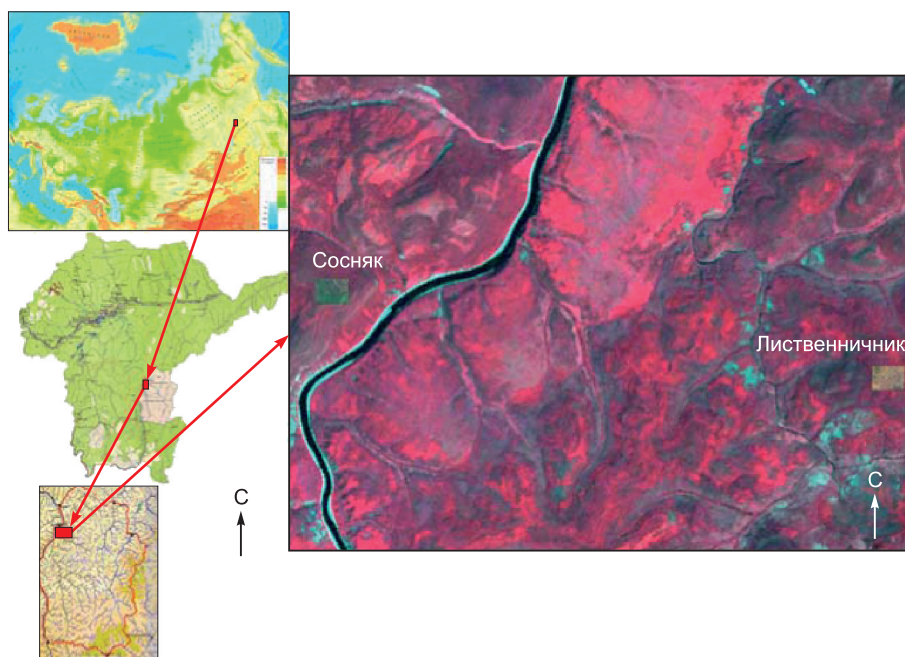


Рис. 1. Район исследования.

Fig. 1. Study area.

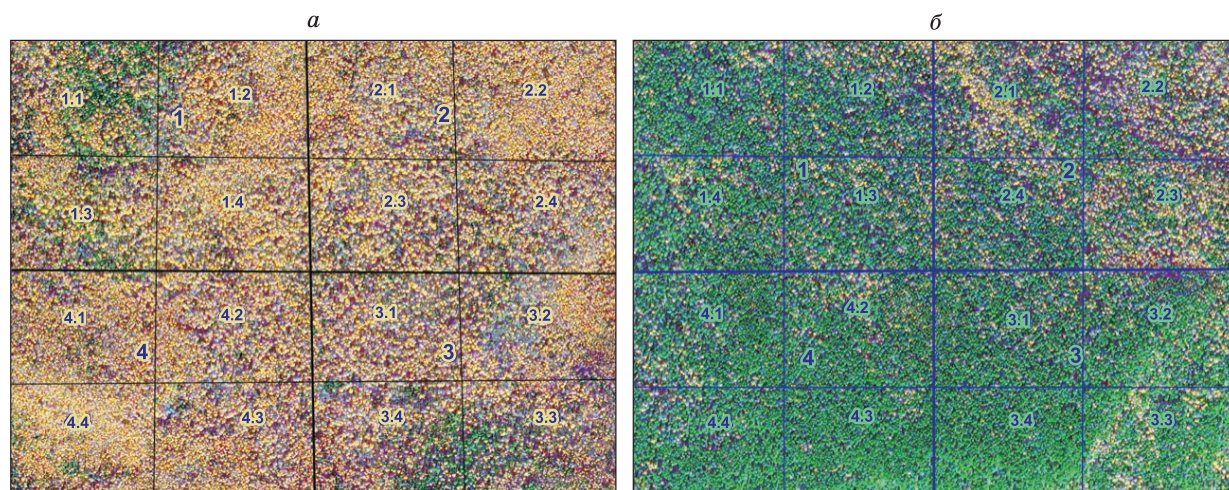


Рис. 2. Разбивка снимка DigitalGlobe масштаба 1:3200 на полигоны (4, 16 полигонов).

а – лесной массив с доминированием лиственницы Гмелина; б – лесной массив с доминированием сосны обыкновенной.

Fig. 2. Breakdown of a DigitalGlobe image at a scale of 1: 3200 into polygons (4, 16 polygons).

а – forest area with dominance of larch Gmelin; б – forest area with dominance of Scots pine.

Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (рис. 1). Каждый из выбранных полигонов был разбит на четыре полигона масштаба 1:1600. Далее были получены 16 полигонов с масштабом 1:800. Способ получения полигонов разных масштабов описан ранее [19–21] (рис. 2). На третьем уровне детализации продолжалось разбиение на те-

трады. Получилось 64 полигона масштаба 1:400 (рис. 3). На четвертом уровне детализации получилось 256 полигонов масштаба 1:200 и площадью 3199 м² (прямоугольник размером 45×70 м) (рис. 4). Деление на 8 секторов каждого из полигонов в программе Adobe Photoshop применялось для более точного подсчета деревьев по количеству крон.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ

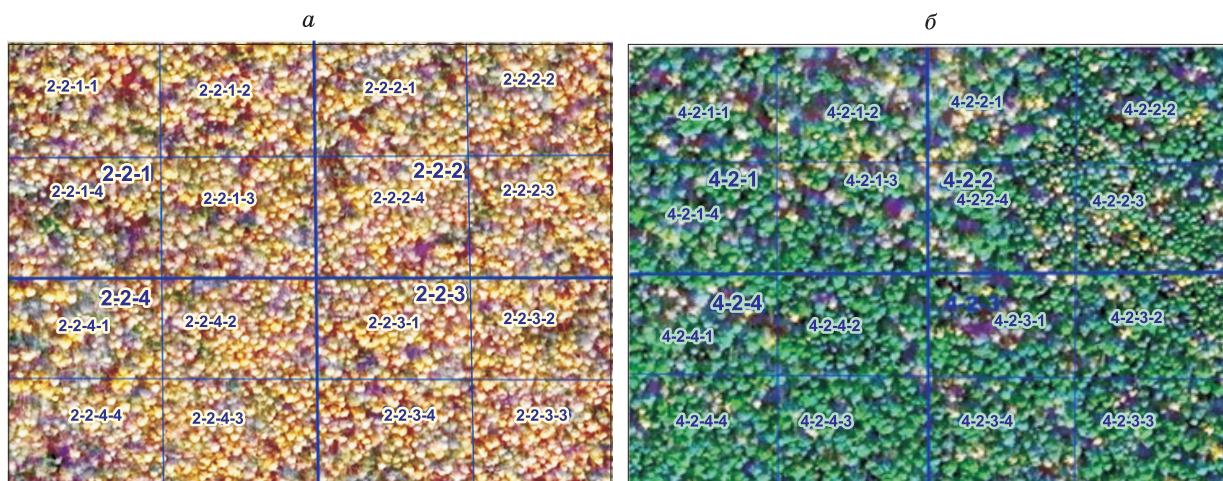


Рис. 3. Разбивка фрагмента снимка (масштаб 1:800) на полигоны (4 и 16 полигонов).
а – фрагмент 2 = 2 с доминированием лиственницы; *б* – фрагмент 4 = 2 с доминированием сосны обыкновенной.

Fig. 3. Breakdown of a fragment of the image (scale 1: 800) into polygons (4 and 16 polygons).
a – fragment 2 = 2 with the dominance of larch; *б* – fragment 4 = 2 with the dominance of Scots pine.

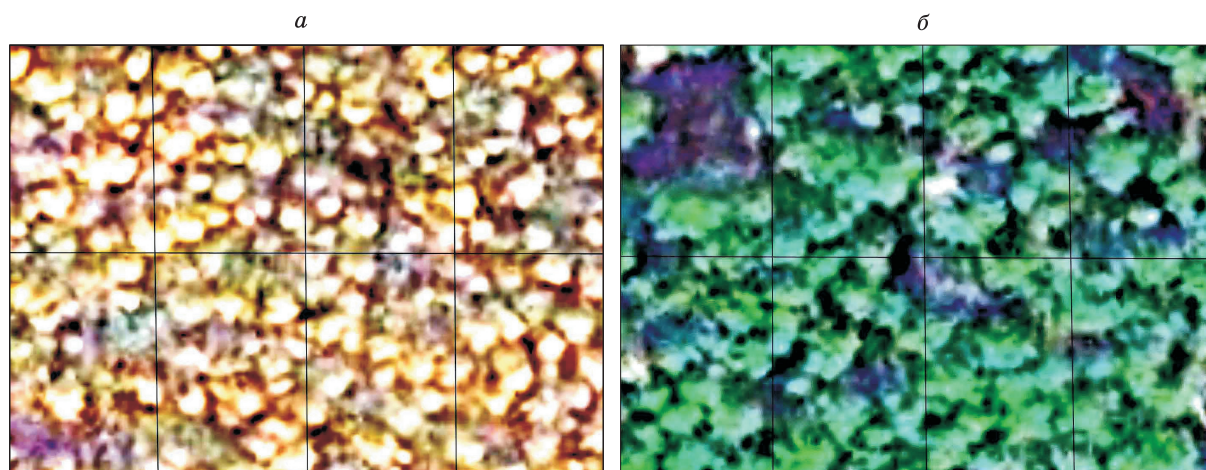


Рис. 4. Полигоны масштаба 1:200 четвертого уровня детализации.
а – полигон 4 = 4 – 1 – 2 с доминированием лиственницы Гмелина; *б* – полигон 4 = 4 – 4 – 3 с доминированием сосны обыкновенной

Fig. 4. Polygons of scale 1: 200 of the fourth level of detail.
a – Polygon 4 = 4 – 1 – 2 with the dominance of larch Gmelin; *б* – Polygon 4 = 4 – 4 – 3 with the dominance of Scots pine.

При обработке космических снимков использовался пакет программ ENVI-4.0 (для преобразования RGB-покрытия в формат Geotif), ArcView-3.3 с модулями Image Analyst, Spatial Analyst (для дешифрирования полученных снимков). В качестве показателей, с помощью которых осуществлялся мониторинг состояния лесов, были выбраны два инструмента кластерного анализа: классификация ISODATA и тематическая разность пикселей [19, 22]. Была проведена классификация снимков на 2, 4, 10 классов. Классификация на два класса позволяет определить ин-

декс, характеризующий лесистость[2], который определяется как отношение площади, покрытой лесной растительностью, к общей площади: $D = df/S$, где D – лесистость; df – площадь, покрытая лесной растительностью, m^2 ; S – общая площадь территории, m^2 .

Классификация на 4 и 10 классов была использована при статистическом анализе. Проводилось сравнение по дисперсии генеральной совокупности, тесту Фишера на подобие массивов (F-тест). До проведения статистического анализа все результаты расчета классификации были

Таблица 1

**Результаты пересчета результатов классификации снимка DigitalGlobe
на 10 классов для разных масштабов**

Table 1

**Results of recalculation of results of classification of a DigitalGlobe image
into 10 classes for different scales**

Класс	Снимок DigitalGlobe лиственничник					Снимок DigitalGlobe сосняк				
	Масштаб									
	исходный	4	4 = 4	4 = 4 – 1	4 = 1 – 1 – 3	исходный	2	2 = 2	2 = 2 – 1	2 = 2 – 1 – 2
	1:3200	1:1600	1:800	1:400	1:200	1:3200	1:1600	1:800	1:400	1:200
1	20492	16876	30289	15848	24970	10997	12406	11143	12066	14480
2	30221	27097	29776	37941	28702	29663	25744	25807	26785	30904
3	32301	28785	21858	23871	28651	27768	27883	29967	29451	27180
4	26376	24549	31829	30782	21718	26720	21034	22270	21734	28151
5	16921	21570	19656	19770	24776	22522	24616	26356	20070	18513
6	28263	20397	13881	18916	18722	22532	21098	19735	24756	23466
7	19143	21642	14167	16751	20696	20929	29192	25453	28165	24620
8	13695	23717	21670	19551	15930	27551	29661	29790	28636	25530
9	23546	25029	23171	23444	27352	23600	21806	22726	21569	19276
10	10662	11959	15322	14746	10102	9339	8180	8373	8389	9499
Сумма пикселей	221620	221620	221620	221620	221620	221620	221620	221620	221620	221620

пересчитаны и приведены к размерности полигона масштаба 1:200. Результаты классификации на всех четырех уровнях детализации представлены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Особенности распределения полигонов лесного массива по значениям индекса лесистости. Были определены индексы лесистости на всем четырех уровнях детализации по масштабам. Особенности распределения полигонов по значениям индексов представлены в табл. 2.

Индекс лесистости соснового массива в целом равен 0,600. Первая тетрада из полигонов масштаба 1:1600 имеет разброс по значениям индекса лесистости от 0,567 до 0,645, серия из 16 полигонов масштаба 1:800 – от 0,527 до 0,663. Наконец, серия из 64 полигонов масштаба 1:400 имеет разброс индекса лесистости от 0,498 до 0,667, а из 256 полигонов масштаба 1:200 – от 0,471 до 0,740. Индекс лесистости лиственничного массива показывает похожий характер распределения. Исходный полигон имеет индекс лесистости выше среднего – 0,578. Но разброс

Таблица 2

Характеристика полигонов лесных массивов по значениям индекса лесистости

Table 2

Characteristics of forest sites for forestation index values

Масштаб	Площадь полигона, м ²	Лиственничник		Сосняк	
		Диапазон значений	Разброс значений	Диапазон значений	Разброс значений
1:3200	819000	0,578	1 полигон	0,600	1 полигон
1:1600	204750	0,562–0,600	0,038 из 4	0,567–0,645	0,078 из 4
1:800	51188	0,539–0,614	0,075 из 16	0,527–0,663	0,136 из 16
1:400	12797	0,544–0,630	0,086 из 64	0,498–0,667	0,199 из 64
1:200	3199	0,517–0,661	0,143 из 256	0,471–0,740	0,271 из 256

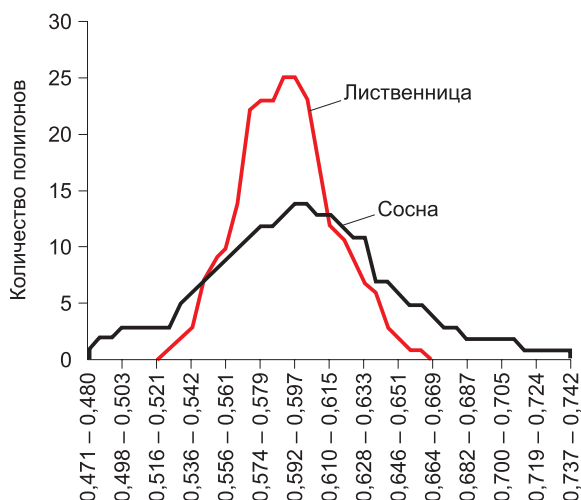


Рис. 5. Распределение полигонов масштаба 1:200 (256 шт.) по значениям индексов лесистости.

Fig. 5. Polygons distribution of scale 1: 200 (256 pcs.) from the values of the forest cover index.

значений на каждом из последующих уровней почти в два раза ниже, чем у полигонов соснового массива: 0,078 и 0,038 для первого уровня, 0,136 и 0,075 для второго, 0,199 и 0,086 для третьего уровня, соответственно.

В целом, при сравнении распределения индекса лесистости по значениям видно (рис. 5), что обе кривые близки к кривым нормального распределения, но кривая для соснового массива положе, что говорит о более равномерном распределении индекса лесистости по всем диапазонам значений.

Связь между индексом лесистости и количеством деревьев, отмеченных на полигоне.

Для установления связи между значениями индекса лесистости и количеством деревьев были выбраны в сосняке и лиственничнике по две тетрады с максимальными и минимальными значениями индекса. Затем подсчитано количество деревьев в каждом из выбранных полигонов по кронам. Результаты сравнения показаны в табл. 3. Как в сосняке, так и в лиственничнике наблюдается прямая положительная связь между индексом лесистости и количеством деревьев. Чем больше значения индекса лесистости, тем больше количество деревьев, подсчитанных в пределах полигона.

Сравнение полигонов лесного массива с помощью статистических методов. Каждый полигон тетрады с масштабом 1:200, 1:400, 1:800, 1:1600 подвергался обработке с определением дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Ранее [23] определение F-теста массивов данных позволило оценить, насколько похожи исследуемые лесные массивы. Если для однородного лесного массива все значения F-теста выше 0,90, а для некоторых полигонов этот показатель выше 0,99 (полное подобие 1,0), то для неоднородного лесного массива значения F-теста изменяются в широком диапазоне от 0,55 до 0,94. Сравнение по показателю дисперсии при классификации на 10 классов показало пятикратное ее превышение дисперсии полигонов для неоднородных над однородными массивами. В настоящей ра-

Таблица 3

Сравнение полигонов лесных массивов по индексу лесистости и количеству деревьев

Table 3

Comparison of forest polygons by forest cover index and number of trees

Показатель	Лиственничник				Сосняк			
Номер полигона	4 = 4 - 1 - 1	4 = 4 - 1 - 2	4 = 4 - 1 - 3	4 = 4 - 1 - 4	2 = 1 - 2 - 1	2 = 1 - 2 - 2	2 = 1 - 2 - 3	2 = 1 - 2 - 4
Индекс лесистости	0.633	0.589	0.548	0.585	0.708	0.713	0.707	0.701
Количество деревьев	149	146	146	147	96	122	126	112
Номер полигона	4 = 3 - 3 - 1	4 = 3 - 3 - 2	4 = 3 - 3 - 3	4 = 3 - 3 - 4	3 = 4 - 3 - 1	3 = 4 - 3 - 2	3 = 4 - 3 - 3	3 = 4 - 3 - 4
Индекс лесистости	0.533	0.514	0.486	0.471	0.537	0.488	0.481	0.489
Количество деревьев	101	103	104	107	76	71	75	86

Таблица 4

Сравнение полигонов первого уровня детализации по статистическим характеристикам

Table 4

Comparison of polygons of the first level of detail according to statistical characteristics

Номер полигона	Дисперсия		F-тест (подобие)	
	Лиственничник	Сосняк	Лиственничник	Сосняк
1	24622015	32261852	0,769	0,734
2	21414155	26285049	0,430	0,804
3	28163432	29754189	0,912	0,903
4	21790515	31757086	0,471	0,765

Таблица 5

Сравнение тетрад лиственничника с разным уровнем детализации по показателю дисперсии генеральной совокупности (полигоны 1 = 1, 2, 3, 4; 1 = 3 – 1, 2, 3, 4; 1 = 3 – 3 – 1, 2, 3, 4)

Table 5

Comparison of larch tetrads with different levels of detail in terms of the dispersion of the general aggregate (polygons 1 = 1, 2, 3, 4; 1 = 3 – 1, 2, 3, 4; 1 = 3 – 3 – 1, 2, 3, 4)

Детализация 4-го уровня							
С 1 = 3 – 3	Разность дисперсий	С 1 = 3	Разность дисперсий	С 1	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер полигона
24397816	–461918	24859733	–1050228	25909961	–2473282	28383243	1 = 3 – 3 – 1
17405720	–461918	17867638	–1050228	18917866	–2473282	21391148	1 = 3 – 3 – 2
19202048	–461918	19663966	–1050228	20714194	–2473282	23187476	1 = 3 – 3 – 3
17056239	–461918	17518157	–1050228	18568385	–2473282	21041667	1 = 3 – 3 – 4
19515456	–461918	19977373	–1050228	21027602	–2473282	23500884	Средн.
Детализация 3–го уровня							
С 1 = 3	Разность дисперсий	С 1	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер полигона		
19759423	–1050228	20809651	–2473282	23282933	1 = 3 – 1		
20779152	–1050228	21829380	–2473282	24302662	1 = 3 – 2		
19586360	–1050228	20636588	–2473282	23109870	1 = 3 – 3		
22916424	–1050228	23966652	–2473282	26439934	1 = 3 – 4		
20760340	–1050228	21810568	–2473282	24283850	Средн.		
Детализация 2–го уровня							
С 1	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер Полигона				
21483754	–2473282	23957036	1 = 1				
18697430	–2473282	21170712	1 = 2				
21098505	–2473282	23571787	1 = 3				
21347715	–2473282	23820997	1 = 4				
20656851	–2473282	23130133	Средн.				

боте проводилось определение статистических характеристик каждого полигона по уровням детализации.

Полигон масштаба 1:200 последовательно сравнивался с полигонами масштаба 1:400, 1:800, 1:1600 и исходным полигоном масштаба 1:3200.

Сравнение тетрад сосняка с разным уровнем детализации
по показателю дисперсии (полигоны 3 = 1, 2, 3, 4; 3 = 3 – 1, 2, 3, 4, 3 = 3 – 3 – 1, 2, 3, 4)

Table 6

Comparison of pine tetrads with different levels of detail
in terms of dispersion (polygons 3 = 1, 2, 3, 4; 3 = 3 – 1, 2, 3, 4, 3 = 3 – 3 – 1, 2, 3, 4

Детализация 4 –го уровня							
С 3 = 3 – 3	Разность дисперсий	С 3 = 3	Разность дисперсий	С 3	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер полигона
39150722	1462806	37687916	478038	37209878	1238208	35971670	3 = 3 – 3 – 1
37398832	1462806	35936026	478037	35457989	1238209	34219780	3 = 3 – 3 – 2
30442550	1462806	28979744	478037	28501707	1238209	27263498	3 = 3 – 3 – 3
27028476	1462806	25565670	478037	25087633	1238209	23849424	3 = 3 – 3 – 4
33505145	1462806	32042339	478037	31564302	1238209	30326093	Средн.

Детализация 3–го уровня					
С 3 = 3	Разность дисперсий	С 3	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер полигона
31138958	478037	30660921	1238217	29422704	3 = 3 – 1
30199344	478037	29721307	1238208	28483099	3 = 3 – 2
33411278	478037	32933241	1238208	31695033	3 = 3 – 3
28834443	478037	28356406	1238209	27118197	3 = 3 – 4
30896006	478037	30417969	1238211	29179758	Средн.

Детализация 2–го уровня			
С 3	Разность дисперсий	С 1:3200 Исходн.	Номер полигона
31918793	1238209	30680584	3 = 1
30347547	1238209	29109338	3 = 2
31470435	1238209	30232226	3 = 3
29443508	1238209	28205299	3 = 4
30795071	1238209	29556862	Средн.

На первом уровне детализации (табл. 4) сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:3200 показало, что по результатам классификации на 10 классов в лиственничнике и сосняке наиболее подобны исходным полигонам полигоны № 3. Для них характерны максимальные значения F-теста (0,912 и 0,903 соответственно). Наименее похожи на исходный полигон в лиственничнике – полигоны 2 и 4, а в сосняке – полигоны 1 и 4 с наименьшими значениями F-теста. По значениям дисперсии генеральной совокупности наибольшая изменчивость результатов классификации характерна для сосняков (дисперсия изменяется от 26285049 до 32261852), тогда как в лиственничниках она изменяется от 21414155 до 28163432.

По показателю дисперсии генеральной совокупности проведено сравнение тетрад разного

уровня детализации. Было показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями детализации (табл. 5, 6). Тетрада, независимо от значений дисперсии каждого из полигонов, при переходе с первого уровня детализации ко второму изменяется на величину –2473282 для полигона 1 лиственничника и на величину 1238209 для полигона 3 сосняка. При переходе со второго к третьему уровню детализации тетрада выступает также как единое целое с постоянной величиной переходного коэффициента, который составляет –1050228 для лиственничника и 478038 для сосняка. Наконец, при переходе между третьим и четвертым уровнем детализации коэффициент перехода также одинаков для всех четырех полигонов тетрады и составляет –461918 для лиственничника и 1462806 для сосняка.

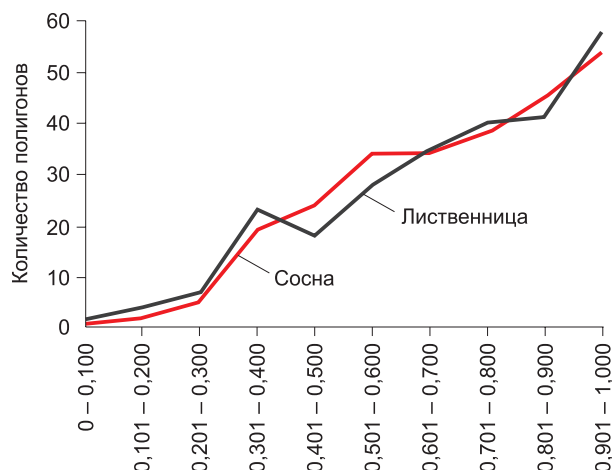


Рис. 6. Сравнение лесных массивов по кривым распределения значений F-теста.

Fig. 6. Compare forest areas of value distribution curves F-test.

Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями детализации не зависит от изменений дисперсии в пределах тетрады, а является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней детализации.

Возможным объяснением такого изменения дисперсии при переходах между уровнями детализации является фрактальная структура организации как самих растений, так и растительных сообществ [24, 25], основанная на принципе самоподобия.

Сравнение каждого из полигонов четвертого уровня детализации с исходным полигоном по F-тесту показало, что массивы с доминированием сосны и лиственницы имеют похожие кривые распределения полигонов по значениям F-теста (рис. 6). Полигоны, мало подобные исходному полигону масштаба 1:3200 (с диапазоном значений от 0,100 до 0,500), составляют только пятую часть (51 полигон для соснового массива и 55 полигонов для лиственничного). Большая часть полигонов сосредоточена в диапазоне значений F-теста от 0,800 до 0,999, т. е. с высоким уровнем подобия исходному полигону. Для соснового массива это 138 полигонов из 256, для лиственничника – 139 полигонов из 256.

Заключение

В результате использования кластерного анализа в дешифрировании снимков сверхвысокого разрешения DigitalGlobe лесных экосистем Олекминского заповедника была дана сравни-

тельная характеристика двух лесных массивов площадью 0,819 км² с доминированием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* Rupr.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на четырех уровнях детализации на 4, 16, 64, 256 полигонов. Показано, что кривые распределения полигонов по значениям индексов лесистости близки к кривым нормального распределения, но кривая для массива с сосной более пологая, что говорит о более равномерном распределении индекса лесистости по всем диапазонам значений.

Как в сосняке, так и в лиственничнике наблюдается прямая положительная связь между индексом лесистости и количеством деревьев. Чем больше значения индекса лесистости, тем больше количество деревьев, подсчитанных в пределах полигона.

Каждый полигон тетрады с масштабами 1:200, 1:400, 1:800, 1:1600 подвергся статистической обработке с определением показателей разности и подобия полигонов – дисперсии генеральной совокупности и F-теста на подобие. Определялось, насколько полигоны схожи с исходным полигоном, между собой в тетраде и с полигонами второго, третьего и четвертого уровней детализации. На первом уровне детализации сравнение первой тетрады с исходным полигоном масштаба 1:3200 показало, что по результатам классификации на 10 классов наиболее подобны исходному полигону полигоны № 3 сосняка и лиственничника. Для них характерны максимальные значения F-теста (0,912 и 0,903). Наименее похожи на исходный полигон – полигоны 2, 4 для лиственничника и 1, 4 для сосняка – с наименьшими значениями F-теста.

По показателю дисперсии генеральной совокупности было проведено сравнение тетрад разного уровня детализации. Было показано, что дисперсия тетрады каждого уровня изменяется на постоянную величину при переходе между уровнями детализации независимо от значений дисперсии в пределах тетрады. Величина переходных коэффициентов при переходе между уровнями детализации является разностью между средними значениями дисперсий каждого из уровней.

Сравнение каждого из полигонов четвертого уровня детализации с исходным полигоном по F-тесту показало, что массивы с доминированием сосны и лиственницы имеют похожие кривые

распределения полигонов по значениям F-теста. Большая часть полигонов сосредоточена в диапазоне значений F-теста от 0,800 до 0,999, т. е. с высоким уровнем подобия исходному полигону (для соснового массива это 138 полигонов, для лиственничника – 139 полигонов из 256).

Литература

1. *Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы* / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2008. 453 с.
2. *Исаев А.С., Князева С.В., Пузаченко М.Ю. и др.* Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–12.
3. *Толкач И.В.* Методы основных таксационно-дешифровочных показателей на цифровых снимках // Труды БГТУ. 2012. № 1. С. 63–65.
4. *Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А.* Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 1. С. 157–168.
5. *Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашицкий А.В.* Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 102–110.
6. *Денисова А.Ю., Кавеленова Л.М., Корчиков Е.С. и др.* Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 86–101.
7. *Фомин В.В., Залесов С.В., Магасумова А.Г.* Методики оценки густоты подроста и древостоев при зарастании сельскохозяйственных земель древесной растительностью с использованием космических снимков высокого пространственного разрешения // Аграрный вестник Урала. 2015. № 1. С. 125–129.
8. *Данилин И.М., Медведев Е.М., Абе Н.И. и др.* Высокие технологии XXI века для аэрокосмического мониторинга и таксации лесов. Задачи исследований и перспективы использования // Лесная таксация и лесоустройство. 2005. Вып. 1(34). С. 28–30.
9. *Исаев А.С., Суховольский В.Г., Хлеборос Р.Г. и др.* Моделирование лесообразовательного процесса: Феноменологический подход // Лесоведение. 2005. № 1. С. 3–11.
10. *Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М: МФТИ, 2008. 222 с.
11. *Методика* лесного стереоскопического дешифрирования аэро- и космических снимков. СПб.: Леспроект, 2015. 23 с.
12. *Ожич О.С.* Измерительное дешифрирование чистых сосновых древостоев на цифровых аэро- и космических снимках: Автореф. дисс. ... канд. сельскохозяйственных наук. Минск, 2017. 24 с.
13. *Мальшева Н.В.* Дешифрирование древесной растительности на сверхдетальных изображениях [Электронный ресурс]: методическое пособие: учебное электронное издание. М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ 2014. 40 с.
14. *Терехин Э.А.* Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 111–123.
15. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // Лесоведение. 2013. № 5. С. 76–85.
16. *Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
17. *Кочуб Е.В., Топаз А.А.* Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. Геодезия. 2012. № 16. С. 132–140.
18. *Шумаков Ф.Т., Толстохатко В.А., Малец А.Ю.* Классификация космических снимков с использованием методов кластерного анализа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. Вып. 3/4 (51). С. 58–62.
19. *Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю.* Оценка возможности использования показателя симметрии распределения пикселей в мониторинге состояния лесов при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2016. Вып. 1(1). С. 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008
20. *Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю.* Мониторинг состояния лесов с использованием кластерного анализа при дешифрировании космических снимков среднего и высокого разрешения // Наука и образование. 2016. № 3. С. 95–101.
21. *Рожков Ю.Ф.* Мониторинг состояния лесных экосистем с использованием космических снимков высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник СВФУ. Сер. Науки о Земле. 2019. № 4(16). С. 71–81. DOI:10.25587/SVFU.2020.16.49741
22. *Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю.* Оценка динамики восстановления лесов после пожаров в Олек-

минском заповеднике (Россия) по космическим снимкам Landsat// Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2019. Вып. 4(1). С. 1–10. DOI:10.24189/ncr.2019.014

23. Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Оценка структурных характеристик лесных экосистем с использованием дешифрирования космических снимков высокого и сверхвысокого разрешений // Вестник

СВФУ. 2018. № 1 (63). С. 38–51. DOI:10.25587/SVFU.2018.63.10539

24. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. М: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.

25. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena // Lecture Notes in Biomathematics. 1978. Vol. 23. P. 235–249.

Поступила в редакцию 26.03.2020

Принята к публикации 19.05.2020

Об авторах

РОЖКОВ Юрий Филиппович, кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУ «Государственный природный заповедник «Олекминский», Россия, 678100, Олекминск, ул. Филатова, 6,
<https://orcid.org/0000-0002-6830-9130>, olekmazap-nauka@yandex.ru;

КОНДАКОВА Мария Юрьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУ «Гидрохимический институт», Россия, 344090, Ростов-на Дону, проспект Стачки, 198,
vesna-dm@mail.ru.

Информация для цитирования

Рожков Ю.Ф., Кондакова М.Ю. Сравнительная характеристика лесных массивов с использованием дешифрирования снимков сверхвысокого разрешения // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-10>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-10

Comparative characterization of forests using the interpretation of ultra-high resolution images

Yu.F. Rozhkov^{1,*}, M.Yu. Kondakova²

¹State Nature Reserve «Olekminsky», Olekminsk, Russia

²Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

*olekmazap-nauka@yandex.ru

Abstract. For the purpose of monitoring the state of forest ecosystems, it is most effective to use the capabilities of remote sensing methods. Fragments of 0.819 km² (scale 1: 3200) with the dominance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Gmelin larch (*Larix gmelinii* Rupr.) were identified on DigitalGlobe multispectral satellite images of the territory of the Olekminsky State Nature Reserve. Then, the polygons were saved at four levels of detail – 4.16.64.256 with scales of 1: 1600, 1: 800, 1: 400, 1: 200. When decoding, an uncontrolled classification of the fragment and polygons was carried out using the ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) method for 2, 4, 10 classes. According to the results of classification into 2 classes, the relationship between the forest cover index and the number of trees marked on the landfills is shown. The distribution curves for forest cover index values were constructed for polygons at level 4 of detail. The nature of the curves is close to the normal distribution. According to the classification results for grades 4 and 10, statistical processing was carried out with the calculation of the indicators of the difference and similarity of the polygons – the dispersion of the general aggregate and the

Fisher test (F-test). The most similar pairs of polygons at different levels of detail are highlighted. The results of changes in the dispersion and the F-test at different levels of detail are considered.

Key words: satellite image interpretation, Isodata classification, forest cover index, dispersion, F-test.

References

1. *Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody* / red. A.S. Isaeva. M.: Nauka, 2008. 453 p.
2. *Isaev A.S., Knyazeva S.V., Puzachenko M.Yu. et al. Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov* // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2009. No. 2. P. 1–12.
3. *Tolkach I.V. Metody osnovnykh taksatsionno-deshifirovochnykh pokazatelei na tsifrovyykh snimkakh* // *Trudy BGTU*. 2012. No. 1. P. 63–65.
4. *Zharko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A. Issledovanie vozmozhnostei otsenki zapasov drevesiny v lesakh Primorskogo kraia po dannym sputnikovoi sistemy Proba-V* // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15, No. 1. P. 157–168.
5. *Khovratovich T. S., Bartalev S.A., Kashnitskii A.V. Metod detektirovaniya izmenenii lesov na osnove podpiksel'noi otsenki proektivnogo pokrytiya drevesnogo pologa po raznovremennym sputnikovym izobrazheniyam* // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16, No. 4. P. 102–110.
6. *Denisova A.Yu., Kavelenova L.M., Korchikov E.S. et al. Prostranstvennaya klassifikatsiya preobladayushchikh drevesnykh porod na territorii Samarskoi oblasti po dannym Sentinel-2 i taksatsii lesa* // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16, No. 4. P. 86–101.
7. *Fomin V.V., Zalesov S.V., Magasumova A.G. Metodiki otsenki gustoty podrosta i drevostoev pri zarastanii sel'skokhozyaystvennykh zemel' drevesnoi rastitel'nost'yu s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov vysokogo prostranstvennogo razresheniya* // *Agrarnyi vestnik Urala*. 2015. No. 1. P. 125–129.
8. *Danilin I.M., Medvedev E.M., Abe N.I. et al. Vysokie tekhnologii XXI veka dlya aerokosmicheskogo monitoringa i taksatsii lesov. Zadachi issledovaniya i perspektivy ispol'zovaniya* // *Lesnaya taksatsiya i lesoustroistvo*. 2005. Vol. 1(34). P. 28–30.
9. *Isaev A.S., Sukhovolskii V.G., Khleboros R.G. et al. Modelirovanie lesОООбразовatel'nogo protsessa: Fenomenologicheskii podkhod* // *Lesovedenie*. 2005. No. 1. P. 3–11.
10. *Kozoderov V.V., Kondranin T.V. Metody otsenki sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym opticheskikh sistem distantsionnogo aerokosmicheskogo zondirovaniya*. M.: MFTI. 2008. 222 p.
11. *Metodika lesnogo stereoskopicheskogo deshifirovaniya aero- i kosmicheskikh snimkov*. SPb.: Lesproekt. 2015. 23 p.
12. *Ozhich O.S. Izmeritel'noe deshifirovanie chistykh osnovnykh drevostoev na tsifrovyykh aero- i kosmicheskikh snimkakh: Avtoref. diss. ... kand. sel'skokhozyaystvennykh nauk*. Minsk, 2017. 24 p.
13. *Malysheva N.V. Deshifirovanie drevesnoi rastitel'nosti na sverkhdetail'nykh izobrazheniyakh [Elektronnyi resurs]: metodicheskoe posobie: uchebnoe elektronnoe izdanie*; M.: FGBOU VPO MGUL, 2014. 40 p.
14. *Terekhin E. A. Sezonnaya dinamika proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti agroekosistem na osnove spektral'noi sputnikovoi informatsii* // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16, No. 4. P. 111–123.
15. *Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Ekologo-dinamicheskoe issledovanie lesoobrazovatel'nogo protsessa po kosmicheskikh snimkam* // *Lesovedenie*. 2013. No. 5. P. 76–85.
16. *Shovengerdt R.A. Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii*. M.: Tekhnosfera, 2010. 560 p.
17. *Kochub E.V., Topaz A.A. Analiz metodov obrabotki materialov distantsionnogo zondirovaniya Zemli* // *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki. Geodeziya*. 2012. No. 16. P. 132–140.
18. *Shumakov F.T., Tolstokhat'ko V.A., Malets A.Yu. Klassifikatsiya kosmicheskikh snimkov s ispol'zovaniem metodov klaster'nogo analiza* // *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*. 2011. V. 3/4 (51). P. 58–62.
19. *Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya pokazatelya simmetrii raspredeleniya pikselei v monitoringe sostoyaniya lesov pri deshifirovani kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniya* // *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. 2016. V. 1(1). P. 98–107. DOI: 10.24189/ncr.2016.008
20. *Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Monitoring sostoyaniya lesov s ispol'zovaniem klaster'nogo analiza pri deshifirovani kosmicheskikh snimkov srednego i vysokogo razresheniya* // *Nauka i obrazovanie*. 2016. No. 3. P.95–101.
21. *Rozhkov Yu.F. Monitoring sostoyaniya lesnykh ekosistem s ispol'zovaniem kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverkhvysokogo razresheniya* // *Vestnik SVFU. Ser. Nauki o Zemle*. 2019. No. 4(16). P. 71–81. DOI:10.25587/SVFU.2020.16.49741
22. *Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Otsenka dinamiki vosstanovleniya lesov posle pozharov v Olekminskom zapovednike (Rossiya) po kosmicheskikh snimkam*

Landsat// Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka. 2019. Vol. 4(1). P. 1–10. DOI:10.24189/ncr.2019.014

23. Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Otsenka strukturnykh kharakteristik lesnykh ekosistem s ispol'zovaniem deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov vysokogo i sverkhvysokogo razresheniya // Vestnik

SVFU. 2018. No. 1 (63). P. 38–51. DOI:10.25587/SVFU.2018.63.10539

24. Mandel'brot B.B. Fraktal'naya geometriya prirody. M.: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 656 p.

25. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of trees and other natural phenomena // Lecture Notes in Biomathematics. 1978. Vol. 23. P. 235–249.

About the authors

ROZHKOV Yuri Filippovich, candidate of chemical sciences, deputy director for scientific research, Olekminsky State Nature Reserve, Russia, 678100, Olekminsk, 6 Filatov str., <https://orcid.org/0000-0002-6830-9130>, olekmazap-nauka@yandex.ru;

KONDAKOVA Maria Yuryevna, candidate of biological sciences, senior researcher, Hydrochemical Institute, Russia, 344090, Rostov-on-Don, 1983 Stachki Ave., vesna-dm@mail.ru.

Citation

Rozhkov Yu.F., Kondakova M.Yu. Comparative characteristics of forests using the interpretation of ultra-high resolution images // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 125–136. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-10>

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Материаловедение

УДК 539.4

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-11

Квазихрупкое разрушение структурно-неоднородного материала с круговым отверстием при сжатии

С.В. Сукнёв

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, Россия
suknyov@igds.ysn.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального и теоретического исследования разрушения гипсовых плит, содержащих круговое отверстие и подверженных действию неравномерно распределенной сжимающей нагрузки. Испытывали образцы, изготовленные из высокопрочного гипса и из обычного строительного гипса. Образцы из высокопрочного гипса разрушались хрупко, в то время как образцы из строительного гипса продемонстрировали квазихрупкий характер разрушения. Для расчета критической нагрузки предложено использовать модифицированный нелокальный критерий разрушения, являющийся развитием критерия средних напряжений и содержащий комплексный параметр, характеризующий размер зоны предразрушения и учитывающий не только структуру материала, но также пластические свойства материала, геометрию образца и условия его нагружения. Результаты расчетов хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными. Кроме того, применение модифицированного нелокального критерия позволило объяснить наблюдаемую в эксперименте смену характера разрушения с хрупкого на вязкий при увеличении размера отверстия. Полученные результаты имеют важное практическое значение для расчетов на прочность материалов и конструкций с концентраторами напряжений.

Ключевые слова: гипс, хрупкое разрушение, квазихрупкое разрушение, нелокальный критерий разрушения, отверстие, масштабный эффект.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-05-00323.

Введение

Важное значение для целей гражданского и горно-технического строительства имеет совершенствование методов расчета на прочность материалов и конструкций, работающих в условиях концентрации напряжений. Структурно-неоднородные геоматериалы (бетон, гипс, горные породы) демонстрируют зависимость прочностных свойств от нагруженного объема (масштабный эффект), наиболее сильно проявляющуюся в условиях концентрации напряжений, когда эффективный нагруженный объем определяется зоной концентрации напряжений, размер которой мал по сравнению с характерными размерами деформируемого тела. В этих случаях для расчета

критической нагрузки используют нелокальные и градиентные критерии разрушения [1–10].

Нелокальные критерии основаны на представлении о формировании в материале зоны предразрушения, в которой происходит локальное перераспределение напряжений, в то время как основной материал деформируется упруго вплоть до разрушения. В последнее время критерии получили развитие в рамках теории критических расстояний и механики конечных трещин [11–20]. Общим свойством нелокальных критериев является введение новой константы – внутреннего размера материала d_0 , характеризующего его структуру, что позволяет описать масштабный эффект в условиях концентрации

напряжений и тем самым расширить область применения по сравнению с традиционными критериями.

Вместе с тем, как было отмечено в работе [21], перераспределение напряжений в пределах размера d_0 связано не с пластическими свойствами материала, а с дискретностью его структуры. Поэтому область применения нелокальных критериев – это, по преимуществу, хрупкое разрушение материалов с вырезами. Нелокальные критерии могут быть применены к случаю квазихрупкого разрушения, сопровождающегося образованием зоны маломасштабной текучести (зоны предразрушения) d , если ее размер не сильно отличается от d_0 , т. е. при выполнении условия $d \approx d_0 = \text{const}$. В эксперименте как хрупкое, так и квазихрупкое разрушение характеризуется, как правило, внезапным образованием и быстрым ростом трещины (при соблюдении необходимых условий для распространения неустойчивой трещины). Поэтому на практике определить степень «хрупкости» или «квазихрупкости» разрушения образцов с вырезами бывает очень сложно.

В настоящей работе экспериментально и теоретически исследовано влияние диаметра кругового отверстия на разрушение структурно-неоднородного материала (гипс) в зоне концентрации напряжений при неравномерно распределенном сжатии с учетом масштабного эффекта и выполнен анализ возможности применения нелокального критерия средних напряжений для описания квазихрупкого разрушения материала.

Методика эксперимента и материалы

Программа экспериментальных исследований включала проведение двух серий испытаний гипсовых образцов с круговым отверстием под действием неравномерно распределенного сжатия. Нагрузка p прикладывалась к образцу через жесткие вставки, помещенные между образцом и нагружающими плитами. Вставки размещали в центре верхней и нижней граней образца (рис. 1).

Испытывали образцы, изготовленные для первой серии экспериментов из водного раствора высокопрочного гипса, содержащего α -полугидрат сульфата кальция (гипс 1), и для второй серии экспериментов – из водного раствора строительного гипса, содержащего β -полугидрат сульфата кальция (гипс 2). В силу структурных особенностей α -модификация полугидрата сульфата кальция отличается пониженной водопотребностью, что обеспечивает более низкую пористость и, соот-

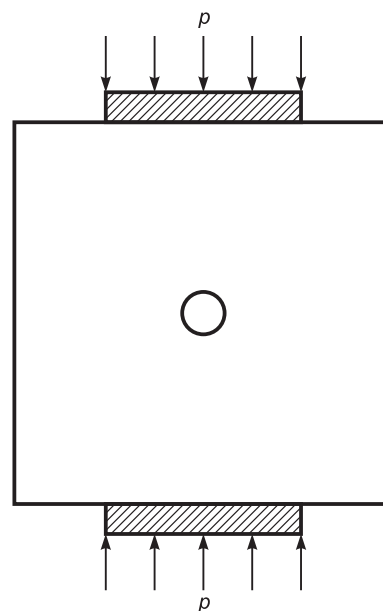


Рис. 1. Схема нагружения образца.

Fig. 1. Scheme of the specimen loading.

ветственно, более высокие прочностные характеристики высокопрочного гипса по сравнению с обычным строительным гипсом.

Содержание полугидрата в исходном составе высокопрочного гипса составляло от 92 до 95 % (по результатам 5 измерений). Содержание полугидрата в исходном составе строительного гипса составляло от 80 до 84 % (по результатам 7 измерений). Для гипса 1 водный раствор приготавливали в соотношении (по весу) 1 часть воды на 2 части гипса, для гипса 2 – в соотношении 1 часть воды на 1,5 части гипса. Образцы представляли собой квадратные плиты размером 200×200 мм и толщиной 40 мм (гипс 1) и 36 мм (гипс 2). После изготовления образцы высушивали на воздухе в течение 30–40 суток, плотность образцов в сухом состоянии составила $1,34 \text{ г/см}^3$ (гипс 1) и $1,10 \text{ г/см}^3$ (гипс 2).

Перед испытанием в центре образцов высверливали круговые отверстия различного диаметра от 1 до 20 мм. Было изготовлено и испытано по 5 образцов с отверстиями каждого диаметра. Нагружение образцов производили через вставки размером 120 мм. В процессе испытания образцов в зонах концентрации растягивающих напряжений на контуре отверстия наблюдали образование трещин отрыва, которое носило внезапный характер и сопровождалось характерным щелчком. В образцах с отверстием диаметром от 5 до 20 мм трещины моментально распространя-

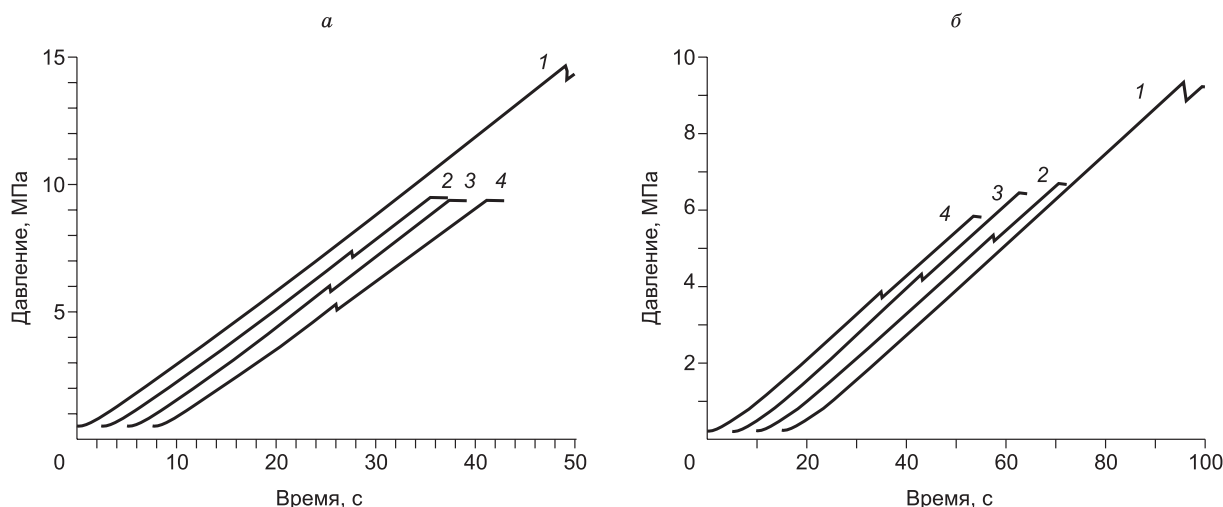


Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов из гипса 1 (а) и гипса 2 (б) с отверстиями различного диаметра (1 – 1 мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 15 мм).

Fig. 2. Deformation diagrams of specimens from gypsum 1 (a) and gypsum 2 (б) with holes of different diameters (1 – 1 mm; 2 – 5 mm; 3 – 10 mm; 4 – 15 mm).

лись на расстояние около 50 мм вдоль линии приложения сжимающей нагрузки, при дальнейшем нагружении их рост стабилизировался. В образцах с отверстием диаметром 1 и 2 мм трещины моментально распространялись практически на все вертикальное сечение образца. Образование трещин также сопровождалось локальной разгрузкой образца, что отражалось на диаграмме деформирования появлением зубца. Наибольшей разгрузке оказались подвержены образцы с отверстием наименьшего диаметра 1 мм. На рис. 2 показаны характерные диаграммы деформирования образцов с отверстиями различного диаметра в виде скриншотов окон программы testXpert с результатами испытаний. Критическую нагрузку в момент образования трещин определяли по вершине зубца на диаграмме.

Для определения прочности материала на сжатие использовали такие же квадратные образцы размером 200 × 200 мм без отверстия. Нагружение производили через вставки размером 200 мм. По результатам испытания 4 образцов из гипса 1 определено среднее значение предела прочности 34,11 МПа, стандартное отклонение составило 2,70 МПа. По результатам испытания 7 образцов из гипса 2 определено среднее значение предела прочности 11,53 МПа, стандартное отклонение составило 0,56 МПа.

Предел прочности материала на растяжение определяли из прямых экспериментов, т. е. путем испытания образцов на разрыв. Для этого

были изготовлены образцы толщиной 21 мм корсетного типа с радиусом закругления рабочей части 110–120 мм и шириной в минимальном сечении 29 мм. Для исключения возможности передачи на образец изгибающих и крутящих моментов во время нагружения были разработаны и изготовлены специальные цепные захваты. Их использование позволило добиться равномерного растяжения в минимальном сечении образца. Было испытано по 10 образцов, изготовленных из гипса 1 и гипса 2. По результатам испытания образцов из гипса 1 определено среднее значение предела прочности 5,38 МПа, стандартное отклонение составило 0,47 МПа. Для гипса 2 среднее значение предела прочности составило 2,61 МПа, стандартное отклонение – 0,19 МПа.

Теоретический подход

Расчет критического давления производили по обычному и модифицированному критерию средних напряжений [21]. Критерий имеет вид

$$\langle \sigma_e \rangle_d < \sigma_0,$$

где σ_0 – предел прочности материала при растяжении; $\langle \sigma_e \rangle_d$ – усредненное на расстоянии d по опасному сечению значение эквивалентного напряжения, характеризующего внутреннее напряженное состояние деформируемого тела:

$$\langle \sigma_e \rangle_d = \frac{1}{d} \int_{x_0}^{x_0+d} \sigma_e(x) dx,$$

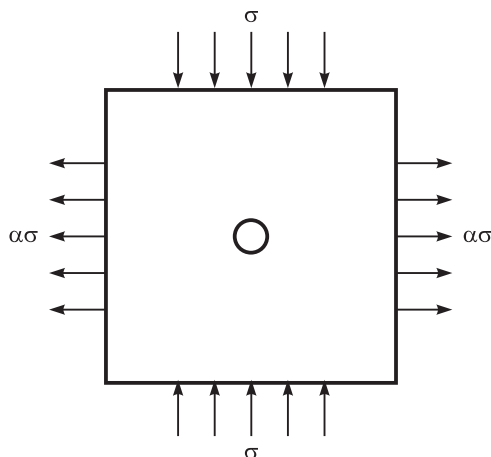


Рис. 3. Круговое отверстие при двухосном нагружении.

Fig. 3. Circular hole under biaxial loading.

где x_0 – координата точки максимума эквивалентного напряжения. Для хрупких материалов размер усреднения d полагают константой материала, характеризующей его структуру: $d = d_0 = \text{const}$. Эквивалентное напряжение будем определять по первой теории прочности (наибольших нормальных напряжений).

В работе [22] показано, что в результате нагружения образца по схеме, приведенной на рис. 1, в центральной части (вне зоны влияния отверстия) реализуется достаточно однородное двухосное напряженное состояние: растяжение усилиями $\alpha\sigma$ по горизонтальной оси и сжатие усилиями σ по вертикальной оси образца (рис. 3).

Критическое напряжение для образца с круговым отверстием радиуса a , подверженного двухосному нагружению [22]:

$$\sigma_c = 2\sigma_0[(1 + \gamma)\gamma^{-3} + \alpha(1 + \gamma^{-1})(2 + \gamma^{-1})]^{-1}, \quad (1)$$

где $\gamma = 1 + d/a$. При значении параметра $\gamma = 1$ формула (1) дает расчет критического напряжения согласно традиционному критерию разрушения.

Чтобы воспользоваться формулой (1), предварительно рассчитывали значения σ и α методом конечных элементов в центре образцов, нагруженных через вставки заданного размера и не содержащих отверстия. Для использованных в описанных выше экспериментах вставок значение σ составило $0,764 p$, $\alpha = 0,187$.

Для описания квазихрупкого разрушения размер усреднения будем определять по формуле [21]

$$d = d_0 + \beta L_e, \quad (2)$$

где L_e – размер зоны концентрации напряжений, β – безразмерный параметр, характеризующий

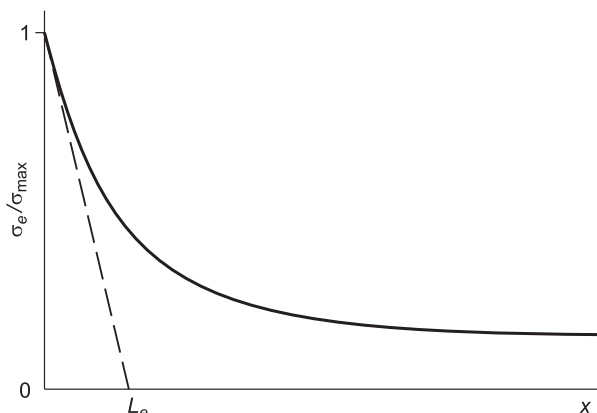


Рис. 4. Распределение эквивалентного напряжения по опасному сечению.

Fig. 4. Distribution of equivalent stress over weak section.

пластичность материала. Для хрупких материалов $\beta = 0$, для пластичных материалов $\beta \gg 1$. При $\beta \sim 1$ материал характеризуется умеренными пластическими свойствами. Первое слагаемое в выражении (2) характеризует собственно структуру материала, а второе отражает вклад неупругих деформаций. Таким образом, пластические свойства материала начинают проявляться при $d > d_0$ и проявляются тем сильнее, чем больше d по отношению к d_0 . Если $d = d_0$, будем говорить о хрупком разрушении, если $d > d_0$ – о квазихрупком разрушении, которое при $d \gg d_0$ переходит в вязкое разрушение.

Размер зоны концентрации напряжений оценим следующим образом:

$$L_e = \frac{\sigma_e}{|\text{grad } \sigma_e|}. \quad (3)$$

На рис. 4 схематично показано распределение эквивалентного напряжения по опасному сечению, отнесенное к величине максимального эквивалентного напряжения на контуре отверстия. Из точки максимума проведена касательная до пересечения с осью x . В соответствии с (3) размер зоны концентрации напряжений L_e определяется длиной отрезка на оси x от контура отверстия до точки пересечения касательной с осью.

В соответствии с известным решением задачи Кирша распределение нормального напряжения σ_y вдоль линии приложения сжимающей нагрузки имеет вид

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{2} \left(3 \frac{a^4}{x^4} - \frac{a^2}{x^2} \right) + \frac{\alpha\sigma}{2} \left(2 + \frac{a^2}{x^2} + 3 \frac{a^4}{x^4} \right). \quad (4)$$

Начало координат выбрано в центре отверстия, величина приложенного сжимающего напряжения σ принята положительной. Размер зоны концентрации напряжений, рассчитанный по формуле (3) с учетом (4), составил $L_e = a \frac{1+3\alpha}{5+7\alpha}$.

Соответственно, выражение для параметра γ в формуле (1) принимает вид

$$\gamma = 1 + \frac{d_0}{a} + \beta \frac{1+3\alpha}{5+7\alpha}. \quad (5)$$

В соответствии с формулой (1) и с учетом сделанных оценок для σ и α запишем выражение для критического давления в образце с круговым отверстием:

$$p_c = 2\chi C_0 [0,764(1+\gamma)\gamma^{-3} + 0,143(1+\gamma^{-1})(2+\gamma^{-2})], \quad (6)$$

где $\chi = \sigma_0/C_0$; C_0 – предел прочности материала при сжатии. Параметр γ определяется формулой (5), в которой $\alpha = 0,187$.

Асимптотическое (при $a \rightarrow \infty$) значение критического давления:

$$T_s = T_0 \frac{2(1+3\alpha)}{(1+\gamma_s)\gamma_s^{-3} + \alpha(1+\gamma_s^{-1})(2+\gamma_s^{-2})}, \quad (7)$$

где $\gamma_s = 1 + \beta \frac{1+3\alpha}{5+7\alpha}$, $T_0 = 0,838\chi C_0$ – асимптотическое значение критического давления для хрупкого материала. Для квазихрупких материалов, характеризующихся умеренными пластическими свойствами, $T_s \approx T_0(1 + \beta/2)$.

Результаты и обсуждение

На рис. 5, а представлены экспериментальные данные (точки) о величине нагрузки в момент образования трещин отрыва на контуре отверстия в зависимости от его диаметра l , полу-

ченные на образцах из гипса 1, и результаты расчета критического давления (кривая) по формуле (6) при $\beta = 0$. Размер d_0 составил 0,6 мм и оказался сопоставимым с размером наиболее крупных пор. Штриховая прямая рассчитана согласно традиционному подходу.

На рис. 5, б приведены экспериментальные данные (точки) и результаты расчета критического давления для гипса 2 при значениях $\beta = 0$ (кривая 1) и $\beta = 0,6$ (кривая 2). Размер d_0 составил 1,0 мм. В соответствии с формулой (7), напряжение T_s в первом случае равно T_0 (штриховая прямая), во втором случае $T_s = 1,3T_0$ (сплошная прямая).

Рисунок 5 иллюстрирует существенный масштабный эффект, т. е. влияние диаметра отверстия на локальную прочность материала. С его уменьшением критическое давление возрастает, достигая предела прочности на сжатие, с увеличением – асимптотически приближается к напряжению T_0 для гипса 1 и к напряжению T_s для гипса 2. Такое поведение хорошо описывается модифицированным критерием средних напряжений, в котором размер усреднения d определяется по формуле (2).

Как видно из рис. 5, а, разрушение образцов из гипса 1, характеризующееся внезапным образованием на контуре отверстия и быстрым распространением вдоль оси сжатия трещин отрыва, может быть описано в рамках обычного критерия средних напряжений. Экспериментальные данные подтверждают предсказываемое нелокальным критерием асимптотическое стремление критического давления к значению, рассчитанному в соответствии с традиционным подходом для упругого тела. Все это позволяет

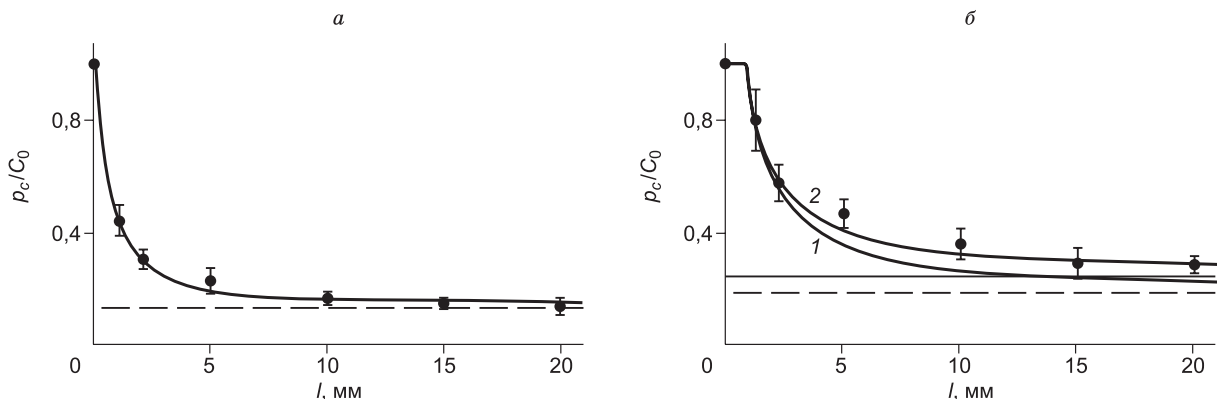


Рис. 5. Зависимость критического давления от диаметра отверстия для гипса 1 (а) и гипса 2 (б).

Fig. 5. Critical pressure versus hole diameter for gypsum 1 (a) and gypsum 2 (b).

охарактеризовать разрушение данного материала как хрупкое.

В то же время, применение критерия для описания экспериментальных данных, полученных на образцах из гипса 2 (см. рис. 5, б), позволяет получить удовлетворительные оценки величины критического давления только при малых (1–2 мм) диаметрах отверстия. Результаты расчетов, выполненных для больших диаметров отверстия, дают заниженные значения критического давления. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при увеличении диаметра отверстия критическое давление асимптотически стремится к значению, превышающему на 30 % значение, рассчитанное для упругого тела. При этом, как и в первом случае, разрушение образцов из гипса 2 характеризуется внезапным образованием на контуре отверстия и быстрым распространением вдоль оси сжатия трещин отрыва. Все это позволяет охарактеризовать разрушение данного материала в исследованном диапазоне диаметров отверстия как квазихрупкое.

Такое поведение критического давления при разрушении образцов из гипса 2 хорошо описывается модифицированным критерием средних напряжений. В этом критерии структурный параметр (размер зоны предразрушения) d представляется в виде суммы двух слагаемых, первое из которых характеризует собственно структуру материала, а второе отражает формирование зоны неупругих деформаций и зависит от пластических свойств материала, геометрии образца и условий его нагружения (краевых условий). Такое представление структурного параметра по-

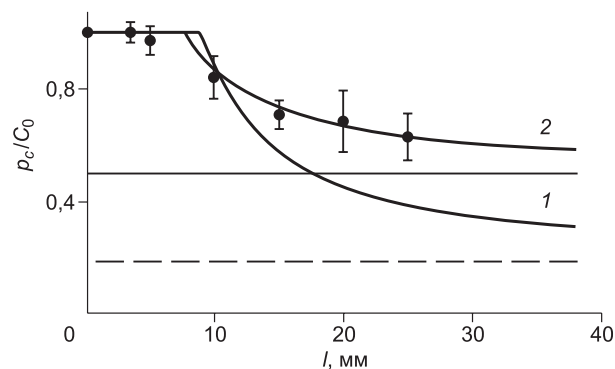


Рис. 6. Зависимость критического давления от диаметра отверстия.

Пояснения смотри в тексте.

Fig. 6. Critical pressure versus hole diameter.
Notes see in text.

зволяет более полно описать процесс разрушения материала, в частности, переход от хрупкого разрушения к вязкому.

В работе [23] представлены экспериментальные данные о разрушении гипсовых образцов с круговым отверстием при одноосном сжатии. Образцы были изготовлены из водного раствора строительного гипса, содержавшего в исходном составе только 60–70 % β -полугидрата сульфата кальция. Значительное количество (до 40 %) содержащегося в исходном составе двухводного сульфата кальция не участвовало в реакции гидратации при затворении гипсового вяжущего водой и фактически играло роль заполнителя, препятствуя формированию жесткого скелета. Это отразилось на механических свойствах образцов и на характере трещинообразования.

Формирование трещин отрыва на контуре кругового отверстия происходило по-разному для малых и больших отверстий. Их образование на контуре отверстий малого диаметра (до 5 мм включительно) носило внезапный характер, протяженность трещин в момент образования составляла 50–60 мм. Появление и распространение трещин на контуре отверстия большого диаметра (10 мм и более) происходило постепенно, что характерно для вязкого разрушения. После образования новых, удаленных от контура отверстия трещин раскрытие первичных трещин отрыва уменьшалось, их рост прекращался, на дальнейший процесс разрушения образца они влияния не оказывали.

В случае одноосного сжатия ($\sigma = p$, $\alpha = 0$) из формул (1), (2) получим выражение для критического давления:

$$p_s = \chi C_0 \frac{(1 + 2d_0/l + 0,2\beta)^3}{1 + d_0/l + 0,1\beta}. \quad (8)$$

При $l \rightarrow \infty$ имеем

$$T_s = T_0 \frac{(1 + 0,2\beta)^3}{1 + 0,1\beta}. \quad (9)$$

Здесь T_0 представляет собой прочность материала при растяжении.

На рис. 6 представлены экспериментальные данные (точки) о величине нагрузки в момент образования трещин отрыва на контуре отверстия в зависимости от его диаметра и результаты расчета критического давления по формуле (8) согласно обычному (кривая 1) и модифицированному (кривая 2) критерию средних напряжений. В последнем случае параметр $\beta = 2,5$. Размер d_0 в первом случае составил 4,5 мм, во вто-

ром – 2 мм. В соответствии с формулой (9), напряжение T_s в первом случае равно T_0 (штриховая прямая), во втором $T_s = 2,7T_0$ (сплошная прямая). Экспериментальные данные хорошо описываются модифицированным критерием средних напряжений.

Из рис. 6 видно, что материал обладает более выраженными пластическими свойствами, чем исследованный в настоящей работе гипс 2. Но эти свойства начинают проявляться только тогда, когда размер зоны неупругих деформаций превысит характерный размер структуры материала. В противном случае пластическая зона мала и разрушение носит хрупкий (или квазихрупкий) характер. От соотношения этих размеров зависит, какой механизм разрушения (хрупкий или вязкий) будет реализован. Таким образом, условие хрупкого разрушения образцов с концентрациями напряжений можно представить в виде

$$\beta L_e < d_0,$$

При $\beta = 0$ материал является хрупким по определению, а при $\beta > 0$ характер разрушения определяется размером и формой концентратора напряжений, а также условиями нагружения (краевыми условиями). В образцах с отверстиями малого диаметра пластическая зона также мала и не оказывает влияния на характер разрушения. С увеличением диаметра размер пластической зоны увеличивается, и уже она определяет вязкий характер распространения трещины, что и наблюдалось в эксперименте.

В случае кругового отверстия можно сделать следующую оценку для диаметра отверстия l^* , начиная с которого распространение трещины будет носить вязкий характер:

$$l^* = 10d_0/\beta.$$

Рассчитанный по формуле (10) диаметр l^* составил 8 мм. Хотя формула (10) является оценочной, полученное значение l^* хорошо количественно согласуется с тем, что наблюдалось в эксперименте.

Заключение

Теоретически и экспериментально исследовано разрушение гипсового материала, содержащего концентратор напряжений (отверстие), при неравномерно распределенном сжатии и выполнен анализ возможности применения нелокального критерия средних напряжений для оценки разрушающей нагрузки. В результате проведенных лабораторных испытаний установлено, что

образцы, изготовленные из высокопрочного гипса, разрушались хрупко, и в этом случае критическая нагрузка может быть рассчитана по обычному критерию средних напряжений. Образцы, изготовленные из строительного гипса, продемонстрировали квазихрупкий характер разрушения. В этом случае применение обычного критерия средних напряжений не позволяет получить удовлетворительные оценки разрушающей нагрузки. Поэтому для расчета разрушающей нагрузки предложено использовать модифицированный нелокальный критерий разрушения, являющийся развитием критерия средних напряжений и содержащий комплексный параметр, характеризующий размер зоны предразрушения и учитывающий не только структуру материала, но также пластические свойства материала, геометрию образца и условия его нагружения. Результаты расчетов по модифицированному критерию хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными и, кроме того, позволяют объяснить наблюдаемую в эксперименте смену характера разрушения образцов при увеличении размера отверстия.

Литература

1. Новожиллов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // Прикл. математика и механика. 1969. Т. 33, № 2. С. 212–222.
2. Lajtai E.Z. Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1972. V. 8, No. 5. P. 569–578.
3. Whitney J.M., Nuismer R.J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // J. Compos. Mater. 1974. Vol. 8, No. 4. P. 253–265.
4. Carter B.J., Lajtai E.Z., Yuan Y. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression // Int. J. Fract. 1992. V. 57, No. 3. P. 221–236.
5. Seweryn A., Mroz Z. A non-local stress failure condition for structural elements under multiaxial loading // Eng. Fract. Mech. 1995. V. 51, No. 6. P. 955–973.
6. Mikhailov S.E. A functional approach to non-local strength condition and fracture criteria // Eng. Fract. Mech. 1995. V. 52, No. 4. P. 731–754.
7. Корнев В.М. Интегральные критерии хрупкой прочности трещиноватых тел с дефектами при наличии вакансий в носике трещины. Прочность компактированных тел типа керамик // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 5. С. 168–177.
8. Сукнев С.В., Новопашин М.Д. Определение локальных механических свойств материалов // Докл. РАН. 2000. Т. 373, № 1. С. 48–50. DOI: 10.1134/1.1307085
9. Левин В.А., Морозов Е.М. Нелокальный критерий разрушения. Конечные деформации // Докл. РАН. 2002. Т. 386, № 1. С. 46–47.

10. Torabi A.R., Pirhadi E. Stress-based criteria for brittle fracture in key-hole notches under mixed mode loading // *Eur. J. Mech. A/Solids*. 2015. V. 49. P. 1–12.
11. Cornetti P., Pugno N., Carpinteri A., Taylor D. Finite fracture mechanics: a coupled stress and energy failure criterion // *Eng. Fract. Mech.* 2006. V. 73, No. 14. P. 2021–2033.
12. Taylor D. The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics. Oxford: Elsevier, 2007. 284 p.
13. Justo J., Castro J., Cicero S., Sánchez-Carro M.A., Husillos R. Notch effect on the fracture of several rocks: Application of the Theory of Critical Distances // *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2017. V. 90. P. 251–258.
14. Vargiu F., Sweeney D., Firrao D., Matteis P., Taylor D. Implementation of the Theory of Critical Distances using mesh control // *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2017. V. 92. P. 113–121.
15. Sapore A., Cornetti P. Crack onset and propagation stability from a circular hole under biaxial loading // *Int. J. Fract.* 2018. V. 214, No. 1. P. 97–104.
16. Sapore A., Torabi A.R., Etesam S., Cornetti P. Finite Fracture Mechanics crack initiation from a circular hole // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2018. V. 41, No. 7. P. 1627–1636.
17. Сукнёв С.В. Нелокальные критерии разрушения. Критерий конечной трещины // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2018. Т. 23, № 1. С. 67–74. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-67-74
18. Taylor D. The Theory of Critical Distances applied to multiscale toughening mechanisms // *Eng. Fract. Mech.* 2019. V. 209. P. 392–403.
19. Vedernikova A., Kostina A., Plekhov O., Bragov A. On the use of the critical distance concept to estimate tensile strength of notched components under dynamic loading and physical explanation theory // *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2019. V. 103, Article 102280. P. 1–11.
20. Justo J., Castro J., Cicero S. Notch effect and fracture load predictions of rock beams at different temperatures using the Theory of Critical Distances // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2020. V. 125, Article 104161. P. 1–15.
21. Сукнев С.В. Нелокальные и градиентные критерии разрушения квазихрупких материалов при сжатии // *Физическая мезомеханика*. 2018. Т. 21, № 4. С. 22–32.
22. Сукнев С.В. Разрушение хрупкого геоматериала с круговым отверстием при двухосном нагружении // *ПМТФ*. 2015. Т. 56, № 6. С. 166–172. DOI: 10.1134/S1029959919060079
23. Сукнев С.В. Применение нелокальных и градиентных критериев для оценки разрушения геоматериалов в зонах концентрации растягивающих напряжений // *Физическая мезомеханика*. 2011. Т. 14, № 2. С. 67–75.

Поступила в редакцию 14.04.2020

Принята к публикации 20.05.2020

Об авторе

СУКНЁВ Сергей Викторович, доктор технических наук, зав. лабораторией, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 43, Россия, suknyov@igs.ysn.ru.

Информация для цитирования

Сукнёв С.В. Квазихрупкое разрушение структурно-неоднородного материала с круговым отверстием при сжатии // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25, № 2. С. 137–146. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-11>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-11

Quasi-brittle fracture of a structurally inhomogeneous material with a circular hole under compression

S.V. Suknev

Chersky Institute of Mining of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia
suknyov@igs.ysn.ru

Abstract. The paper presents results of experimental and theoretical studies on fracture of gypsum plates containing a circular hole and subjected to non-uniformly distributed compression. The tested specimens were made of high-strength gypsum, and from gypsum plaster. The specimens of high-strength gypsum were

broken in the brittle manner, while the specimens of gypsum plaster demonstrated quasi-brittle fracture. To calculate the critical load, a modified nonlocal fracture criterion is proposed, which is the development of the average stress criterion, and which contains a complex parameter that characterizes the size of the fracture process zone and accounts not only for the material structure, but also for the plastic properties of the material, geometry of the specimen, and its loading conditions. The calculation results are in good agreement with the experimental data. In addition, the application of the modified nonlocal criterion makes it possible to explain the change in the character of fracture from brittle to ductile with an increase in the size of the hole, observed in the experiment. The results obtained are of great practical significance for assessment on the strength of materials and structures with stress concentration.

Key words: gypsum, brittle fracture, quasi-brittle fracture, nonlocal fracture criterion, hole, size effect.

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research under grant number 18-05-00323.

References

1. Novozhilov V.V. On a necessary and sufficient criterion for brittle strength // J. Appl. Math. Mech. 1969. V. 33, No. 2. P. 201–210.
2. Lajtai E.Z. Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1972. V. 8, No. 5. P. 569–578.
3. Whitney J.M., Nuismer R.J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // J. Compos. Mater. 1974. Vol. 8, No. 4. P. 253–265.
4. Carter B.J., Lajtai E.Z., Yuan Y. Tensile fracture from circular cavities loaded in compression // Int. J. Fract. 1992. V. 57, No. 3. P. 221–236.
5. Seweryn A., Mroz Z. A non-local stress failure condition for structural elements under multiaxial loading // Eng. Fract. Mech. 1995. V. 51, No. 6. P. 955–973.
6. Mikhailov S.E. A functional approach to non-local strength condition and fracture criteria // Eng. Fract. Mech. 1995. V. 52, No. 4. P. 731–754.
7. Kornev V.M. Integral criteria for the brittle strength of cracked bodies with defects in the presence of vacancies at the tip of a crack. Strength of compacted ceramics-type bodies // J. Appl. Mech. Tech. Phys.. 1996. V. 37, No. 5. P. 168–177.
8. Suknev S.V., Novopashin M.D. Determination of local mechanical properties of materials // Dokl. Phys. 2000. V. 373, No. 1. P. 48–50. DOI: 10.1134/1.1307085
9. Levin V.A., Morozov E.M. Nonlocal fracture criterion: Finite strains // Dokl. Phys. 2002. V. 386, No. 1. P. 46–47.
10. Torabi A.R., Pirhadi E. Stress-based criteria for brittle fracture in key-hole notches under mixed mode loading // Eur. J. Mech. A/Solids. 2015. V. 49. P. 1–12.
11. Cornetti P., Pugno N., Carpinteri A., Taylor D. Finite fracture mechanics: a coupled stress and energy failure criterion // Eng. Fract. Mech. 2006. V. 73, No. 14. P. 2021–2033.
12. Taylor D. The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics. Oxford: Elsevier, 2007. 284 p.
13. Justo J., Castro J., Cicero S., Sánchez-Carro M.A., Husillos R. Notch effect on the fracture of several rocks: Application of the Theory of Critical Distances // Theor. Appl. Fract. Mech. 2017. V. 90. P. 251–258.
14. Vargiu F., Sweeney D., Firrao D., Matteis P., Taylor D. Implementation of the Theory of Critical Distances using mesh control // Theor. Appl. Fract. Mech. 2017. V. 92. P. 113–121.
15. Sapora A., Cornetti P. Crack onset and propagation stability from a circular hole under biaxial loading // Int. J. Fract. 2018. V. 214, No. 1. P. 97–104.
16. Sapora A., Torabi A.R., Etesam S., Cornetti P. Finite Fracture Mechanics crack initiation from a circular hole // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. 2018. V. 41, No. 7. P. 1627–1636.
17. Suknyov S.V. Nonlocal fracture criteria. Finite fracture criterion // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2018. V. 23, No. 1. P. 67–74. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-23-1-67-74
18. Taylor D. The Theory of Critical Distances applied to multiscale toughening mechanisms // Eng. Fract. Mech. 2019. V. 209. P. 392–403.
19. Vedernikova A., Kostina A., Plekhov O., Bragov A. On the use of the critical distance concept to estimate tensile strength of notched components under dynamic loading and physical explanation theory // Theor. Appl. Fract. Mech. 2019. V. 103, Article 102280. P. 1–11.
20. Justo J., Castro J., Cicero S. Notch effect and fracture load predictions of rock beams at different temperatures using the Theory of Critical Distances // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2020. V. 125, Article 104161. P. 1–15.
21. Suknev S.V. Nonlocal and gradient fracture criteria for quasi-brittle materials under compression // Phys. Mesomech. 2018. V. 21, № 4. P. 22–32. DOI: 10.1134/S1029959919060079
22. Suknev S.V. Fracture of brittle geomaterial with a circular hole under biaxial loading // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2015. V. 56, No. 6. P. 166–172. DOI: 10.1134/S0021894415060188
23. Suknev S.V. Application of nonlocal and stress gradient criteria for estimation of fracture of geomaterials in tensile stress concentration zones // Fiz. Mezomekh. 2011. V. 14, No. 2. P. 67–75.

С.В. СУКНЕВ

About the author

SUKNEV Sergey Viktorovich, doctor of technical sciences, head of laboratory, Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, 43 Lenina pr., Yakutsk, 677980, suknyov@igds.ysn.ru.

Citation

Suknev S.V. Quasi-brittle fracture of a structurally inhomogeneous material with a circular hole under compression // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 137–146. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-11>

Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена

А.П. Васильев*, А.А. Охлопкова, Т.С. Стручкова, А.Г. Алексеев

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

*gtvap@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты исследования модифицирования политетрафторэтилена (ПТФЭ) минеральным силикатом (серицитом) и его влияние на физико-механические, триботехнические свойства и структурные параметры. При создании полимерного композиционного материала (ПКМ) использовали два способа: механическую и термическую активацию природного силиката перед смешением с полимером. ПТФЭ, наполненный термически активированным серицитом, характеризуется более высокими значениями физико-механических и триботехнических показателей по сравнению с композитами, содержащими механоактивированный наполнитель. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что модифицирование ПТФЭ механоактивированным серицитом приводит к увеличению степени кристалличности ПКМ, а использование термически активированного наполнителя сопровождается снижением кристалличности. Выявлена корреляционная зависимость между степенью кристалличности и средними размерами кристаллитов композитов в зависимости от содержания наполнителя. Методом ИК-спектроскопии установлено протекание трибохимических реакций при фрикционном контакте композитов с контртелом, способствующих формированию поверхностного слоя, локализирующего сдвиговые деформации и защищающего материал от изнашивания.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, серицит, структура, износостойкость, коэффициент трения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер Госзадания [FSRG-2020-0017]).

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем материаловедения остается увеличение ресурса техники и технологического оборудования при эксплуатации в экстремальных климатических условиях арктической зоны России [1]. Наиболее подверженными механическим и климатическим воздействиям являются подвижные элементы техники и технологического оборудования, такие как герметизирующие уплотнения или клапаны, подшипники скольжения и узлы трения в целом [2, 3]. Узлы трения не только эксплуатируются в широком интервале температур, в том числе при низких температурах, но подвержены при этом воздействию агрессивных сред (масла, топливо и смазки). В связи с этим предпочтительными материалами для изготовления элементов узлов трения являются ПКМ, характеризующиеся стойкостью к большинству агрессивных сред, сохраняющие эластичность, прочность в широком интервале температур и обладающие высокими механическими и триботехническими характе-

ристиками. Среди полиолефиновых полимеров ПТФЭ отличается высокой химической инертностью к большинству агрессивных сред, работоспособностью в широком интервале рабочих температур (от -260 до $+260$ °C) и низким коэффициентом трения [4, 5]. Однако, ненаполненный ПТФЭ обладает низкой износостойкостью, что ограничивает его применение в узлах трения. В связи с этим повышение износостойкости исходного ПТФЭ – актуальная задача материаловедения. Одним из эффективных решений является модифицирование структуры ПТФЭ наполнителями различной химической природы, в том числе комбинированными, включающими как дисперсные, так и волокнистые компоненты [6, 7]. Природные минералы – вермикулит, каолин, бентонит, серпентинит – являются перспективными наполнителями для модифицирования ПТФЭ [8–10]. В последнее время использованию природных слоистых силикатов в качестве модификаторов полимеров посвящено достаточное количество работ, что связано с их неординарным

поведением в матрице. Анализ литературы показал, что слоистые силикаты обладают рядом неоспоримых преимуществ перед другими наполнителями: значительное улучшение механических и триботехнических свойств полимерной матрицы, возможность получения эксфолиированных и интеркалированных нанокмпозитов, а также сравнительно легкая доступность и низкая стоимость.

Серицит представляет собой глинистый минерал, относящийся к филлосиликатным минералам (тип 2:1) со структурой и составом, схожим с мусковитом. Природный минерал серицит практически не набухает в воде, не имеет ионообменной способности, характеризуется высокой кислотостойкостью, огнестойкостью и электроизоляционными свойствами [11, 12]. Кроме того, серицит по сравнению с другими типами глини отличается высокими аспектным соотношением (более 1000), упругостью, экранированием и поглощением ультрафиолетового излучения [13]. Совокупность вышеперечисленных показателей обуславливает перспективность использования серицита в качестве наполнителя политетрафторэтилена.

Перед введением в полимер слоистые силикаты предварительно подготавливают, используя такие методы, как термическая и УЗ-обработка, механическая и кислотная активация, щелочная модификация [14, 15]. Как правило, химически модифицированные глины, содержащие на поверхности частиц поверхностно-активные вещества (ПАВ), не могут выдерживать высокую температуру переработки ПТФЭ 375 ± 5 °С. В связи с этим физические способы обработки минеральных силикатов являются наиболее оправданными. К перспективным способам обработки слоистых силикатов можно отнести технологию механо- и термической активации. В работах С.А. Слепцовой с соавторами [9, 16] показано, что введение в ПТФЭ природных слоистых силикатов с предварительной механической активацией (механоактивация) приводит к значительному улучшению триботехнических свойств материала. Это связывают с преобладающей ролью активированных силикатов при кристаллизации ПТФЭ, а также их участием в формировании износостойких вторичных структур на поверхности трения. В работах Liang Y. с соавторами [13, 17] показано, что термическая активация (термоактивация) серицита приводит к уширению межплоскостного расстояния, это обусловлено образованием дефектов в кристаллической ре-

шетке. Благодаря этому повышается совместимость наполнителя с полимерной матрицей, что приводит к существенному улучшению деформационно-прочностных свойств композита.

Цель работы – исследование влияния способов обработки (термоактивации и механоактивации) серицита на структуру и свойства ПТФЭ.

Объекты и методы исследования

Полимерной матрицей служил политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки ПН-90 (ОАО «Галополлимер», Россия). Размер частиц 46–132 мкм, плотность 2,16 г/см³. В качестве наполнителя использовали природный минерал серицит (Ст) месторождения провинции Хэбэй, КНР. Серицит представляет собой порошок со средним размером частиц ~9,2 мкм с чешуйчатой формой частиц. Химическая формула серицита: $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$.

В данной работе серицит предварительно обрабатывали двумя способами: 1) термическую активацию (т/а) проводили в программируемой муфельной печи (ELSKLO, Чехия) при 800 °С в течение 1 ч, согласно работе [12]; 2) механическую активацию (м/а) проводили в планетарной мельнице Активатор-2S (Активатор, Россия), согласно работе [8]. Средний размер частиц серицита после термоактивации не изменился, после механической активации средний размер частиц составляет ~3,4 мкм. Массовая доля серицита в композитах составляла от 1 до 5 мас. %.

Образцы для исследования изготавливали стандартным способом: прессование при удельной нагрузке 50 МПа при комнатной температуре и спекание в программируемой муфельной печи SNOL 180/400 (SNOL, Литва) при 375 ± 5 °С.

Физико-механические характеристики ПТФЭ и ПКМ определяли согласно ГОСТ 11262-80 на универсальной испытательной машине Autograf AGS-J (Shimadzu, Япония). Плотность образцов измеряли согласно ГОСТ 15139-69. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду.

Степень кристалличности ПТФЭ и ПКМ определяли методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре X'TRA (ThermoFisher, Швейцария) по соотношению площадей рефлексов, соответствующих аморфным и кристаллическим областям. Средние размеры кристаллитов определяли по уширению пиков дифракции согласно формуле Селякова–Шеррера ($k = 0,94$) [18]. ИК-спектры ПТФЭ и ПКМ полу-

чали на спектрометре с фурье-преобразованием Varian 7000 FT-IR (Varian, США).

Триботехнические характеристики исследовали на трибомашине UMT-3 (CETR, США) по схеме трения «палец–диск». Диаметр образцов $10,0 \pm 0,2$ мм, длина $20,0 \pm 1,0$ мм. Коэффициент трения ПТФЭ и ПКМ определяли, используя программу CETRDataViewer 2.19. Контртелло – стальная диск из стали 45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатость $R_a = 0,06–0,08$ мкм. Нормальная нагрузка 160 Н, линейная скорость скольжения 0,2 м/с, время испытания 3 часа. Интенсивность изнашивания k рассчитывали по формуле

$$k = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot d},$$

где F_N , Н, – нормальная нагрузка; d , м, – путь скольжения; Δm , г, – масса изношенного материала; ρ , г/мм³, – плотность образцов.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты исследования физико-механических характеристик ПТФЭ и ПКМ в зависимости от массового содержания наполнителя и способа обработки серицита. Как видно из таблицы, введение термоактивированного серицита в ПТФЭ приводит к снижению прочности при растяжении на 15–20 % при сохранении эластичности на уровне исходного полимера. В случае введения механоактивированного серицита в ПТФЭ также зарегистрировано снижение прочности при растяжении на 15–45 % и увеличение эластичности на 13–15 % относительно исходного ПТФЭ.

Значение модуля упругости композитов имеет тенденцию к повышению независимо от способа обработки наполнителя. Максимальное значение модуля упругости зарегистрировано в композиции состава ПТФЭ+5 мас. % Ст (т/а), что на 24 % выше относительно исходного полимера. Видно, что модуль упругости композита состава ПТФЭ+5 мас. % Ст (м/а) также повысился на 20 % по сравнению с исходным ПТФЭ.

С целью изучения структурообразования ПТФЭ при введении серицита, обработанного двумя разными способами, и их влияния на свойства ПКМ провели исследование методом рентгеноструктурного анализа.

На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы исходного ПТФЭ и ПКМ. Рентгеноструктурный анализ исходного ПТФЭ свидетельствует о наличии типичного кристаллического пика полимера при $2\theta \sim 18,1^\circ$ (см. рис. 1, а)

[18]. Кроме того, выявлены «чувствительные» пики исходного ПТФЭ в области $2\theta = 30–45^\circ$ ($31,6, 36,6, 37,1$ и $41,2^\circ$), которые зависят от температуры, т. е. относящиеся к фазовому переходу при температурах 19 и 30°C при нормальном атмосферном давлении [19, 20].

Как видно из рис. 1, во всех исследованных композитах наблюдается интенсивный пик в области $2\theta \sim 18,1^\circ$, который связан с дальним упорядочением вдоль (100) плоскостей решетки в ПТФЭ. Известно, что этот пик не зависит от фазовых переходов в диапазоне температур $10–35^\circ\text{C}$ [19, 21].

Из рис. 1, в, з видно, что интенсивность пиков ПТФЭ, наполненного термоактивированным серицитом, в области $36,6, 37,1$ и $41,2^\circ$ снижается с увеличением содержания наполнителя по сравнению с исходной полимерной матрицей и с композитами, содержащими механоактивированный серицит. Аналогичное изменение интенсивности пиков по сравнению с исходным ПТФЭ в обозначенных областях наблюдается при температуре 35°C , что объясняется переходом от фазы IV к высокотемпературной фазе полимера (фаза I) [21].

Во всех исследованных композитах выявлены новые пики в области $\sim 26,6^\circ$, относящиеся к наполнителю [17, 22]. Наиболее интенсивные пики наблюдаются в композитах с термоакти-

Таблица 1
Результаты физико-механических характеристик ПТФЭ и ПКМ

Table 1 Mechanical properties of PTFE and PCM			
Образец	σ_{pm} , МПа	ε_{pp} , %	E_p , МПа
Исходный ПТФЭ	20 ± 2	320 ± 20	444 ± 40
После термической активации (т/а)			
ПТФЭ+1 мас.% Ст	18 ± 2	341 ± 20	450 ± 40
ПТФЭ+3 мас.% Ст	17 ± 2	348 ± 20	462 ± 40
ПТФЭ+5 мас.% Ст	16 ± 2	349 ± 20	554 ± 40
После механической активации (м/а)			
ПТФЭ+1 мас.% Ст	17 ± 2	371 ± 20	481 ± 40
ПТФЭ+3 мас.% Ст	12 ± 1	365 ± 20	493 ± 40
ПТФЭ+5 мас.% Ст	11 ± 1	364 ± 20	533 ± 40

Примечание. σ_{pm} – прочность при растяжении; ε_{pp} – относительное удлинение при разрыве; E_p – модуль упругости при растяжении.

Note. σ_{pm} – strength at rupture; ε_{pp} – elongation at rupture; E_p – elastic modulus.

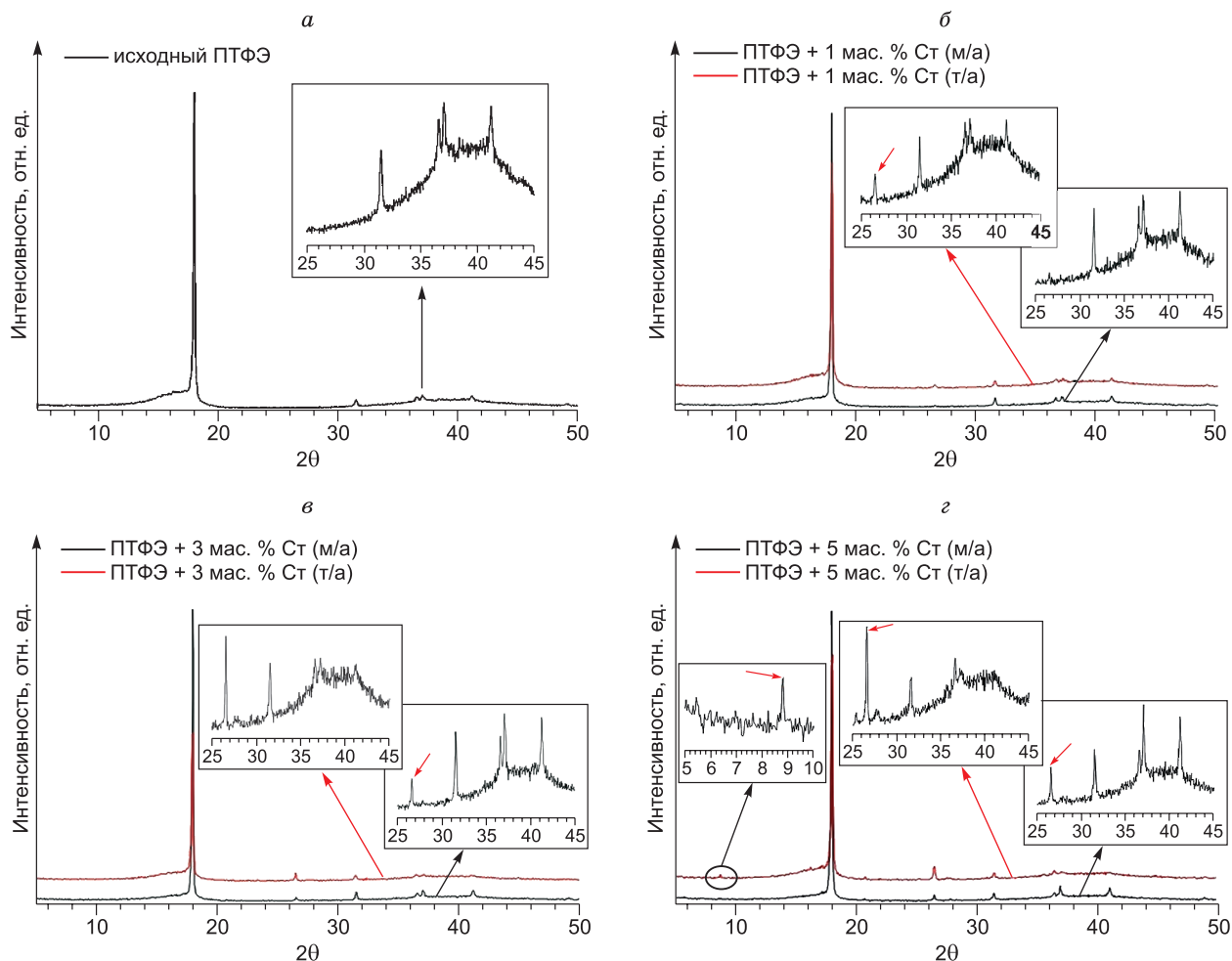


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы ПТФЭ и ПКМ:
 а – исходный ПТФЭ; б – ПТФЭ+1 мас.% Ст; в – ПТФЭ+3 мас.% Ст; г – ПТФЭ+5 мас.% Ст.

Fig. 1. X-ray diffraction of PTFE and PCM:
 а – initial PTFE; б – PTFE + 1 wt.% St; в – PTFE + 3 wt.% St; г – PTFE + 5 wt.% St.

вированным серицитом, что возможно, связано с сохранением размеров частиц. В композите состава ПТФЭ+5 мас.% Ст (т/а) выявлены характерные пики дифракции серицита в области $2\theta = \sim 8,7$ и $\sim 26,6^\circ$, что, вероятно, связано с агломерацией наполнителя в полимерной матрице [23]. Однако, из результатов физико-механических исследований видно, что ПКМ с термоактивированным серицитом имеет более высокую прочность по сравнению с ПТФЭ, наполненным механоактивированным серицитом.

В табл. 2 приведены результаты исследования рентгеноструктурного анализа и плотности ПТФЭ и ПКМ в зависимости от массового содержания наполнителя и способа обработки серицита. Из таблицы 2 видно, что изменение структурных параметров ПТФЭ зависит от мас-

сового содержания серицита и способа его обработки. Так, введение термоактивированного серицита при содержании 1–3 мас.% в ПТФЭ приводит к снижению степени кристалличности на 5–7 % относительно исходного полимера. При увеличении содержания наполнителя в ПТФЭ до 5 мас.% Ст (т/а) зарегистрировано некоторое повышение степени кристалличности. Подобное изменение степени кристалличности ПКМ согласуется с увеличением размеров кристаллитов от 59,86 до 66,76 нм.

Введение механоактивированного серицита в ПТФЭ приводит к повышению степени кристалличности ПКМ на 5–11 % и средних размеров кристаллитов на 18–22 % относительно исходного полимера (табл. 2). Подобное изменение структурных параметров ПКМ свидетельствует

о более высокой структурной активности механоактивированного серицита вследствие повышения дисперсности и более развитой активной поверхности частиц при механоактивации [24]. Возможно, введение термоактивированного серицита в ПТФЭ влечет измельчение надмолекулярной структуры ПКМ, что приводит к уменьшению размеров структурных параметров, приводящих к более высоким деформационно-прочностным характеристикам по сравнению с композитами состава ПТФЭ+Ст (м/а).

Как видно из табл. 2, плотность ПКМ монотонно повышается с увеличением содержания наполнителя, независимо от способа его обработки. Так, в полимерных композитах, содержащих серицит (т/а), значение плотности возрастает от 2,17 до 2,19 г/см³. В случае ПТФЭ, наполненного механоактивированным серицитом, значение плотности увеличивается от 2,18 до 2,23 г/см³. Следует отметить, что плотность ПКМ с механоактивированным серицитом во всем диапазоне концентраций наполнителя выше по сравнению с ПТФЭ+Ст(т/а), как и степень кристалличности.

На рис. 2 приведены результаты исследования триботехнических характеристик ПТФЭ и ПКМ в зависимости от массового содержания наполнителя и способа обработки серицита. В данной работе интенсивность изнашивания для исходного ПТФЭ составляла 302,6 мм³/(Н·м) и коэффициент трения ~0,22.

Износостойкость ПТФЭ+1 мас.% Ст(т/а) повысилась в 120 раз по сравнению с исходным полимером (см. рис. 2, а). При дальнейшем увеличении содержания термоактивированного се-

Таблица 2

Результаты степени кристалличности, средних размеров кристаллитов и плотности ПТФЭ и ПКМ

Table 2

Results of crystallinity, crystallite size and density of PTFE and PCM

Образец	α , %	d , нм	ρ , г/см ³
Исходный ПТФЭ	63 ± 2	63,45	2,17
После термической активации (т/а)			
ПТФЭ+1 мас.% Ст	56 ± 2	59,86	2,17
ПТФЭ+3 мас.% Ст	58 ± 2	60,46	2,18
ПТФЭ+5 мас.% Ст	65 ± 2	66,76	2,19
После механической активации (м/а)			
ПТФЭ+1 мас.% Ст	69 ± 2	71,75	2,18
ПТФЭ+3 мас.% Ст	74 ± 2	74,98	2,22
ПТФЭ+5 мас.% Ст	75 ± 2	76,20	2,23

Примечание. α – степень кристалличности РСА; d – средний размер кристаллитов; ρ – плотность.

Note. α – crystallinity (XRD); d – crystallite size; ρ – density.

рицита в ПКМ от 3 до 5 мас. % приводит к снижению интенсивности изнашивания в 840 раз относительно исходного ПТФЭ. Введение механоактивированного серицита в ПТФЭ приводит к повышению износостойкости в 85–510 раз при содержании 1–3 мас. % Ст м/а (см. рис. 1). Дальнейшее увеличение содержания Ст (м/а) от 3 до 5 мас. % в ПТФЭ сопровождается незначительным повышением интенсивности изнашивания на 14 % от минимального значения. Зарегистри-

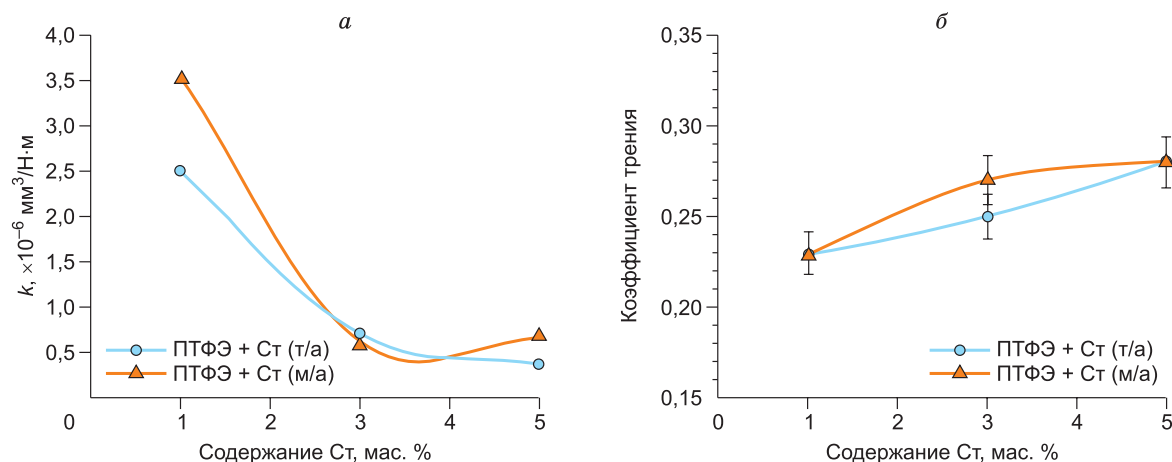


Рис. 2. Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) ПКМ.

Fig. 2. Results of wear rate (a) and friction coefficient (b) PCM.

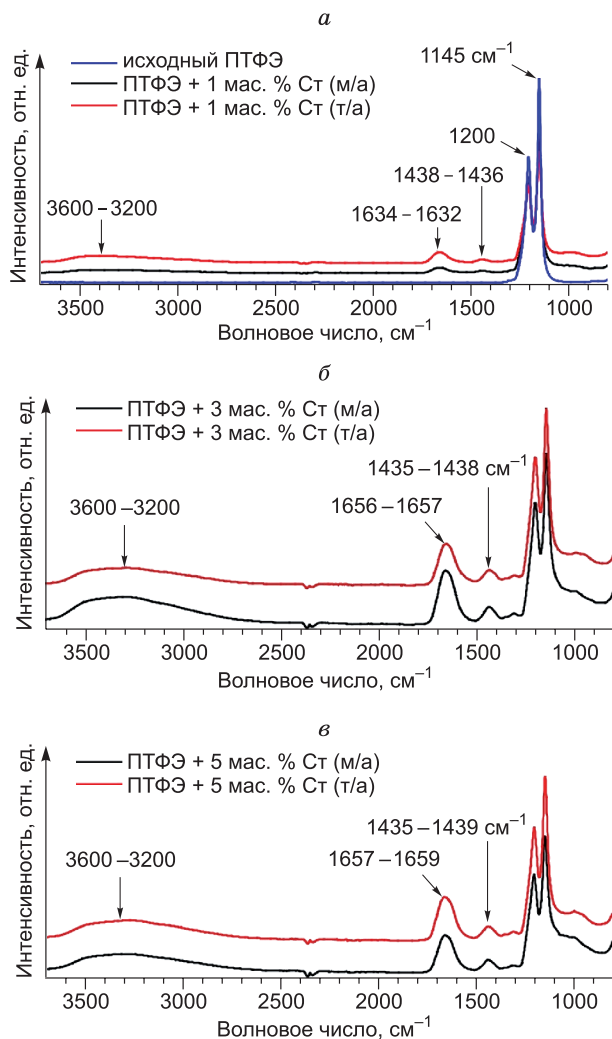


Рис. 3. ИК-спектры образцов после трения: а – исходный ПТФЭ, ПТФЭ+1 мас.% Ст; б – ПТФЭ+3 мас.% Ст; в – ПТФЭ+5 мас.% Ст.

Fig. 3. IR spectra of samples after friction: а – initial PTFE, PTFE + 1 wt.% St; б – PTFE + 3 wt.% St; в – PTFE + 5 wt.% St.

ровано незначительное повышение коэффициента трения во всех исследованных ПКМ от 0,23 до 0,28 с увеличением содержания наполнителя от 1 до 5 мас. %. Видно, что в целом по физико-механическим и триботехническим характеристикам наилучшими свойствами характеризуются ПКМ, содержащие термоактивированный серицит.

На рис. 3 приведены результаты ИК-спектроскопических исследований поверхностей трения ПТФЭ и ПКМ. В каждом исследованном ИК-спектре ПКМ выявлены основные пики в области ~ 1145 см^{-1} и ~ 1200 см^{-1} , которые относятся к валентным колебаниям CF_2 -связи [16].

Как видно из рис. 3, после трения ПКМ выявлены новые пики в областях 1439–1435 и 1657–1632 см^{-1} , которые относятся к карбоксилатным и карбонильным группам $-\text{COO}^-$, и широкие пики в области 3600–3200 см^{-1} , которые относятся к гидроксильным группам [9]. Эти пики свидетельствуют о протекании трибохимических реакций при фрикционном контакте [25]. Известно [26, 27], что в процессе трения карбоксилат-анионы вступают в химическое взаимодействие с металлами наполнителя, образуя комплексные соединения по донорно-акцепторному механизму, ингибирующие трибоокисление. Вследствие этого происходит образование прочной пленки переноса на контртеле и защитного слоя на поверхности трения ПКМ из продуктов трибо-распада ПТФЭ и частиц износа. Из рис. 3 видно, что ИК-спектры ПКМ после трения независимо от способа обработки (м/а и т/а) наполнителя практически идентичны при всех концентрациях наполнителя. Эти результаты позволяют предположить, что протекание трибохимических реакций во время фрикционного контакта практически не зависит от способа обработки наполнителя. Установлено, что триботехнические свойства ПКМ в большей степени зависят от состава и размеров частиц наполнителя.

Заключение

Таким образом, на основании результатов исследования можно сделать вывод, что предпочтительным способом обработки серицита является термическая активация. Показано, что прочность при растяжении композита, наполненного 5 мас. % Ст (т/а), выше на 45 % по сравнению с ПКМ состава ПТФЭ+5 мас.% Ст (м/а). Введение серицита с термоактивацией в ПТФЭ приводит к снижению степени кристалличности и уменьшению размеров кристаллитов, а в композитах, содержащих механоактивированный серицит, зафиксировано увеличение степени кристалличности и размеров кристаллитов. Износостойкость ПКМ с термоактивированным серицитом повысилась в 120–840 раз относительно исходного ПТФЭ. В ПКМ, содержащем механоактивированный серицит, износостойкость возросла в 85–510 раз относительно исходного полимера. Методом ИК-спектроскопии ПКМ после трения выявлены новые пики, свидетельствующие о протекании трибохимических реакций. Таким образом, показан эффективный способ модифицирования ПТФЭ природным силикатом серицитом,

способствующим созданию триботехнических материалов с повышенными износостойкостью, модулем упругости, эластичностью. Деформационно-прочностные характеристики ПКМ находятся в пределах, необходимых для герметизирующих материалов.

Литература

1. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic materials science: current state and prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. V. 87, No. 5. P. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S101933161705001X>.
2. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2018. V. 1, No. 1. P. 3–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>.
3. Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Nikiforova P.G., Struchkova T.S., Okhlopko T.A., Ivanova Z.S. Main Directions for Research on the Development of Tribotechnical Composites Used in the Arctic Regions (Experience of North-Eastern Federal University in Yakutsk) // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. V. 10, No. 6. P. 1441–1447. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113319060157>.
4. Jia Z., Yang Y.L., Chen J.J., Yu X.J. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition // Wear. 2010. V. 268, No. 7–8. P. 996–1001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.009>.
5. Tan B., Stephens L.S. Evaluation of viscoelastic characteristics of PTFE-Based materials // Tribology International. 2019. V. 140. P. 105870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105870>.
6. Krick B.A., Pitenis A.A., Harris K.L. et al. Ultralow wear fluoropolymer composites: nanoscale functionality from microscale fillers // Tribology International. 2016. V. 95. P. 245–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.002>.
7. Машков Ю.К., Кургузова О.А., Рубан А.С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокомпозитов // Вестник СибАДИ. 2018. Т. 15, № 1 (59). С. 36–44.
8. Лазарева Н.Н., Слепцова С.А., Капитонова Ю.В., Охлопкова А.А., Москвитина Л.В. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и природной глины // Перспективные материалы. 2017. № 12. С. 39–50.
9. Sleptsova S.A., Lazareva N.N., Fedoseeva V.I., Kapitonova Y.V., Okhlopko A.A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE // Journal of Friction and Wear. 2018. V. 39, No. 6. P. 469–475. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366618060120>.
10. Sleptsova S.A., Laukkanen S., Gladkina N.P., Fedoseeva V.I., Okhlopko A.A., Grigoryeva L.A. Effect of kaolinite on the properties and structure of PTFE // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018. V. 2053, No. 1. P. 040092. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5084530>.
11. Reddy D.H.K., Lee S.M., Kim J.O. A review on emerging applications of natural sericite and its composites // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27, No. 11. P. 1514–1523. DOI: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.27.11.1745>.
12. Liang Y., Ding H., Sun S., Chen Y. Microstructural Modification and Characterization of Sericite // Materials. 2017. V. 10, No. 10. P. 1182. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10101182>.
13. Liang Y., Yang D., Yang T., Liang N., Ding H. The Stability of Intercalated Sericite by Cetyl Trimethylammonium Ion under Different Conditions and the Preparation of Sericite/Polymer Nanocomposites // Polymers. 2019. V. 11, No. 5. P. 900. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11050900>.
14. de Mayo González-Miranda F., Garzón E., Reca J., Pérez-Villarejo L., Martínez-Martínez S., Sánchez-Soto P. J. Thermal behaviour of sericite clays as precursors of mullite materials // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. V. 132, No. 2. P. 967–977. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7046-9>.
15. Kumar G., Tanvar H., Pratap Y., Dhawan N. Thermal and mechanical activation of sericite for recovery of potash values // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2019. V. 72, No. 1. P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1452-3>.
16. Sleptsova S.A., Okhlopko A.A., Kapitonova I.V., Lazareva N.N., Makarov M.M., Nikiforov L.A. Spectroscopic study of tribooxidation processes in modified PTFE // Journal of Friction and Wear. 2016. V. 37, No. 2. P. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.3103/S106836661602015X>.
17. Liang Y., Jiang W., Ding H., Wang Y. The modification and characterization of thermal-treated sericite by fluorosilicate // Scientificreports. 2018. V. 8, No. 1. P. 14293. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32496-x>.
18. Мартынов М.А., Вылегжанина К.А. Рентгенография полимеров. Метод. пособие для промышленных лабораторий. Л.: Химия, 1972. 96 с.
19. Fu T., Mo Z., Han P., Qi Y., Wu S., Chen D. Study on factors affecting room temperature transition of polytetrafluoroethylene // Chin. J. Polym. Sci. 1986. V. 4, No. 2. P. 170–179.
20. Brown E.N., Rae P.J., Dattelbaum D.M., Clausen B., Brown D.W. In-situ measurement of crystalline lattice strains in polytetrafluoroethylene // Experimental mechanics. 2008. V. 48, No. 1. P. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9075-3>.
21. Marega C., Marigo A., Causin V., Kapeliouchko V., Di Nicolò E., Sanguineti A. Relationship between the Size of the Latex Beads and the Solid–Solid Phase Transitions in Emulsion Polymerized Poly (tetrafluoroethylene) // Macromolecules. 2004. V. 37, No. 15. P. 5630–5637. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma049238o>.
22. Thanhminglana, Tiwari D., Lee S.M. Hybrid materials in the remediation of arsenic contaminated waters: a physico-chemical study // Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57, No. 5. P. 1995–2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.979241>.

23. Yan S. et al. Thermal, mechanical, and tribological properties of sodium-montmorillonite-nanoparticle-reinforced polyethersulfone and polytetrafluoroethylene ternary composites // *Friction*. 2020. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0343-x>.

24. Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А., Кургузова О.А. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена // *Журнал технической физики*. 2014. Т. 84, № 5. С. 66.

25. Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W.G., Krick B.A., Blackman G.S., Kasprzak D.J., Junk C.P. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of

protective surface films // *Macromolecules*. 2015. V. 48, No. 11. P. 3739–3745. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b00452>.

26. Onodera T., Kawasaki K., Nakakawaji T., Higuchi Y., Ozawa N., Kurihara K., Kubo M. Effect of tribochemical reaction on transfer-film formation by poly(tetrafluoroethylene) // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2014. V. 118, No. 22. P. 11820–11826. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp503331e>.

27. Bhargava S., Makowiec M.E., Blanchet T.A. Wear reduction mechanisms within highly wear-resistant graphene-and other carbon-filled PTFE nanocomposites // *Wear*. 2020. V. 444. P. 203163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203163>.

Поступила в редакцию 09.05.2020

Принята к публикации 15.05.2020

Об авторах

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, УНТЛ «Технологии полимерных нанокомпозитов», Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (СВФУ), 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, ORCID: 0000-0003-0691-7066, okhlopkova@yandex.ru;

ВАСИЛЬЕВ Андрей Петрович, ведущий инженер, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (СВФУ), 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, ORCID: 0000-0001-7699-533X, gtvap@mail.ru;

СТРУЧКОВА Татьяна Семеновна, кандидат технических наук, доцент, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (СВФУ), 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, ORCID: 0000-0002-6469-1491, sts_23@mail.ru;

АЛЕКСЕЕВ Алексей Гаврильевич, старший преподаватель, Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова (СВФУ), 677000, Якутск, ул. Белинского, 58, Россия, alexalekseev.z@gmail.com.

Информация для цитирования

Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25, № 2. С. 147–156. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-12

Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene

A.P. Vasilev*, A.A. Okhlopkova, T.S. Struchkova, A.G. Alekseev

North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov

*gtvap@mail.ru

Abstract. This paper presents the results of the investigation of polytetrafluoroethylene (PTFE) modification with mineral silicate (sericite) and its effect on the physicomachanical, tribotechnical properties and structural parameters. Two methods were used to develop a polymer composite material (PCM): mechani-

cal and thermal activation of natural silicate before mixing with the polymer. It was shown that PTFE filled with thermally activated sericite is characterized by higher physicomechanical and tribotechnical parameters in comparison with the composites containing mechanically activated filler. By means of X-ray diffraction analysis, it was found that the modification of PTFE with mechanically activated sericite leads to an increase in the degree of crystallinity of PCM, and the use of thermally activated filler is accompanied by a decrease in crystallinity. A correlation between the degree of crystallinity and the average crystallite size of the composites was revealed, depending on the filler content. IR spectroscopy established the occurrence of tribochemical reactions during the frictional contact of the composites with the counterbody, contributing to the formation of a surface layer localizing shear deformations and protecting the material from wear.

Key words: polytetrafluoroethylene, sericite, structure, wear resistance, coefficient of friction.

Acknowledgements. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant numbers [FSRG-2020-0017]).

References

1. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic materials science: current state and prospects // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. V. 87, No. 5. P. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S101933161705001X>.
2. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2018. V. 1, No. 1. P. 3–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2018.05.001>.
3. Okhlopko A.A., Sleptsova S.A., Nikiforova P.G., Struchkova T.S., Okhlopko T.A., Ivanova Z.S. Main Directions for Research on the Development of Tribotechnical Composites Used in the Arctic Regions (Experience of North-Eastern Federal University in Yakutsk) // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. V. 10, No. 6. P. 1441–1447. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2075113319060157>.
4. Jia Z., Yang Y.L., Chen J.J., Yu X.J. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition // Wear. 2010. V. 268, No. 7–8. P. 996–1001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.12.009>.
5. Tan B., Stephens L.S. Evaluation of viscoelastic characteristics of PTFE-Based materials // Tribology International. 2019. V. 140. P. 105870. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105870>.
6. Krick B.A., Pitenis A.A., Harris K.L. et al. Ultralow wear fluoropolymer composites: nanoscale functionality from microscale fillers // Tribology International. 2016. V. 95. P. 245–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.002>.
7. Mashkov Ju.K., Kurguzova O.A., Ruban A.S. Razrabotka i issledovanie iznosostojkih polimernyh nanokompozitov // Vestnik SibADI. 2018. V. 15, No. 1 (59). P. 36–44.
8. Lazareva N.N., Slepova S.A., Kapitonova Ju.V., Ohlopko A.A., Moskvitina L.V. Razrabotka polimernyh kompozitov na osnove politetrafluoretilena i prirodnoj gliny // Perspektivnye materialy. 2017. No. 12. P. 39–50.
9. Sleptsova S.A., Lazareva N.N., Fedoseeva V.I., Kapitonova Y.V., Okhlopko A.A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE // Journal of Friction and Wear. 2018. V. 39, No. 6. P. 469–475. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366618060120>.
10. Sleptsova S.A., Laukkanen S., Gladkina N.P., Fedoseeva V.I., Okhlopko A.A., Grigoryeva L.A. Effect of kaolinite on the properties and structure of PTFE // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018. V. 2053, No. 1. P. 040092. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5084530>.
11. Reddy D.H.K., Lee S.M., Kim J.O. A review on emerging applications of natural sericite and its composites // World Applied Sciences Journal. 2013. V. 27, No. 11. P. 1514–1523. DOI: [10.5829/idosi.wasj.2013.27.11.1745](https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.27.11.1745).
12. Liang Y., Ding H., Sun S., Chen Y. Microstructural Modification and Characterization of Sericite // Materials. 2017. V. 10, No. 10. P. 1182. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10101182>.
13. Liang Y., Yang D., Yang T., Liang N., Ding H. The Stability of Intercalated Sericite by Cetyl Trimethylammonium Ion under Different Conditions and the Preparation of Sericite/Polymer Nanocomposites // Polymers. 2019. V. 11, No. 5. P. 900. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11050900>.
14. de Mayo González-Miranda F., Garzón E., Reca J., Pérez-Villarejo L., Martínez-Martínez S., Sánchez-Soto P. J. Thermal behaviour of sericite clays as precursors of mullite materials // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. V. 132, No. 2. P. 967–977. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7046-9>.
15. Kumar G., Tanvar H., Pratap Y., Dhawan N. Thermal and mechanical activation of sericite for recovery of potash values // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2019. V. 72, No. 1. P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1452-3>.
16. Sleptsova S.A., Okhlopko A.A., Kapitonova I.V., Lazareva N.N., Makarov M.M., Nikiforov L.A. Spectroscopic study of tribooxidation processes in modified PTFE // Journal of Friction and Wear. 2016. V. 37, No. 2. P. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.3103/S106836661602015X>.
17. Liang Y., Jiang W., Ding H., Wang Y. The modification and characterization of thermal-treated sericite by fluoro-silicate // Scientific reports. 2018. V. 8, No. 1. P. 14293. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32496-x>.

18. Martynov M.A., Vylegzhanina K.A. Rentgenografiya polimerov. Metod. posobie dlja promyshlennyh laboratorij. L.: Himija, 1972. 96 p.
19. Fu T., Mo Z., Han P., Qi Y., Wu S., Chen D. Study on factors affecting room temperature transition of polytetrafluoroethylene // Chin. J. Polym. Sci. 1986. V. 4, No. 2. P. 170–179.
20. Brown E.N., Rae P.J., Dattelbaum D.M., Clausen B., Brown D.W. In-situ measurement of crystalline lattice strains in polytetrafluoroethylene // Experimental mechanics. 2008. V. 48, No. 1. P. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9075-3>.
21. Marega C., Marigo A., Causin V., Kapeliouchko V., Di Nicolò E., Sanguineti A. Relationship between the Size of the Latex Beads and the Solid–Solid Phase Transitions in Emulsion Polymerized Poly (tetrafluoroethylene) // Macromolecules. 2004. V. 37, No. 15. P. 5630–5637. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma049238o>.
22. Thanhmingliana, Tiwari D., Lee S.M. Hybrid materials in the remediation of arsenic contaminated waters: a physico-chemical study // Desalination and Water Treatment. 2016. V. 57, No. 5. P. 1995–2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.979241>.
23. Yan S. et al. Thermal, mechanical, and tribological properties of sodium-montmorillonite-nanoparticle-reinforced polyethersulfone and polytetrafluoroethylene ternary composites // Friction. 2020. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0343-x>.
24. Kropotin O.V., Mashkov Ju.K., Egorova V.A., Kurguzova O.A. Vlijanie uglerodnyh modifikatorov na strukturu i iznosostojkost' polimernyh nanokompozitov na osnove politetraforjetilena // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2014. V. 84, No. 5. P. 66.
25. Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W.G., Krick B.A., Blackman G.S., Kasprzak D.J., Junk C.P. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // Macromolecules. 2015. V. 48, No. 11. P. 3739–3745. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b00452>.
26. Onodera T., Kawasaki K., Nakakawaji T., Higuchi Y., Ozawa N., Kurihara K., Kubo M. Effect of tribochemical reaction on transfer-film formation by poly (tetrafluoroethylene) // The Journal of Physical Chemistry C. 2014. V. 118, No. 22. P. 11820–11826. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp503331e>.
27. Bhargava S., Makowiec M.E., Blanchet T.A. Wear reduction mechanisms within highly wear-resistant graphene-and other carbon-filled PTFE nanocomposites // Wear. 2020. V. 444. P. 203163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203163>.

About the authors

VASILEV Andrey Petrovich, leading engineer, Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University (NEFU), 677000, Yakutsk, 58 Belinsky str., Russia, ORCID: 0000-0001-7699-533X, gtvap@mail.ru;

OKHLOPKOVA Aitalina Alekseevna, doctor of technical sciences, professor, chief researcher at the Laboratory of Technologies of Polymer Nanocomposites, Institute of Natural Science of the North-Eastern Federal University (NEFU), 677000, Yakutsk, 58 Belinsky str., Russia, ORCID: 0000-0003-0691-7066, okhlopkova@yandex.ru;

STRUCHKOVA Tatiana Semenovna, candidate of technical sciences, associate professor of the Chemical Department, Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University (NEFU), 677000, Yakutsk, 58 Belinsky str., Russia, ORCID: 0000-0002-6469-1491, sts_23@mail.ru;

ALEKSEEV Aleksey Gavrilievich, senior lecturer at the Chemical Department, Institute of Natural Sciences of the North-Eastern Federal University (NEFU), 677000, Yakutsk, 58 Belinsky str., Russia, alexalekseev.z@gmail.com.

Citation

Vasilev A.P., Okhlopkova A.A., Struchkova T.S., Alexseev A.G. Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 147–156. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-12>

Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена

М.А. Маркова*, П.Н. Петрова, А.Л. Федоров, С.Н. Попов

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

**markovamusya@mail.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследований физико-механических показателей полимерных материалов на основе политетрафторэтилена и его композитов с углеродными волокнами марки УВИС-АК-П, технология получения которых заключается в пластическом деформировании полимерных заготовок путем сжатия, сопровождающемся изменением толщины при постоянстве ширины заготовки. Установлено, что использование данной технологии позволяет не только повысить прочность при растяжении ПТФЭ в 2,7–3,3 раза при коэффициенте сжатия 3–4,3, но и снизить его деформацию ползучести в 22–29 раз по сравнению с исходным полимером. Предлагаемая технология апробирована также на ПТФЭ-композите, содержащем углеродный волокнистый материал марки УВИС-АК-П в количестве 5 мас.%. Показано, что и в этом случае прочность композита повышается в 3 раза, а деформация ползучести снижается в 8,3 раза по сравнению с исходным композитом, который не подвергался пластической деформации. Предлагаемая технология получения фторопластовых композитов позволяет расширить области их применения, и разработанные материалы могут использоваться в различных узлах трения, в особенности для схем нагружения с высокими растягивающими нагрузками.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные волокна, деформация, ползучесть, износостойкость, прочность.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки РФ (Рег. № НИОКР АААА-А17-117040710038-8)

Введение

Материалы на основе политетрафторэтилена имеют ряд преимуществ перед другими полимерами: высокую термическую стойкость, исключительную химическую инертность, низкий коэффициент трения, хорошие электроизоляционные свойства [1]. Изделия из ПТФЭ и композиты на их основе благодаря своим уникальным свойствам получили широкое распространение в конструкциях подвижных и неподвижных уплотнений, работающих в широком диапазоне температур и давлений как жидких, так и газообразных высокоагрессивных сред [2]. Однако применение ПТФЭ и ПТФЭ-композитов ограничено из-за наличия таких недостатков, как относительно низкая прочность и ползучесть (хладотекучесть) и при растягивающих усилиях, и при сжатии, что ограничивает ресурс работы и возможность широкого использования без модифицирования различными наполнителями и методами [3–6].

Существует множество различных способов устранения этих недостатков, преимущественно

путем введения дисперсных и волокнистых армирующих наполнителей. Однако использование армирующих наполнителей не всегда позволяет добиваться необходимого улучшения физико-механических свойств получаемых композитов при повышении их износостойкости [7–13]. В связи с этим до сих пор актуальными остаются исследования, связанные с поиском новых эффективных технологических способов улучшения свойств ПТФЭ и композитов на его основе. Одним из способов получения композитов с высокими прочностными и сниженной ползучестью является твердофазная структурная модификация полимеров, основанных на пластической деформации, в большинстве случаев направленных на создание высокоориентированного состояния [14]. К этим методам относятся одно- или двухосная вытяжка, одноосное сжатие, прокатка, волочение, плоскодеформационное сжатие или прокатка, плунжерная и гидростатическая экструзия и др. Методы твердофазной молекулярной ориентации можно разделить на две группы. В первую входят мето-

ды, основанные на деформировании полимерной заготовки, сопровождающемся ее формоизменением (вытяжкой). Вторую группу составляют процессы, не связанные с изменением формы и размеров и основанные на интенсивной пластической деформации (ИПД), осуществляемой в условиях простого сдвига [15, 16].

Наиболее известны из этих методов равноканальная угловая экструзия (РКУЭ) [17] и ее модифицированный вариант – равноканальная многоугловая экструзия (РКМУЭ) [18]. Особенностью таких методов интенсивной пластической деформации (ИПД) является способность создания различных маршрутов деформации с целью генерации разнообразных форм молекулярной ориентации. Однако использование данных методов для получения ориентированной структуры кристаллизующихся полимеров более сложная в осуществлении и требует проектирования специального инструмента. В связи с этим в данной работе предлагается более упрощенная технология получения материалов на основе ПТФЭ, обладающих сочетанием повышенной прочности при растяжении и сниженной ползучести, путем деформирования полимерной заготовки, сопровождающемся ее формоизменением, основанная на одноосном сжатии уже готовых полимерных заготовок.

Целью данной работы является исследование зависимости физико-механических свойств полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе ПТФЭ и углеродных волокон марки УВИС-АК-П от метода пластической деформации, сопровождающей ее формоизменением.

Объекты и методы исследования

В качестве углеродного наполнителя ПТФЭ использован углеродный волокнистый активированный материал марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозного углеродного волокна производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия).

Образцами служили заготовки из ПТФЭ марки ПН (ГОСТ 10007-80) и композиты, содержащие углеродные волокна марки УВИС-АК-П в количестве 5 мас. %. Полимерные композиты с УВ получены с использованием метода поэтапного введения УВ через концентрат, где массовое соотношение системы концентрат–полимер составляло 50/50, а также с использованием совместной механической активации компонентов при скорости вращения барабанов 400 об./мин в течение 2 минут (рис. 1). На разработанную технологию получен патент РФ № 2675520.

Результаты физико-механических и триботехнических испытаний ПТФЭ и композитов на его основе с УВИС-АК-П, полученные по представленной выше технологии, представлены в табл. 1, где σ_p – предел прочности при растяжении; ε_p – относительное удлинение при разрыве; E – модуль упругости при разрыве; I – скорость массового изнашивания, мг/ч; f – коэффициент трения.

Как видно из табл. 1, ПКМ на основе ПТФЭ и 5 мас.% УВИС-АК-П для испытаний выбран как самый износостойкий материал состава ПТФЭ-УВИС-АК-П при содержании УВ в композите от 1 до 10 мас.%, при этом этот материал характеризуется несколько повышенными деформационно-прочностными характеристиками по сравнению с исходным ПТФЭ. Однако, несмотря

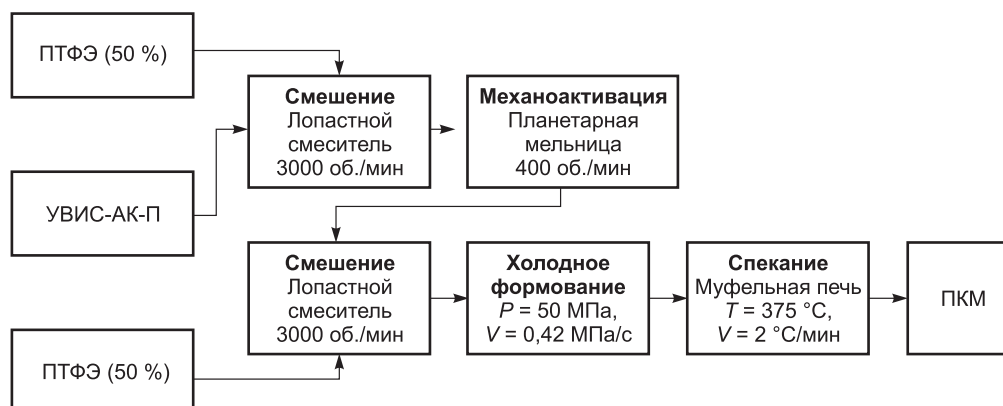


Рис. 1. Технология изготовления образцов ПКМ.

Fig. 1. Manufacturing technology of PCM samples.

Таблица 1

Зависимость физико-механических характеристик ПКМ

Table 1

Dependence of physical and mechanical characteristics of PCM

Состав	σ_p , МПа	ε_p , %	E , МПа	I , мг/ч	f
ПТФЭ	20–21	300–320	450–469	160–162	0,20–0,22
ПТФЭ+3 мас.% УВИС-АК-П	15–16	340–350	500–510	2,00–2,20	0,17–0,19
ПТФЭ+5 мас.% УВИС-АК-П	19–20	345–354	500–514	0,08–0,10	0,23–0,25
ПТФЭ+7 мас.% УВИС-АК-П	12–13	100–105	340–346	3,00–3,10	0,18–0,20
00ПТФЭ+10 мас.% УВИС-АК-П	8–9	30–32	280–285	1,30–1,40	0,18–0,20

на улучшение физико-механических характеристик и повышенную износостойкость полученных композитов до 20–40 раз по сравнению с исходным ПТФЭ, данная технология получения композитов недостаточно обеспечивает повышение устойчивости материала к ползучести, хотя эти материалы характеризуются сниженной ползучестью по сравнению с ненаполненным ПТФЭ в 1,8 раза (см. ниже рис. 4). Повышенная износостойкость у полимерных материалов ценна в подвижных соединениях, но для использования их при повышенных напряжениях сжатия и растяжения необходимо, чтобы композиты обладали повышенными прочностными и вязкоупругими свойствами.

В связи с этим в данной работе проведены исследования влияния технологии пластической деформации готовых полимерных заготовок на их физико-механические показатели. Суть метода пластической деформации заключается в предварительном нагреве до 200–210 °С полимерной за-

готовки при постоянной ширине, сжатием максимум до 1/5 начальной толщины (рис. 2).

Сущность метода и его осуществимость иллюстрируется следующим образом: порошок ПТФЭ марки ПН, представляющий собой белый, рыхлый порошок со степенью кристалличности до спекания 95–98 %, после спекания 50–70 % и плотностью 2,17–2,19 г/см³, $T_{пл}$ 327 °С, сушили в муфельной печи при температуре –180 °С в течение 3 ч. Формование заготовок из ПТФЭ проводили путем прессования в пресс-формах с помощью гидравлического пресса при комнатной температуре при удельном давлении прессования 50 МПа. Выдержка под давлением составляла 2 мин. Спекание образцов проводили в муфельной печи по следующей температурной программе: нагревание от комнатной температуры до 300 °С со скоростью 3 °С/мин с выдержкой 30 мин; нагревание до 380 °С со скоростью 2 °С/мин с выдержкой 90 мин; охлаждение до 200 °С со скоростью 1 °С/мин; свободное охлаж-

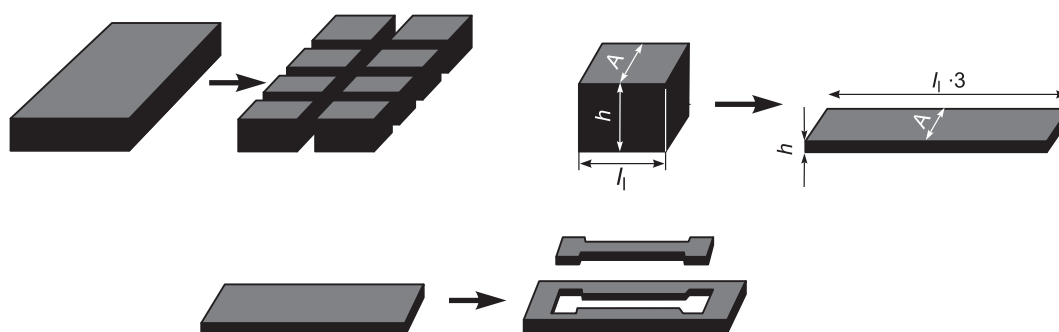


Рис. 2. Этапы метода пластической деформации.

Fig. 2. Stages of the method of plastic deformation.

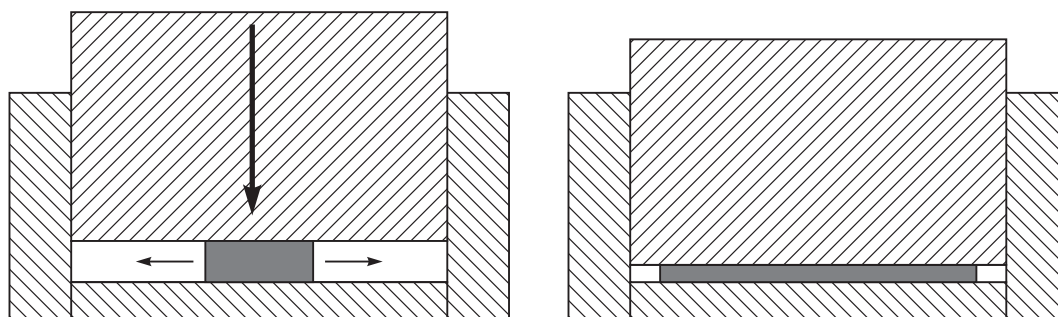


Рис. 3. Схема деформирования полимерной заготовки на основе ПТФЭ.

Fig. 3. Scheme of deformation of a polymer billet based on PTFE.

дение до комнатной температуры без контроля скорости. Из полученных заготовок вырезали бруски размерами $16 \times 10 \times 30$ мм, которые нагревали при температуре $200\text{--}210$ °С в течение 2 ч вместе с формой, предназначенной для получения ориентированных образцов, и прилагали усилие до сжатия заготовки в форме до $1/5$ исходной толщины (рис. 3). После сжатия образец в форме охлаждали до комнатной температуры.

Обоснование выбора температурного диапазона для получения образцов методом сжатия заключается в том, что при температурах ниже 200 °С заготовка из ПТФЭ обладает недостаточной способностью к деформации, и это при попытке его сжатия приводит к разрушению образца. При температурах выше 210 °С заготовка характеризуется повышенной текучестью, из-за чего при сжатии происходит его вытекание через щели между деталями пресс-формы. Таким образом, оптимальный диапазон температуры деформирования полимерной заготовки составляет $200\text{--}210$ °С.

Полученные таким образом образцы подвергались следующим испытаниям: определение физико-механических свойств по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине UTS-20K при комнатной температуре и скорости перемещения подвижных захватов 50 мм/мин, ползучесть определялась по ГОСТ 18197-2014.

Обсуждение результатов

Результаты испытаний представлены в табл. 2, где K – коэффициент сжатия образца; σ_p – прочность при растяжении; ε_p – относительное удлинение при разрыве; E – модуль упругости при растяжении.

Прочность при растяжении повышается в $2,7\text{--}3,3$ раза при коэффициенте сжатия $3\text{--}4,3$ по сравнению с исходным ПТФЭ. Прочность ПКМ повышается в 3 раза по сравнению с исходным

композитом, который не подвергался пластической деформации.

Коэффициент сжатия образца (K) определяется отношением начальной толщины к толщине образца после деформирования: $K = \delta_{\text{нач}} / \delta_{\text{после деформирования}}$. Толщина получаемого образца регулируется (контролируется) по опусканию пуансона до определенной величины. В наполненной системе с армирующими наполнителями очагов напряжения образуется больше по сравнению с ненаполненным полимером, что может повысить вероятность разрушения материала с образованием микротрещин. По этой причине у композитов, содержащих углеродные волокна, коэффициент сжатия равнялся 3 .

На рис. 4 приведены данные по изменению относительного удлинения полимерных материалов под нагрузкой во времени. Установлено, что при использовании метода пластической деформации ползучесть снижается в 12 раз в случае исходного ПТФЭ (см. рис. 4, а) и в $3,6$ раза в случае с композитом, содержащим 5 мас. % УВИС-АК-П (рис. 4, б), по сравнению с материалами, которые не подвергались пластической деформации.

Таким образом, разработанная технология упрочнения ПТФЭ и композитов на его основе является эффективным решением, позволяющим получить материалы с улучшенными прочностными свойствами и сниженной ползучестью при растяжении. Применение данного способа получения высокопрочных полимерных материалов на основе ПТФЭ позволит повысить ресурс работы изделий в технике и оборудовании и расширить их область применения.

Заключение

В результате проведенных исследований показана эффективность использования технологического приема пластической деформации, обес-

Таблица 2

**Прочности и относительное удлинение при разрыве образцов ПТФЭ
в зависимости от коэффициента сжатия**

Table 2

Strength and elongation at break of PTFE samples depending on compression ratio				
Композит	К	σ_p , МПа	ε_p , %	E , МПа
Исходный ПТФЭ	1	20–21	300–320	400–410
ПТФЭ, подвергнутый пластической деформации	1,2	27–28	180–185	560–571
	1,4	29–30	135–137	510–518
	1,5	39–41	150–157	510–520
	1,6	39–40	118–121	480–492
	1,9	42–44	106–110	545–552
	2,3	51–53	72–75	510–518
	2,8	49–50	29–31	450–466
	2,9	59–61	48–50	575–582
	3,0	60–62	55–57	450–462
	4,3	70–72	26–28	–
ПТФЭ+5 мас. % УВИС-АК-П	1	20–21	355–364	500–514
ПТФЭ+5 мас. % УВИС-АК-П, подвергнутый пластической деформации	3,0	60–61	55–57	630–637

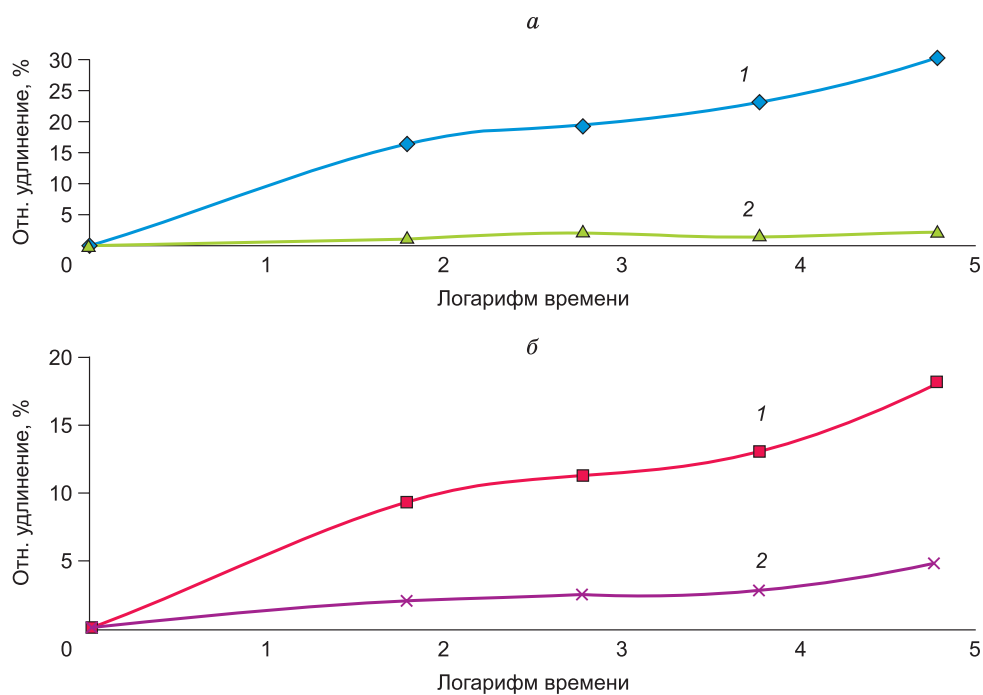


Рис. 4. Кривые зависимости «относительное удлинение – время» без (1) и при напряжении 5 МПа (2) от состава композитов:

а – исходный ПТФЭ; *б* – композит с 5 мас.% УВИС-АК-П.

Fig. 4. “Elongation – time” dependency curves without (1) and at a voltage of 5 MPa (2) on the composition of composites: *a* – initial PTFE; *b* – composite with 5 wt.% CF.

печивающего повышение физико-механических характеристик ПТФЭ и ПКМ. Установлено, что при повышении коэффициента сжатия ПТФЭ повышается прочность при растяжении до 3,4 раза, модуль упругости при растяжении повышается на 41 %, а ползучесть снижается в 12 раз по сравнению с ПТФЭ, полученным стандартным способом. Значительное изменение прочности и ползучести у ПТФЭ связано, на наш взгляд, с тем, что при деформировании полимерных заготовок в них происходит перестройка надмолекулярной структуры с формированием высокоориентированного состояния, что способствует значительному упрочнению полимера. Выявлено, что при деформировании композитов на основе ПТФЭ с 5 мас. % УВИС-АК-П прочность при растяжении повышается до 3 раз, модуль упругости при растяжении повышается на 24 % и ползучесть снижается в 3,6 раза по сравнению с ПКМ, который не подвергался пластической деформации по разработанной технологии.

Таким образом, разработан технологический подход, основанный на применении метода пластической деформации, и способствующий повышению эксплуатационных характеристик полимерных материалов на основе ПТФЭ. Разработанные материалы могут применяться для изготовления различных деталей узлов трения машин и механизмов, в особенности для схем нагружения в узлах трения с высокими растягивающими нагрузками. В дальнейшем планируется продолжить исследование влияние свойства ПКМ в зависимости от способа их получения.

Литература

1. Shasha Feng, Zhaoxiang Zhong, Yong Wang, Weihong Xing, Drioli E. Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation, modification, and applications // *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 549. P. 332–349, doi/10.1016/j.memsci.2017.12.032
2. Bocklenberg L., Winkler K., Mark P., Rybarz S. Low Friction Sliding Planes of Greased PTFE for High Contact Pressures // *Open Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 105–116. DOI: 10.4236/ojce.2016.62010
3. Воронаев В.В. Инновации и ресурсосбережение при производстве высокопрочных износостойких карбоносодержащих композитов на основе фторопластовых матриц // Новые горизонты. Сборник материалов III Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума. Минск: БНТУ, 2016. С. 78–79.
4. Болдырев В.В., Охлопкова А.А., Попов С.Н., Петрова П.Н. и др. Фундаментальные основы механической активности, механосинтеза и механохимических технологий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 343 с.
5. Машиков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2004. 262 с.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // *Int. Polymer Sci. And Technol*. 2011. V. 38, No. 5. P. 25–29.
7. Ле Тху Ми Хуен, Панин С.В., Корниенко Л.А., Алексенко В.О., Иванова Л.Р. Механические и триботехнические свойства композитов на основе полифениленсульфида, армированных различными микро-волокнами // Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения: сборник трудов Международной научно-технической молодежной конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2018. С. 243–245.
8. Marycheva A.N., Guzeva T.A., P'e P.M. et al. Reinforcing Fillers for Polymer Composites Based on Organic Unwoven Materials. *Polym. // Sci. Ser.* 2019. V. D 12. P. 170–173. <https://doi.org/10.1134/S1995421219020138>
9. Al-ghamdi A.M.S., Mark J.E. Zeolites as reinforcing fillers in an elastomer // *Polymer Bulletin*. 1988. V. 20. P. 537–542. <https://doi.org/10.1007/BF00263669>
10. Ly E.B., Lette M.J., Diallo A.K. et al. Effect of Reinforcing Fillers and Fibres Treatment on Morphological and Mechanical Properties of Typha-Phenolic Resin Composites // *Fibers Polym.* 2019. V. 20. P. 1046–1053. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-1087-y>
11. Ovdak O.V., Kalinin Y.E., Kudrin A.M. et al. The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. V. 9. P. 108–113. <https://doi.org/10.1134/S2075113318010215>
12. Sergeev V.P., Chuvashov Y.N., Galushchak O.V. et al. Basalt fibers — A reinforcing filler for composites // *Powder Metall Met. Ceram.* 1995. V. 33. P. 555–557. <https://doi.org/10.1007/BF00559548>
13. Beckford S., Cai J., Fleming R.A. et al. The Effects of Graphite Filler on the Tribological Properties of Polydopamine/PTFE Coatings // *Tribol. Lett.* 2016. V. 64. 42 p. <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5>
14. Возняк Ю.В. Влияние маршрута деформирования на свойства политетрафторэтилена после равноканальной угловой экструзии // *Физика и техника высоких давлений*. 2012. Т. 22, № 2. С. 118–124.
15. Патент РФ № 2527782 Процесс изготовления упрочненных прутковых изделий из аморфно-кристаллических полимеров / Белошенко В.А., Возняк А.В., Возняк Ю.В.
16. Чередниченко В. С. Технология конструкционных материалов: 2-е изд., Перераб. М.: Омега-Л, 2006. 752 с.

17. Белошенко В.А., Бейгельзимер Я.Е., Варюхин В.Н. Твердофазная экструзия полимеров. Киев: Наукова думка, 2008. 207 с.

18. Segal V.M. Equal-Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation // Mater. Sci. Eng. 1999. V. A271. P. 322–333.

Поступила в редакцию 02.04.2020

Принята к публикации 19.05.2020

Об авторах

МАРКОВА Марфа Алексеевна, инженер, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автодорожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, markovamusya@mail.ru;

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автодорожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ppavlina@yandex.ru;

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автодорожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, E-mail: gelvirb@mail.ru

ПОПОВ Савва Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677000, Якутск, Автодорожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-5897-149X>, inm@ysn.ru.

Информация для цитирования

Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Попов С.Н. Разработка высокопрочных полимерных материалов на основе политетрафторэтилена // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 2. С. 157–166. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-2-13

Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene

M.A. Markova *, P.N. Petrova, A.L. Fedorov, S.N. Popov

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

**markovamusya@mail.ru*

Abstract. *The results of studies into the physicomachanical properties of polymeric materials based on polytetrafluoroethylene and its composites with carbon fibres of the UVIS-AK-P brand are presented. The technology of these composites involves the plastic deformation of polymer materials by compression, accompanied by the change of thickness at a constant width of the workpiece. It was found that the use of this technology allows not only to increase the tensile strength of PTFE by a factor of 2.7–3.3 with a compression ratio of 3–4.3, but also to reduce its creep deformation by a factor of 22–29, compared to the original polymer. The proposed technology is also tested on a PTFE composite containing a carbon fiber material of the UVIS-AK-P brand in the amount of 5 mass %. It is shown that in this case, the strength of the composite increases by a factor of 3, and the creep deformation decreases by a factor of 8.3, compared to the original composite, which was not subjected to plastic deformation. The proposed technology for producing fluoroplast composites allows expanding the scope of their application, and the developed materials can be used in various friction points, especially for loading schemes with high tensile loads.*

Key words: polytetrafluoroethylene, carbon fibers, deformation, creep, wear resistance, strength.

Acknowledgements. The work was performed as part of the State Assignment of the Ministry of Science of the Russian Federation (Reg. No. Research and development work AAAA-A17-117040710038-8)

References

1. Shasha Feng, Zhaoxiang Zhong, Yong Wang, Weihong Xing, Drioli E. Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation, modification, and applications // *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 549. P. 332–349. doi/10.1016/j.memsci.2017.12.032
2. Bocklenberg L., Winkler K., Mark P., Rybarz S. Low Friction Sliding Planes of Greased PTFE for High Contact Pressures // *Open Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 6, No. 2. P. 105–116. DOI: 10.4236/ojce.2016.62010
3. Voropaev V.V. Innovacii i resursoberezhenie pri proizvodstve vysokoprochnykh iznosostojkikh karbonosoderzhashchikh kompozitov na osnove fluoroplastovykh matric // *Novye gorizonty. Sbornik materialov III Belorussko-Kitajskogo molodezhnogo innovacionnogo foruma*. Minsk: BNTU, 2016. P. 78–79.
4. Boldyrev V.V., Ohlopkova A.A., Popov S.N., Petrova P.N. i dr. Fundamental'nye osnovy mekhanicheskoy aktivnosti, mekhanosinteza i mekhanohimicheskikh tekhnologij. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2009. 343 p.
5. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Bajbarackaya M.Yu., Mamaev O.A. Polimernye kompozicionnye materialy v tribotekhnike. M.: OOO Nedra-Biznescentr, 2004. 262 p.
6. Sokolova M.D., Davydova M.L., Shadrinov N.V. Processing to increase the structural activity of zeolite in polymer-elastomer composites // *Int. Polymer Sci. And Technol*. 2011. V. 38, No. 5. P. 25–29.
7. Le Thi Mi Hiep, Panin S.V., Kornienko L.A., Alek-senko V.O., Ivanova L.R. Mekhanicheskie i tribotekhnicheskije svoystva kompozitov na osnove polifenilensul'fida, armirovannykh razlichnymi mikrovoloknami // *Perspektivnye materialy konstrukcionnogo i medicinskogo naznacheniya: sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchnotekhnicheskoy molodezhnoj konferencii*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2018. P. 243–245.
8. Marycheva A.N., Guzeva T.A., P'e P.M. et al. Reinforcing Fillers for Polymer Composites Based on Organic Unwoven Materials. *Polym. // Sci. Ser.* 2019. V. D 12. P. 170–173. https://doi.org/10.1134/S1995421219020138
9. Al-ghamdi A.M.S., Mark J.E. Zeolites as reinforcing fillers in an elastomer // *Polymer Bulletin*. 1988. V. 20. P. 537–542. https://doi.org/10.1007/BF00263669
10. Ly E.B., Lette M.J., Diallo A.K. et al. Effect of Reinforcing Fillers and Fibres Treatment on Morphological and Mechanical Properties of Typha-Phenolic Resin Composites // *Fibers Polym.* 2019. V. 20. P. 1046–1053. https://doi.org/10.1007/s12221-019-1087-y
11. Ovdak O.V., Kalinin Y.E., Kudrin A.M. et al. The Influence of Content of Reinforcing Filler on Mechanical Properties of Carbon-Glass Fiber Reinforced Plastics in Matrix T-107. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. V. 9. P. 108–113. https://doi.org/10.1134/S2075113318010215
12. Sergeev V.P., Chuvashov Y.N., Galushchak O.V. et al. Basalt fibers — A reinforcing filler for composites // *Powder Metall Met. Ceram.* 1995. V. 33. P. 555–557. https://doi.org/10.1007/BF00559548
13. Beckford S., Cai J., Fleming R.A. et al. The Effects of Graphite Filler on the Tribological Properties of Polydopamine/PTFE Coatings // *Tribol. Lett.* 2016. V. 64. 42 p. https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5
14. Voznyak Yu.V. Vliyanie marshruta deformirovaniya na svoystva politetraforetilena posle ravnokanal'noj uglovoj ekstruzii // *Fizika i tekhnika vysokikh davlenij*. 2012. V. 22. No. 2. P. 118–124.
15. Patent RF No. 2527782 Process izgotovleniya uprochnennykh prutkovykh izdelij iz amorfno-kristallicheskikh polimerov / Beloshenko V.A., Voznyak A.V., Voznyak Yu.V.
16. Cherednichenko V.S. Tekhnologiya konstrukcionnykh materialov. 2-e izd., pererab. M.: Omega-L, 2006. 752 p.
17. Beloshenko V.A., Beigel'zimer Ya.E., Varyuhin V.N. Tverdogaznaya ekstruziya polimerov. Kiev: Naukova dumka, 2008. 207 p.
18. Segal V.M. Equal-Channel Angular Extrusion: From Macromechanics to Structure Formation // *Mater. Sci. Eng.* 1999. V. A271. P. 322–333.

About the authors

MARKOVA Marfa Alekseevna, engineer, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya str., Yakutsk, 677000, Russia,

http://orcid.org/0000-0002-3000-1560, markovamusya@mail.ru;

PETROVA Pavlina Nikolaevna, candidate of technical sciences, associate professor, leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677000, Russia,

http://orcid.org/0000-0002-1859-8034, ppavlina@yandex.ru;

FEDOROV Andrew Leonidovich, candidate of technical sciences, senior researcher, Institute of Oil and Gas problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya str., Yakutsk, 677000, Russia,

http://orcid.org/0000-0002-1718-2643, E-mail: gelvirb@mail.ru;

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОЧНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

ПОПОВ Savva Nikolaevich, doctor of technical sciences, associate professor, leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk, 677000, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-5897-149X>, inm@ysn.ru.

Citation

Markova M.A., Petrova P.N., Fedorov A.L., Popov S.N. Development of high-strength polymer materials based on polytetrafluoroethylene // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2020. Vol. 25, No. 2. P. 157–166. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-13>

Редактор *Н.А. Ливинц*
Корректурa *И.В. Счастиева*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *А.А. Николашкиной*

Дата выхода в свет 31.07.2020. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,3. Тираж 100 экз. Заказ № 35. 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>