

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2022, Том 27, № 4

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

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

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

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Ю.М. Григорьев, д-р физ.-мат. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<http://nras.asrsya.ru>

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

Подписной индекс в каталоге Почта России – ПР046

Входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ (22.12.2020)

Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС (Я), 2022

© ФИЦ «Якутский научный центр», 2022

© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2022

© Министерство образования и науки РС (Я), 2022

ISSN 2618-9712 (print)

ISSN 2686-9683 (online)

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2022, Vol. 27, No. 4

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

Yu.M. Grigoriev

Dr.Sci. (Phys.-Math.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<http://nras.asrsya.ru>

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2022

© Research Centre “The Yakut Scientific Centre of SB RAS”, 2022

© M.K. Ammosov North-Eastern
Federal University, 2022

© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2022

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Науки о Земле

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

Общая биология

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

Данилова Н.С. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Исаев А.П. – д.б.н., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Кершенгольц Б.М. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Соломонов Н.Г. – чл.-корр. РАН, СВФУ, Якутск, Россия
Хияма Т. – д-р, проф., Ун-т г. Нагоя, Нагоя, Япония
Убугунов Л.Л. – д.б.н., ИОЭБ СО РАН, Улан-Удэ, Россия
Хатано Р. – д-р, проф., Ун-т Хоккайдо, Саппоро, Япония
Шадрина Е.Г. – д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия

Материаловедение

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

Editorial Council:

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

Editorial Board:

Earth Sciences

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

General Biology

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

Materials Science

B.D. Annin – Academician, RAS, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Yu.M. Grigoriev – Dr. Sci. (Phys. and Math.), M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia
Dae-Yong Jeong – Dr., Inha University, Incheon, Republic of Korea
M.L. Kachanov – Dr., Prof., Tufts University, Medford, USA
V.V. Lepov – Dr. Sci. (Eng.), Larionov Inst. of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia
A.A. Okhlopova – Dr. Sci. (Eng.), Prof., M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, Russia
M.H. Salakhov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Prof., Kazan Federal Univ. Kazan, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

<i>Кутыгин Р.В., Киясов А.Н.</i> Стратиграфическое положение аммоноидей рода <i>Paratexiceras</i> Рорow в пермско-триасовых отложениях Южного Верхоянья, Северо-Восток России	475
<i>Опарин Н.А., Олейников О.Б.</i> Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия).....	486
<i>Томишин М.Д., Гоголева С.С.</i> Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов	499
<i>Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Сивцев А.И., Александров А.Р., Глязнецова Ю.С., Лифшиц С.Х.</i> Геохимия органического вещества пород верхнеюрских отложений форланда Индигиро-Зырянского прогиба.....	514

Обогащение полезных ископаемых

<i>Очосов О. Ю., Матвеев А. И.</i> Механизм дополнительной сегрегации минералов по плотности в постели центробежно-вибрационного концентратора	527
--	-----

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

<i>Скрябин П.Н.</i> Инженерно-геокриологические условия Енисейской Арктики	539
--	-----

Общая биология

Экология

<i>Данилова А.А., Петров А.А.</i> Изучение техногенно нарушенных почв Якутии.....	547
<i>Попов А.А.</i> Особенности распределения дендро- и тамнобионтной симфитофауны (Hymenoptera, Symphyta) в среднетаежной подзоне Якутии	561
<i>Легостаева Я.Б., Руфова А.А.</i> Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска	572
<i>Климовский А.И., Колесов С.Д.</i> Новые находки волка (<i>Canis lupus</i> L. 1758) в позднелейстоценовых отложениях Колымо-Индигирской низменности	592
<i>Петрова П.Г., Борисова Н.В.</i> Микроэлементный статус жителей Вилуйского региона	600

Биологические ресурсы

<i>Михайлов В.В., Слепцов И.В., Рожина С.М., Кершенгольц Б.М.</i> Перспективность рационального использования биологически активных веществ из хвои <i>Pinus sylvestris</i> для создания биопрепаратов	610
--	-----

Материаловедение

<i>Васильев А.П., Стручкова Т.С., Лазарева Н.Н., Никитина А.В., Алексеев А.Г.</i> Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена	618
<i>Данилова С.Н., Оконешникова А.В., Охлопкова А.А.</i> Полимерные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: структура и свойства	631

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

- Kutygin R.V., Kilyasov A.N.* Stratigraphic position of the ammonoid *Paramexicoceras* Popov in the Permian-Triassic deposits of the Southern Verkhoyanie, Northeast Russia 475
- Oparin N.A., Oleinikov O.B.* The geology and composition of the Khompu-May field kimberlite pipes (Central Yakutia, Russia)..... 486
- Tomshin M.D., Gogoleva S.S.* High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting 499
- Zueva I.N., Chalaya O.N., Kashirtsev V.A., Sivtsev A.I., Aleksandrov A.R., Glyaznetsova Yu.S., Lifshits S.Kh.* The organic geochemistry of rocks from Upper Jurassic deposits foreland of the Indigiro-Zyryansky trough..... 514

Mineral processing

- Ochosov O.Yu., Matveev A.I.* The mechanism of additional segregation of minerals by density in the bed of the centrifugal-vibrating concentrator..... 527

Engineering geology, permafrost and soil science

- Skryabin P.N.* Engineering and geocryological conditions of the Yenisei Arctic 539

General biology

Ecology

- Danilova A.A., Petrov A.A.* Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia)..... 547
- Popov A.A.* Distribution patterns of dendro- and tamnobiont Symphyta fauna (Hymenoptera, Symphyta) in the middle taiga subzone of Yakutia..... 561
- Legostaeva Y.B., Rufova A.A.* Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk..... 572
- Klimovsky A.I., Kolesov S.D.* New findings of a wolf (*Canis lupus* L. 1758) in the Late Pleistocene sediments of the Kolyma-Indigirka Lowland..... 592
- Petrova P.G., Borisova N.V.* The microelement status of residents of the Vilyui region 600

Biological resources

- Mikhailov V.V., Sleptsov I.V., Rozhina S.M., Kershengolts B.M.* The prospects for the rational use of biologically active substances from *Pinus sylvestris* needles in the creation of bio-preparations..... 610

Materials science

- Vasilev A.P., Struchkova T.S., Lazareva N.N., Nikitina A.V., Alekseev A.G.* Effect of molybdenum disulphide and carbon fibers on the properties and structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene 618
- Danilova S.N., Okoneshnikova A.V., Okhlopko A.A.* Polymer materials based on ultra-high molecular weight polyethylene: structure and properties 631

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-475-485>

Стратиграфическое положение аммоноидей рода *Paramexioceras* Роров в пермско-триасовых отложениях Южного Верхоянья, Северо-Восток России

Р. В. Кутыгин[✉], А. Н. Килясов

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]rkutygin@mail.ru

Аннотация

Широко распространенные на Северо-Востоке России верхнепермские доотоцерасовые отложения содержат богатые комплексы морских беспозвоночных (брахиоподы, двусторки и фораминиферы), но аммоноидеями не охарактеризованы. Единственная находка позднепермских аммоноидей известна лишь в Южном Верхоянье, где в пятидесятых годах прошлого века в аллювиальных или делювиальных отложениях была обнаружена раковина циклолобид, позднее описанная в качестве голотипа типового вида *Paramexioceras aldanense* Роров, 1970. Стратиграфическая привязка у этого гониатита отсутствовала, а за более чем полувековой период поисков повторить находку исследователям не удавалось. Высказывались различные предположения о стратиграфическом положении южноверхоянского парамексикоцераса, а также обсуждалась его синхронность или асинхронность с представителями рода *Paramexioceras*, обнаруженными в чансинском ярусе Восточной Гренландии. Большинство исследователей сходились во мнении, что южноверхоянский *Paramexioceras* происходит из имтачанской свиты, однако новые данные, приведенные в настоящей статье, эти предположения опровергают. В нижней части некучанской свиты бассейна р. Дыбы обнаружено скопление раковин *Paramexioceras aldanense*. Находка приходится на чансинский ярус, что по геологическому возрасту приблизительно соответствует уровню распространения гренландских парамексикоцерасов. Все известные в Аллах-Юньской структурно-фациальной зоне отоцерасы встречены выше пласта с *Paramexioceras*, поэтому вмещающие чансинских циклолобид отложения обособлены в слои с *Paramexioceras aldanense*, которые подстилают зону *Otoceras concavum*. Несмотря на чансинский возраст, инвазия парамексикоцерасов исторически связана с инициальной фазой раннетриасового седиментационного этапа в развитии Верхоянского бассейна. Гониатиты рода *Paramexioceras* и ранние представители цератитов рода *Otoceras*, вероятно, относились к единому теплолюбивому аммоноидному сообществу, проникавшему в Южно-Верхоянскую акваторию в начале некучанского времени.

Ключевые слова: гониатиты, *Paramexioceras*, биостратиграфия, чансинский ярус, отоцерасовые слои, Верхоянье, Якутия

Финансирование. Полевые исследования и палеонтологическое изучение аммоноидей выполнены при поддержке Российского научного фонда и Республики Саха (Якутия) (грант № 22-24-20112), <https://rscf.ru/project/22-24-20112/>, стратиграфическое обоснование проведено при поддержке государственного задания ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Кутыгин Р.В., Килясов А.Н. Стратиграфическое положение аммоноидей рода *Paramexioceras* Роров в пермско-триасовых отложениях Южного Верхоянья, Северо-Восток России. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):475–485. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-475-485>

Stratigraphic position of the ammonoid *Paramexicoceras* Popow in the Permian-Triassic deposits of the Southern Verkhoyanie, Northeast Russia

R. V. Kutygin✉, A. N. Kilyasov

Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉rkutygin@mail.ru

Abstract

Widespread Upper Permian pre-*Otoceras* deposits of northeastern Russia contain rich assemblages of marine invertebrates (brachiopods, bivalves, and foraminifera), but are not characterized by ammonoids. Only single finding of the Late Permian ammonoids is known in the Southern Verkhoyanie. In the fifties of the last century, a cyclolobid shell was found here in alluvial or deluvial deposits, later described as the holotype of the type species *Paramexicoceras aldanense* Popow, 1970. There was no stratigraphic position for this goniatite, and for more than half a century of searching, the researchers failed to find it again. A variety of assumptions have been made about the stratigraphic position of South Verkhoyanian *Paramexicoceras*, and their synchronism or asynchrony with the *Paramexicoceras* found in the Changhsingian deposits of the East Greenland has also been discussed. Most researchers agreed that South Verkhoyanian *Paramexicoceras* comes from the Imtchan Formation, but the new data discussed in this article refute these assumptions. Numerous shells of *Paramexicoceras aldanense* were found in the lower part of the Nekuchan Formation in the Dyby River basin. This finding belongs to the Changhsingian Stage, which approximately corresponds in geological age to the distribution level of the Greenlandic *Paramexicoceras*. All *Otoceras* in the Allakh-Yun structural-facies zone are found above the *Paramexicoceras* level, therefore, the deposits with Changhsingian cyclolobids are separated into *Paramexicoceras aldanense* Beds, which underlie the *Otoceras concavum* Zone. Despite the Changhsingian age, the invasion of *Paramexicoceras* is historically associated with the initial phase of the Early Triassic sedimentation cycle in the Verkhoyanian basin. *Paramexicoceras* (goniatite) and early *Otoceras* (ceratite) probably belonged to a single warm water ammonoid community that came to South Verkhoyanian basin at the beginning of the Nekuchanian time.

Keywords: goniatite, *Paramexicoceras*, biostratigraphy, Changhsingian Stage, *Otoceras* beds, Verkhoyanie, Yakutia
Funding. Field research and paleontological study of ammonoids were supported by the Russian Science Foundation and the Republic of Sakha (Yakutia) (grant number 22-24-20112); the stratigraphic justification was carried out within the State Assignment to the DPMGI SB RAS.

For citation: Kutygin R.V., Kilyasov A.N. Stratigraphic position of the ammonoid *Paramexicoceras* Popow in the Permian-Triassic deposits of the Southern Verkhoyanie, Northeast Russia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):475–485. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-475-485>

Введение

В 1970 г. Ю.Н. Попов опубликовал сводку по верхнепалеозойским аммоноидеям Верхоянья [1], в которой описал цефалопод, собранных геологами-съемщиками в различных районах региона. На фоне преимущественно бореальных аммоноидей выделялся новый род и вид *Paramexicoceras aldanense* Попов, являющийся представителем экзотичного для Северо-Востока Азии семейства Cyclolobidae. Указанное семейство в средне-позднепермское время представляло в основном тетическое сообщество аммоноидей. Если рассматривать бореальные разрезы, то в середине прошлого века единичные и слабо изученные циклобиды были известны лишь в Восточной Гренландии [2, 3]. Несмотря на то что род *Paramexicoceras* был установлен по единственному плохо

сохранившемся экземпляру (рис. 1), этот таксон у исследователей вызвал повышенный интерес. Однако фрагментарность данных по морфологии и отсутствие стратиграфической привязки единственного экземпляра вида и рода не позволяли сделать обоснованных выводов о филогенетическом положении парамексикоцерасов в крупном и достаточно сильно разветвленном семействе Cyclolobidae [4] или даже в надсемействе Cycloloboidea [5]. Но при наличии всей необходимой информации о морфологии таксона отсутствие или ошибочность его стратиграфического обоснования может привести к искаженным представлениям о приуроченности таксона к конкретному этапу развития сообщества, что наглядно было показано В.Е. Руженцевым, обосновавшим хронологический принцип фи-

логении и систематики [6]. В частности, из-за неправильной привязки голотипа *Somoholites andrianovi* Kutygin с хребта Орулган ранее был ошибочно представлен морфогенез каменноугольно-пермских сомоголитид, и только после уточнения стратиграфического обоснования были разрешены филогенетические и биогеографические вопросы, касающиеся этой группы гониатитов [7]. Выяснение стратиграфической принадлежности рода *Paramexicoceras* в Южном Верхоянье оказалось еще более сложным, однако сделанная в этом году первая находка *P. aldanense* в коренных отложениях позволила решить этот непростой вопрос.

История вопроса

Как изложено выше, род *Paramexicoceras* установлен по единственному частично сохранившемуся экземпляру (см. рис. 1), ставшему голотипом типового вида *Paramexicoceras aldanense* Popow, 1970. По информации Ю.Н. Попова [1], парамексикоцерас обнаружен М.Г. Зиновьевым в 1954 г. в аллювии на р. Восточная Хандыга Южного Верхоянья. Дополнительная стратигра-

фическая информация не приводилась, а принадлежность голотипа к верхней перми основывалась на имеющихся тогда представлениях о позднепермском возрасте всего семейства *Cyclolobidae* [8]. По мнению Ю.Н. Попова, *Paramexicoceras* обладает такой же лопастной линией, что и *Mexicoceras* из верхней части перми Техаса (рис. 2), но резко отличается наличием вентрального синуса в поперечной скульптуре.

Валидность рода *Paramexicoceras* оспаривалась В.Е. Руженцевым и М.Ф. Богословской [9], которые считали его младшим синонимом рода *Mexicoceras*, следовательно, возраст обсуждаемого гониатита принимался как вордско-кепитенский (средняя пермь) – по интервалу распространения типичных мексикоцерасов. Вопреки этому, В.Н. Андрианов рассматривал *Paramexicoceras* в качестве полноценного рода, являющегося самым молодым представителем пермских аммоноидей Северо-Востока Азии [10]. Исследователь привел более четкую информацию о местонахождении голотипа: «Бассейн р. Вост. Хандыги, речка Имтачан в среднем течении. Гониатит найден в аллювии в районе развития

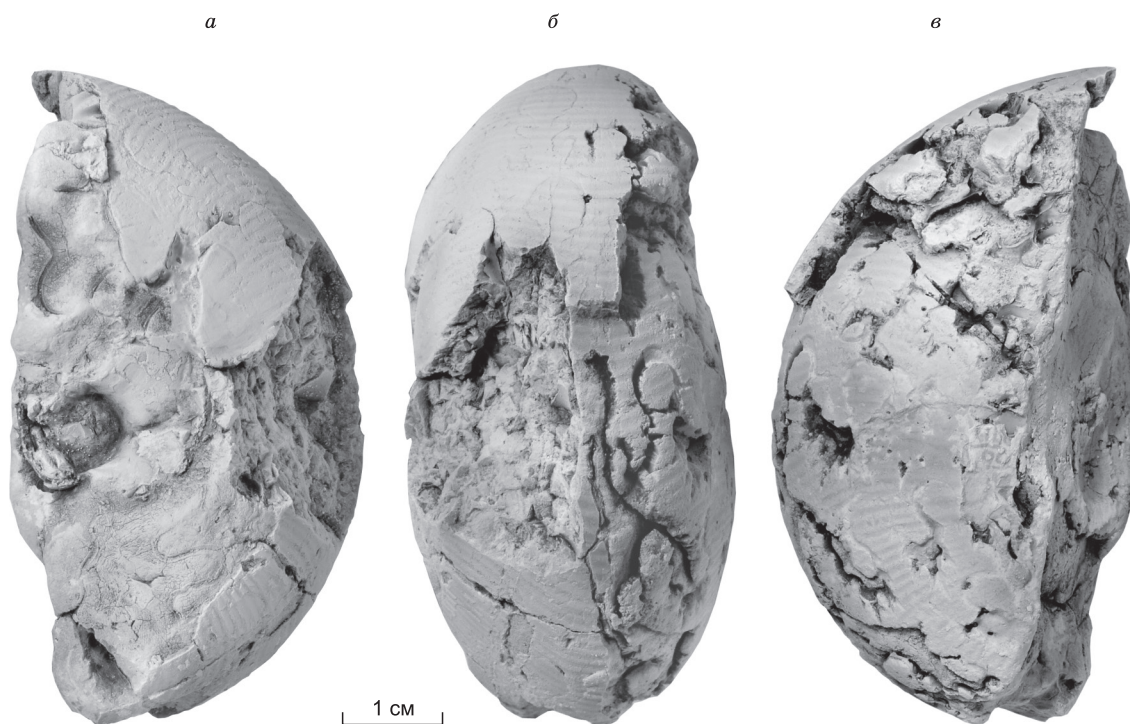


Рис. 1. Голотип *Paramexicoceras aldanense* Popow (×1,4). ЦНИГР музей, № 8717/56, сбоку (а, в) и с вентральной стороны (б); Южное Верхоянье, р. Имтачан, аллювий или делювий.

Fig. 1. Holotype of *Paramexicoceras aldanense* Popow (×1.4). TsNIGR Museum 8717/56, lateral (a, в) and ventral (б) views; Southern Verkhoyanie, Imtachan River, alluvium or deluvium.

пограничных слоев имтачанской и чамбинской свит» [10, с. 59–60]. В.Н. Андрианов предполагал, что между уровнем распространения *P. aldanense* и первыми отоцерасами, относимыми тогда к индскому ярусу, в Южном Верхоянье имеется огромный (до 900 м) интервал разреза, аммоноидной фауной не охарактеризованный. В первой половине семидесятых годов В.Н. Андрианов проводил целенаправленные поиски парамексикоцерасов в верхней перми Южного Верхоянья, но они успехом не увенчались. Возраст парамексикоцераса В.Н. Андриановым принимался «казанским», что в морских разрезах Верхоянья соответствовало вордско-кепитенскому интервалу.

Несколько другое стратиграфическое происхождение обсуждаемого голотипа приводилось Б.С. Абрамовым: «выше из аммоноидей известен род *Paramexioceras* со спорной стратиграфической привязкой – верхи верхней перми или зона *Otoceras* нижнего триаса» [11, с. 82]. Масштабными сборами аммоноидной фауны, сделанными в разные годы Ю.Д. Захаровым, А.С. Дагисом, С.П. Ермаковой, А.Г. Константиновым и др., наличие парамексикоцерасов в отоцерасовых слоях не подтвердилось. Однако, зная теперь стратиграфическое положение верхоянского парамексикоцераса, следует отметить, что именно указанная Б.С. Абрамовым привязка оказалась наиболее близкой к действительной.

С выходом в свет обзорной работы В.В. Насичука [12], посвященной пермским аммоноидеям арктических регионов, род *Paramexioceras* приобрел большое корреляционное значение, поскольку его представители были выявлены в терминальной части перми Восточной Гренландии. По мнению В.В. Насичука, во всей обширной Циркумарктической области существуют лишь два района, в которых известны наиболее поздние пермские аммоноидеи – центральная часть Восточной Гренландии и Южное Верхоянье. При этом единственным общим элементом позднепермских аммоноидных сообществ Верхоянья и Гренландии являлся род *Paramexioceras*. Поскольку в Гренландии представители рода *Paramexioceras* были встречены в верхнепермских осадках, В.В. Насичук [12] подверг сомнению предположение В.Н. Андрианова о «казанском» возрасте южноверхоянского парамексикоцераса, считая его более молодым – джульфинским, что соответствует вучапину позд-

ней перми. Относительно недавно восточно-гренландские парамексикоцерасы были отнесены исследователями [13] к биостратиграфическому подразделению *Paramexioceras/Changhsingoceras* чансинского яруса (терминальная пермь), что максимально омолодило возраст обсуждаемого рода.

Мнение В.Е. Руженцева и М.Ф. Богословской [9] о принадлежности парамексикоцерасов к роду *Mexioceras* [8, 14] ранее поддерживал один из авторов настоящей статьи [15, 16 и др.], но при этом возраст южноверхоянского «мексикоцераса» предполагался татарский (позднепермский) [17], т. е. моложе мексикоцерасов те-хасских.

Предположение В.Н. Андрианова [10] о том, что находка верхоянского парамексикоцераса происходит из нижней части имтачанской свиты, не лишена определенной логики, поскольку этот уровень приходится на обширную в Верхоянском бассейне раннехальпирскую трансгрессию, с которой связано широкое распространение сообществ беспозвоночных [18]. В хальпирском горизонте Южного Верхоянья наиболее мористые отложения расположены в низах имтачанской свиты, где предшественниками и нами был собран богатый комплекс брахиопод, однако поиски аммоноидей не увенчались успехом. Позднее мы с А.С. Бяковым [19] предположили, что парамексикоцерасы могли проникнуть в Верхоянский бассейн в середине имтачанского времени, когда на фоне незначительной трансгрессии здесь появились двустворки биполярного вида *Atomodesma variable* Wanner.

После просмотра голотипа, а также рукописных заметок и этикеток, хранящихся в Центральном научно-исследовательском геологоразведочном музее им. академика Ф.Н. Чернышева (ЦНИГР музей, Санкт-Петербург), стратиграфическая привязка не прояснилась, и даже возникли новые вопросы. Согласно двум коллекционным этикеткам, годом находки голотипа был не 1954, как указывалось Ю.Н. Поповым [1] и В.Н. Андриановым [10], а 1958, что расширило и усложнило поиски полевой документации Аллах-Юньской экспедиции. Вместе с голотипом в музее хранится рукописная записка С.В. Домохотова, направленная Ю.Н. Попову: «Юрий Николаевич! № 227 тот самый *Megaphyllites*, о котором я Вам писал. Это не пермский аммонит, т. к. (не смотря на то что он взят в делювии) место поло-

жения его ясно». Дата 14 ноября, год не указан. Действительно, первые наружные лопасти поздне-триасовых мегафилитов несколько напоминают таковые у парамексиоцерасов (см. рис. 2), однако, форма вентральной лопасти и число наружных лопастей совершенно другие [20]. Более того, *Megaphyllites* – это мелкорослый род с иной формой раковины и характером скульптуры, что в совокупности с лопастной линией исключает принадлежность южноверхоянского экземпляра к этому роду. Интересно, что в записке говорится о делювиальном, а не аллювиальном происхо-

ждении образца, что должно упростить выяснение стратиграфического положения парамексиоцераса в случае установления его точной географической привязки. Также стоит заметить, что в письме С.В. Домохотова содержалась подсказка, на которую раньше внимания не обращалось. В записке подразумевается, что парамексиоцерас происходит из триасовых, а не пермских отложений, а в басс. р. Имтачан триасовые отложения представлены одной только некучанской свитой, поэтому поиски следовало посвятить именно ей.

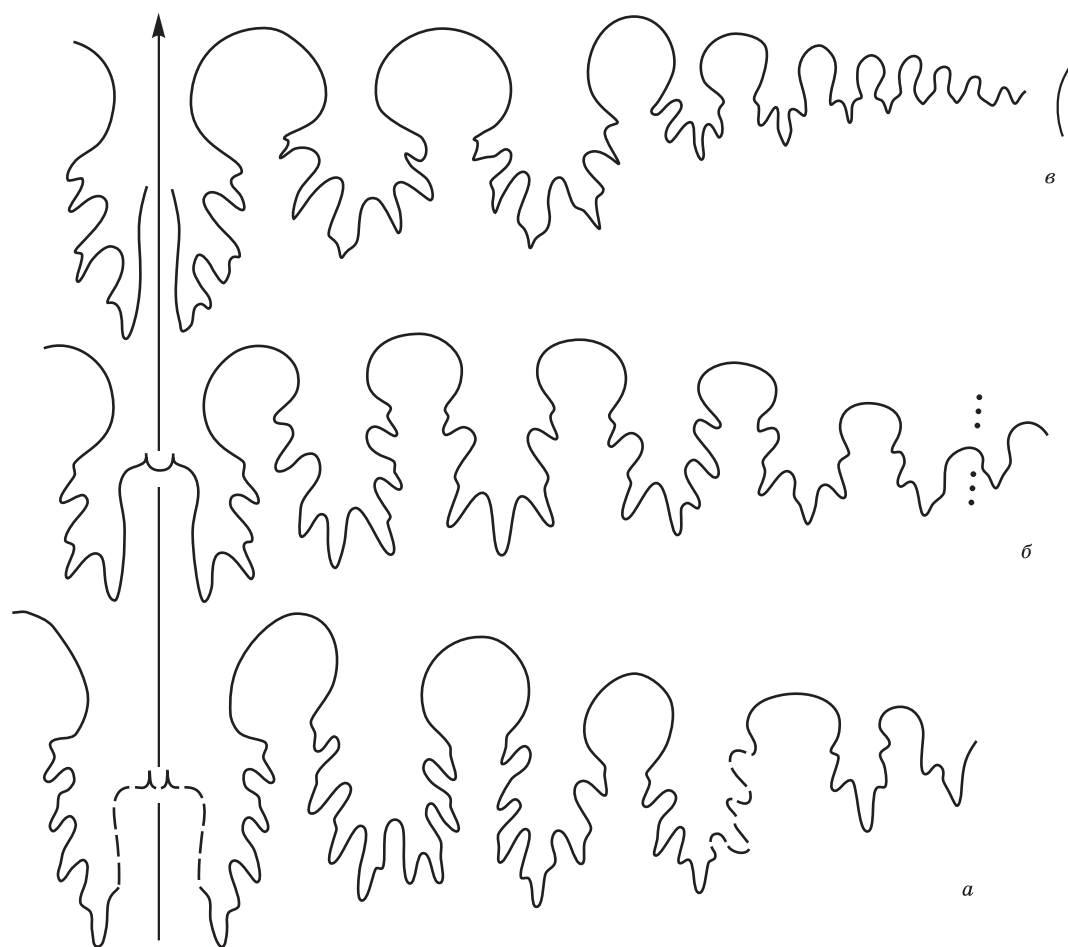


Рис. 2. Лопастные линии аммоноидей.

а – *Paramexioceras aldanense* Popow, ЦНИГР музей, голотип № 8717/56 при D~60 мм; Южное Верхоянье, р. Имтачан, по Furnish et al., 2009, fig. 94(3a) [4]; *б* – *Mexioceras guadalupense* (Girty), USGS, голотип № 1187 при D~22 мм, по Miller and Furnish, 1940, fig. 50B [14]; Техас, формация Delaware Mountain, вордский ярус средней перми; *в* – *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics) при W = 6,1 мм, H = 6,5 мм, по Дагису и др., 1996, рис. 136 [20], о. Котельный, норий верхнего триаса.

Fig. 2. Sutures of ammonoids.

а – *Paramexioceras aldanense* Popow, TsNIGR Museum, holotype 8717/56, at D~60 mm; Southern Verkhoyanie, Imtachan river, alluvium or deluvium; adapted from Furnish et al., 2009, fig. 94(3a) [4]; *б* – *Mexioceras guadalupense* (Girty), USGS, holotype 1187, at D~22 mm, adapted from Miller and Furnish, 1940, fig. 50B [14]; Texas, Delaware Mountain Formation, Wordian Stage of the Middle Permian; *в* – *Megaphyllites insectus* (Mojsisovics) at W = 6.1 mm, H = 6.5 mm, adapted from Dagys et al., 1996, fig. 136 [20], Kotelny Island, Norian Stage of the Upper Triassic.

Результаты исследования и обсуждения

Летом 2022 г. мы послойно изучили ряд ключевых разрезов пограничных пермско-триасовых отложений в Южном Верхоянье. Основное внимание было уделено многочисленным обнажениям нижнекемчужанской подсвиты, расположенным в верховьях р. Восточная Хандыга (преимущественно в басс. р. Сеторым), где удалось собрать новые богатые коллекции аммоноидей родов *Otoceras* и *Tomphoceras*. Накануне полевых работ по космоснимкам нами также была намечена перспективная для изучения площадь распространения нижнекемчужанской подсвиты в верховьях руч. Палаткачан, правого притока р. Дыбы (рис. 3). На руч. Крайний, левом притоке руч. Палаткачан, был обнаружен хорошо обнаженный и тектонически слабонарушенный разрез (рис. 4), ранее неизвестный. Его литолого-стратиграфическое строение оказалось близким к разрезам нижнекемчужанской подсвиты басс. р. Сеторым [21, 22], что позволило здесь использовать деление на пачки, аналогичное сеторымским. В верхней половине пачки 3, являющейся нижней аргиллитовой толщей кемчужанской свиты, были собраны многочисленные аммоноидеи вида *Otoceras boreale* Spath, характеризующие одноименную биостратиграфическую зону [23].

В 1,5 м выше подошвы пачки 3 обнаружена среднеразмерная раковина *Otoceras concavum* Tozer, свидетельствующая о присутствии здесь зоны *concavum*, являющейся самым нижним биостратиграфическим подразделением отоцерасовых слоев, относимым к чансинскому ярусу [24, 25]. Ранее представители вида *O. concavum* в Аллах-Юньской подзоне были известны только в верховьях р. Восточная Хандыга (преимущественно р. Сеторым), поэтому его находка в басс. р. Дыбы, вероятно, является первой из зафиксированных здесь.

Как и во всех ранее изученных разрезах басс. р. Сеторым, здесь, на руч. Крайний басс. р. Дыбы в низах пачки 3 развит выдержанный горизонт огромных караваеобразных глинисто-кремнистых конкреций (пласт 3В). Но если в сеторымских разрезах конкреции залегают на уровне 20–50 см выше подошвы пачки 3, то на руч. Крайний – в интервале 1–1,3 м. Следовательно, в правобережье р. Дыбы ниже конкреций наблюдается метровый пласт аргиллитов (3А), который в четырех–пятикратном размере превышает мощность

аналогичного пласта на р. Сеторым. В нижней части пласта 3А (на уровне 20 см выше подошвы пачки 3) обнаружено скопление крупных раковин аммоноидей с гладкими и слаборебристыми (рис. 5) жилыми камерами. Сохранность аммоноидей оставляет желать лучшего, все обнаруженные раковины оказались деформированы, а фрагмоконы по большей части выщелочены или серьезно смяты. Сохранившиеся обломки фрагмоконов (рис. 6) и их отпечатки на дорсальной стороне жилых камер обладают хорошо развитой поперечной скульптурой – многочисленными ребрами, которые на вентральной стороне образуют глубокий синус, такой же, как у парамексикоцераса из басс. р. Имтачан (см. рис. 1). Конфигурация сохранившихся элементов лопастной линии также очень близка к таковой вида *Paramexioceras aldanense* Porow, с которым мы и ассоциируем всех аммоноидей, найденных в основании пачки 3 разреза по руч. Крайний.

Находка *Paramexioceras aldanense* в чансинском ярусе басс. р. Дыбы кардинальным образом изменяет представления о возрасте и стратиграфическом положении этого вида, а также проливает свет на решение вопроса о расселении аммоноидных сообществ в период глобального позднепермского вымирания биот. Если ранее В.Н. Андриановым предполагалось наличие мощной (до 900 м) терригенной толщи между уровнем *Paramexioceras* и первыми отоцерасами, то теперь мы выяснили, что осадки, содержащие парамексикоцерасов, непосредственно перекрываются отоцерасовыми слоями, а теоретически даже могут относиться к последним. Поскольку первые отоцерасы встречены выше горизонта крупных конкреций, два самых нижних пласта пачки 3 (3А и 3В) нами предлагается относить к **слоям с *Paramexioceras aldanense***, которые подстилают зону *Otoceras concavum*. Соглашаясь с мнением А.С. Бякова [26], что маломощная пачка 2, отражающая начало кемчужанской трансгрессии, седиментологически ближе к пачке 3 кемчужанской свиты, чем к пачке 1 имтачанской свиты, мы условно к слоям с *Paramexioceras aldanense* относим и пачку 2. Касательно биогеографического и седиментологического аспектов, инвазия парамексикоцерасов, несмотря на то что она происходила в чансинском веке поздней перми, исторически связана не с пермским седиментогенезом, а с началом триасового, когда началось формирование осадков кемчужанского гори-

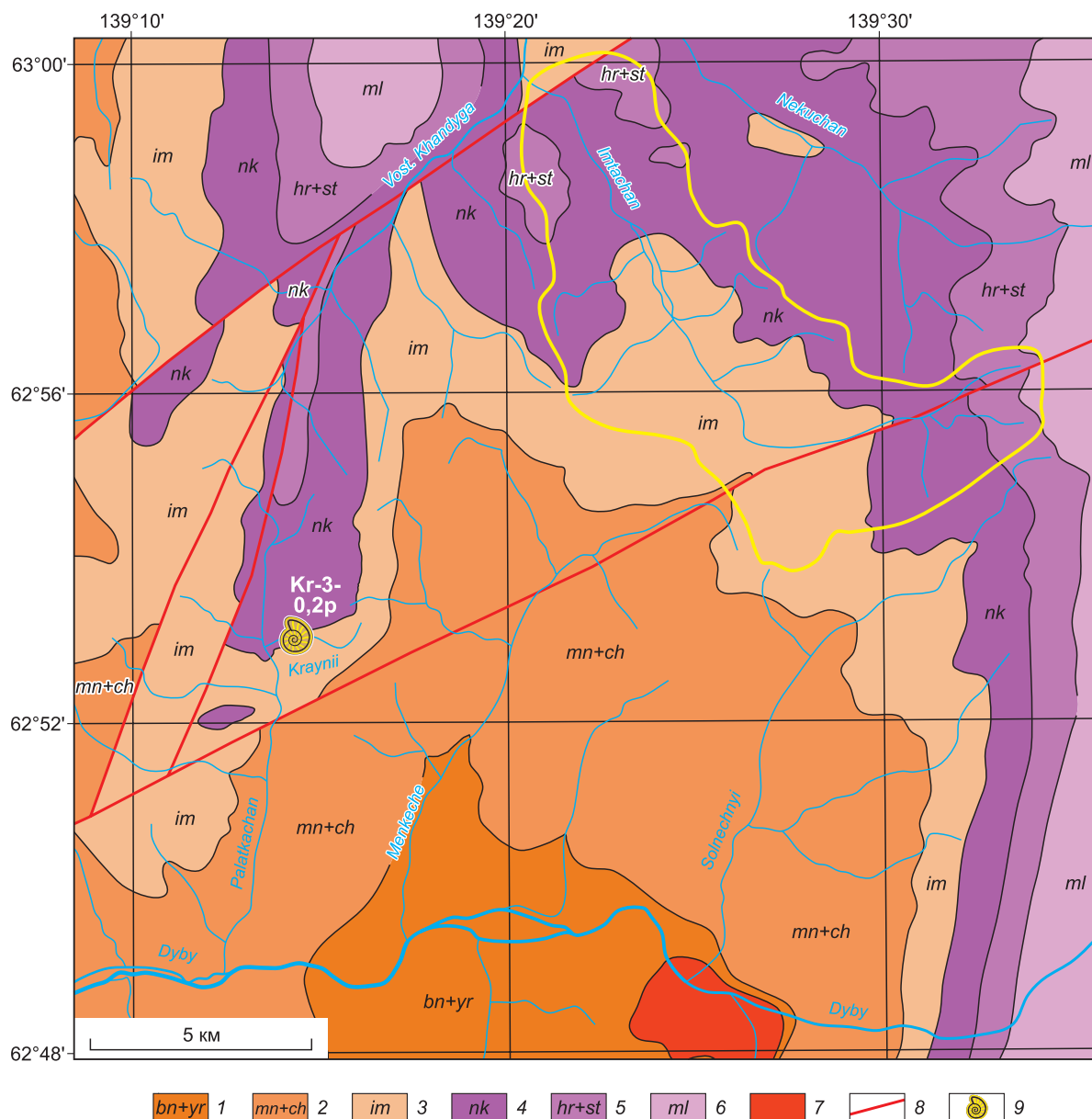


Рис. 3. Местонахождение аммоноидей *Paramexicoceras aldanense* Popow на геологической схеме междуречья Восточной Хандыги и Дыбы.

1 – бонсалчанская и ырчакская свиты (нижняя–средняя пермь), 2 – менкеченская и чамбинская свиты (средняя пермь), 3 – имтачанская свита (верхняя пермь), 4 – некучанская свита (верхняя пермь – нижний триас), 5 – сеторымская и харчанская свиты (нижний триас), 6 – малтанская свита (средний триас), 7 – Дыбинский интрузивный массив, 8 – разломы, 9 – местонахождение аммоноидей (обр. Kr-3-0,2p); желтой линией показаны границы бассейна р. Имтачан, откуда происходит находка голотипа *P. aldanense*.

Fig. 3. Location of the ammonoid *Paramexicoceras aldanense* Popow on the geological scheme of the interfluve of the Vostochnaya Khandyga and Dyby rivers.

1 – Bonsalchan and Yrchakh Fms. (Lower–Middle Permian), 2 – Menkeche and Chamba Fm. (Middle Permian), 3 – Imtanchan Fm. (Upper Permian), 4 – Nekuchan Fm. (Upper Permian – Lower Triassic), 5 – Setorym and Kharchan Fms. (Lower Triassic), 6 – Maltan Fm. (Middle Triassic), 7 – Dyby intrusive massif, 8 – faults, 9 – ammonoid locality (sample Kr-3-0,2p); the yellow line shows the boundaries of the Imtanchan river basin, where the holotype *P. aldanense* was found.

зонта [27]. Полученные данные свидетельствуют о том, что парамексикоцерасы и отоцерасы являются элементами единого теплолюбивого аммо-

ноидного сообщества, проникавшего в Южно-Верхоянскую акваторию в начале некучанского времени (в чансинском веке). Это подтверждает

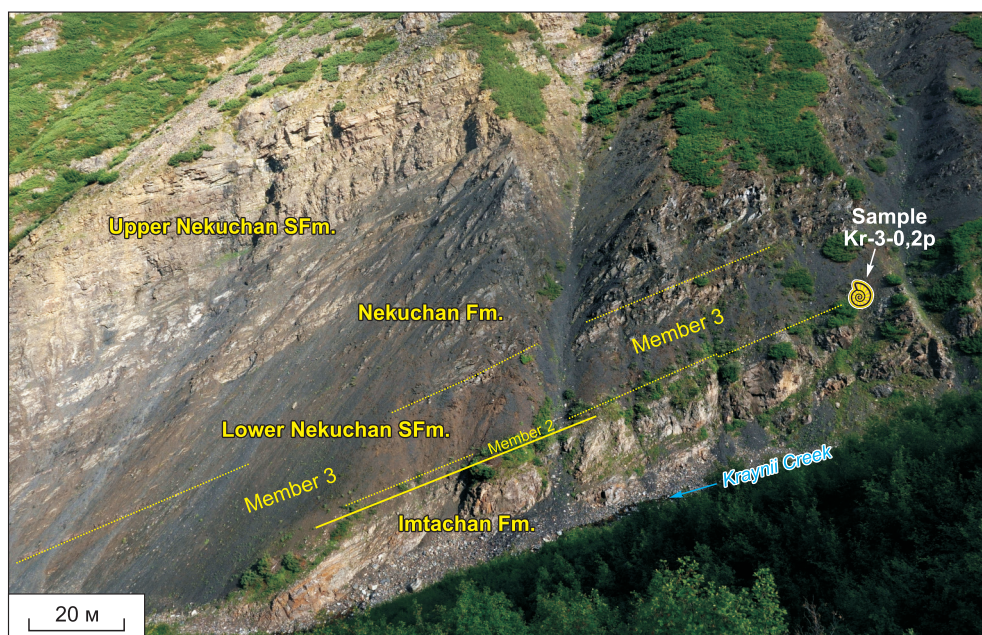


Рис. 4. Разрез пограничных пермско-триасовых отложений на руч. Крайний и место находки в нем аммоноидей *Paramexicoceras aldanense* Popow (обр. Kr-3-0,2p, координаты N62°53'06.67" E139°14'39.21").

Рис. 4. Section of the boundary Permian-Triassic deposits on the Kraynii Creek and the *Paramexicoceras aldanense* Popow occurrence (sample Kr-3-0,2p, coordinates N62°53'06.67" E139°14'39.21").

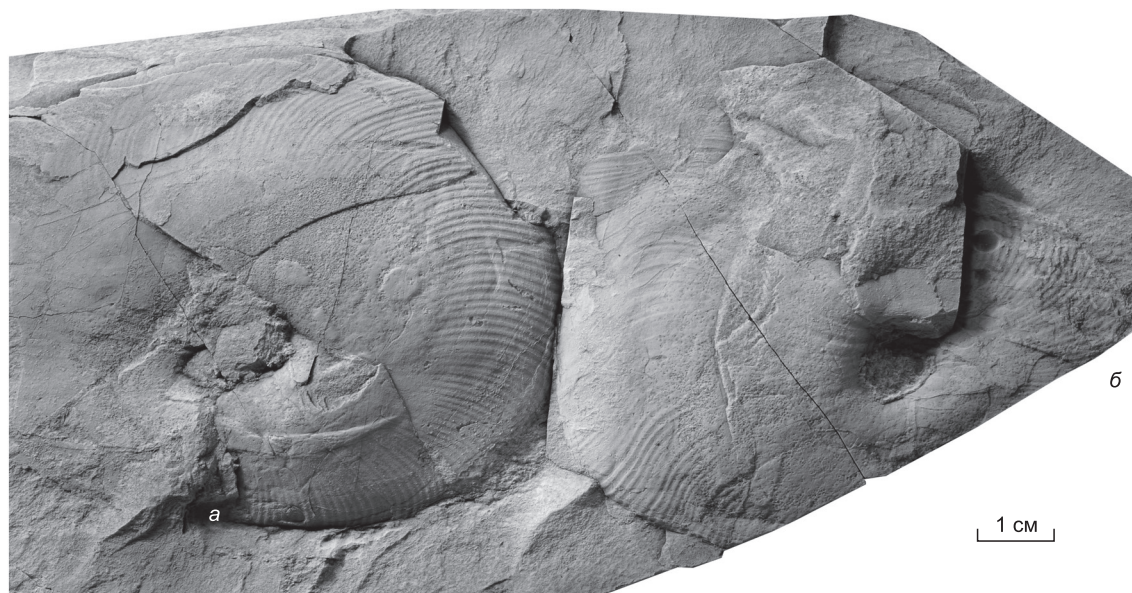


Рис. 5. Плитка аргиллита с двумя жилыми камерами *Paramexicoceras aldanense* Popow ($\times 1,0$).
 а – ИГАБМ, экз. № 234/501-1, б – ИГАБМ, экз. № 234/501-2; сбоку; Южное Верхоянье, басс. р. Дыбы, руч. Крайний (левый приток руч. Палаткачан); верхняя пермь, чансинский ярус, слои с *Paramexicoceras aldanense*, основание некучанской свиты; сборы Р.В. Кутыгина и А.Н. Килясова, обр. Kr-3-0,2p.

Fig. 5. Claystone tile with two living chambers *Paramexicoceras aldanense* Popow ($\times 1.0$).
 а – DPMGI no. 234/501-1, б – DPMGI no. 234/501-2; lateral view; Southern Verkhoyanie, Dyby river basin, Kraynii Creek (left tributary of the Palatkachan Creek); Upper Permian, Changhsingian Stage, *Paramexicoceras aldanense* Beds, base of the Nekuchan Formation; coll. R.V. Kutugin and A.N. Kilyasov, sample Kr-3-0,2p.

высказывавшееся ранее предположение, что Верхояно-Омолонское сообщество пермских аммоноидей полностью прекратило свое существование в конце роудского века [28], после которого на протяжении трех геологических веков (до чансина) в восточносибирских акваториях аммоноидеи не обитали.

Заключение

В основании некучанской свиты Южного Верхояня обнаружены циклолобиды вида *Paramexicoceras aldanense* Popow, возраст и стратиграфическая принадлежность которого на протяжении более полувека не были известны. Эта находка позволила относить указанных циклолобид к чансинскому ярусу, а вмещающие отложения обособить в слои с *Paramexicoceras aldanense*, подстилающие зону *Otoceras concavum*. Ранее предполагалось, что уровень парамексикоцерасов приходится на имтачанскую свиту, поэтому проникновение теплолюбивых циклолобид в Южно-Верхоянскую зону связывалось с одним из трансгрессивных периодов хальпирского времени поздней перми. Однако новые данные свидетельствуют о том, что, несмотря на чансинский возраст, инвазия парамексикоцерасов исторически была связана с инициальной фазой раннетриасового этапа седиментологического развития Верхоянского бассейна. Гониятиты рода *Paramexicoceras* и ранние представители цератитов рода *Otoceras*, вероятно, являлись частью единого теплолюбивого аммоноидного сообщества, проникавшего в Южно-Верхоянскую акваторию в начале некучанского времени (терминальная пермь).

Список литературы / References

1. Попов Ю.Н. Аммоноидеи. Стратиграфия каменноугольных и пермских отложений Северного Верхояня. Л.: Недра; 1970:113–140.
[Popov Yu.N. Ammonoids. Stratigraphy of Carboniferous and Permian deposits of the Northern Verkhoyansk region. Leningrad: Nedra; 1970:113–140. (In Russ.)]
2. Nassichuk W.W., Furnish W.M., Glenister B.F. The Permian ammonoids of Arctic Canada. *Geological Survey of Canada*. 1965;131:1–56.
3. Furnish W.M. Ammonoids of the Upper Permian Cyclolobus-Zone. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie*. 1966;125:265–296.
4. Furnish W.M., Glenister B.F., Kullmann J., Zhou Z. *Treatise on Invertebrate Paleontology. Part L. Mollusca 4. Revised. Volume 2: Carboniferous and Permian Ammonoidea (Goniatitida and Prolecanitida)*. Lawrence, Kansas; 2009. 258 p.

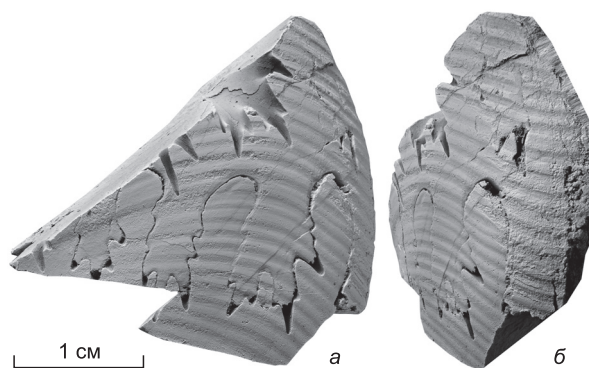


Рис. 6. Обломок фрагмокона *Paramexicoceras aldanense* Popow ($\times 1,7$) с сохранившимися перегородками (ИГАБМ, экз. № 234/501-3).

a – сбоку, *b* – с вентролатеральной стороны; местонахождение и полевой номер образца те же, что рис. 5.

Fig. 6. Fragmentary phragmocone of *Paramexicoceras aldanense* Popow ($\times 1,7$) with preserved septa (DPMGI 234/501-3). *a* – lateral view, *b* – ventrolateral view; the location and field number of the sample are the same as in Fig. 5.

5. Leonova T.B. Revision of the Permian Ammonoid Family Cyclolobidae. *Paleontological Journal*. 2010;44(3): 267–274. <https://doi.org/10.1134/S0031030110030044>

6. Руженцев В.Е. Принципы систематики, система и филогения палеозойских аммоноидей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 331 с.

[Ruzhencev V.E. *Principles of Systematics, System, and Phylogeny of Paleozoic Ammonoids*. Moscow: Izd. AN SSSR; 1960. 331 p. (In Russ.)]

7. Кутыгин Р.В. О стратиграфической принадлежности позднепалеозойского вида *Somoholites andrianovi* Kutygin, 1999 (Ammonoidea, Goniatitida). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):46–55. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-46-55>

[Kutygin R.V. On the stratigraphic relationship of the Late Paleozoic species *Somoholites andrianovi* Kutygin, 1999 (Ammonoidea, Goniatitida). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1):46–55 (In Russ.)]

8. Руженцев В.Е. О семействе Cyclolobidae Zittel. *Доклады АН СССР*. 1955;103(4):701–703.

[Ruzhencev V.E. On the Family Cyclolobidae. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1955;103(4):701–703. (In Russ.)]

9. Руженцев В.Е., Богословская М.Ф. Намюрский этап в эволюции аммоноидей. *Поздненамюрские аммоноидеи*. М.: Наука; 1978. 338 с.

[Ruzhencev V.E., Bogoslovskaya M.F. *Namurian stage in the evolution of ammonoids. Late Namurian ammonoids*. Moscow: Nauka; 1978. 338 p. (In Russ.)]

10. Андрианов В.Н. Пермские и некоторые каменноугольные аммоноидеи Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука; 1985. 180 с.

[Andrianov V.N. *Permian and some Carboniferous Ammonoids of Northeastern Asia*. Novosibirsk: Nauka; 1985. 180 p. (In Russ.)]

11. Абрамов Б.С., Григорьева А.Д. *Биостратиграфия и брахиоподы перми Верхоянья*. М.: Наука; 1988. 204 с.
[Abramov B.S., Grigorjeva, A.D., *Biostratigraphy and brachiopods of the Permian in the Verkhoyanie*. Moscow: Nauka; 1988. 204 p. (In Russ.)]
12. Nassichuk W.W. Permian Ammonoids in the Arctic Regions of the World. *The Permian of Northern Pangaea. Vol. 1: Paleogeography, Paleoclimates, Stratigraphy*. Berlin: Springer; 1995:210–235.
13. Bjerager M., Seidler L., Stemmerik L., Surlyk F. Ammonoid stratigraphy and sedimentary evolution across the Permian-Triassic boundary in East Greenland. *Geol. Magasine*. 2006;143(5):635–656. <https://doi.org/10.1017/S0016756806002020>
14. Miller A.K., Furnish W.M. Permian ammonoids of the Guadalupe Mountain region and adjacent areas. *Geol. Soc. America, Spec. Paper*. 1940;26:1–242.
15. Kutygin R.V. Shell Shapes of Permian Ammonoids from Northeastern Russia. *Paleontological Journal*. 1998;32(1):19–29.
16. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Бяков А.С., Клец А.Г. Слои с аммоноидеями пермской системы Верхоянья. *Отечественная геология*. 2002;4:66–71.
[Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S., Klets A.G. Ammonoid beds of the Permian in the Verkhoyansk Region. *Otechestvennaya Geologiya*. 2002;4:66–71. (In Russ.)]
17. Kutygin R.V. Permian ammonoid associations of the Verkhoyansk Region, Northeast Russia. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006;26(3–4):243–257. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.10.004>
18. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Бяков А.С. и др. Опорный разрез дулгалахского и хальпирского горизонтов (верхнетатарский подъярус) Западного Верхоянья. *Тихоокеанская геология*. 2003;6:82–97.
[Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S. et al. Reference section of the Dulgalakhian and Khalpirkian horizons (Upper Tatarian substage) of the Western Verkhoyanie. *Tikhookeanskaya geologiya*. 2003;6:82–97 (In Russ.)]
19. Biakov A.S., Kutygin R.V. New find of Inoceramus-like bivalves of the genus *Atomodesma* in the Southern Verkhoyansk Region, and invasions of Extra-Boreal mollusks into Northeastern Asia during the Permian. *Paleontological Journal*. 2020;54(5):459–463. <https://doi.org/10.1134/S0031030120050032>
20. Дагис А.С., Дагис А.А., Ермакова С.П. и др. *Триасовая фауна Северо-Востока Азии*. Новосибирск: Наука; 1996. 232 с.
[Dagys A.S., Dagys A.A., Ermakova S.P. et al. *Triassic fauna of Northeast Asia*. Novosibirsk: Nauka; 1996. 232 p. (In Russ.)]
21. Biakov A.S., Kutygin R.V., Goryachev N.A. et al. Discovery of the Late Changhsingian Bivalve complex and two fauna extinction episodes in Northeastern Asia at the end of the Permian. *Doklady Biological Sciences*. 2018;480(1):78–81. <https://doi.org/10.1134/S0012496618030018>
22. Yadrenkin A.V., Biakov A.S., Kutygin R.V., Kopylova A.V. New findings and stratigraphic distribution of foraminifera from Permian-Triassic boundary deposits in the Southern Verkhoyansk Region. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14(5):447–459. <https://doi.org/10.1134/S1819714020050097>
23. Dagys A., Ermakova S. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia. *Revue de Paléobiologie*. 1996;15(2):401–447.
24. Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M. Global Correlation of Basal Triassic Layers in the Light of the First Carbon Isotope Data on the Permian-Triassic Boundary in Northeast Asia. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014;8(1):1–17. <https://doi.org/10.1134/S1819714014010060>
25. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Бяков А.С. и др. Первые находки цератитов рода *Otoceras* в Кобыминской зоне Южного Верхоянья, Северо-Восток России. *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. 2019;161(4):550–570. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.4.550-570>
[Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S. et al. First findings of *Otoceras* (Ceratitida) in the Kobyma Zone of the Southern Verkhoyanie, Northeastern Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta-Seriya Estestvennye Nauki*. 2019;161(4):550–570 (In Russ.)]
26. Biakov A.S., Zakharov Yu.D., Horacek M. et al. New data on the structure and age of the terminal Permian strata in the South Verkhoyansk region (northeastern Asia). *Russian Geology and Geophysics*. 2016;57(2):282–293. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.02.005>
27. Budnikov I.V., Kutygin R.V., Shi G.R. et al. Permian stratigraphy and paleogeography of Central Siberia (Angaraland) – A review. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020;196(104365):1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2020.104365>
28. Кутыгин Р.В. Биогеографические связи пермских аммоноидных сообществ Верхояно-Охотского и Колымо-Омолонского регионов. *Наука и образование*. 2015;2:46–50
[Kutygin R.V. Biogeographic relationships of the Verkhoyanian-Okhotsk and Kolyma-Omolon Permian Ammonoids. *Nauka i obrazovanie*. 2015;2:46–50 (In Russ.)]

Об авторах

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

КИЛАСОВ Афанасий Николаевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7469-2132>, e-mail: kilyasov1993@mail.ru

Аффилиация

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

About the authors

KUTYGIN, Ruslan Vladimirovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, e-mail: rkutygin@mail.ru

KILYASOV, Afanasy Nikolaevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7469-2132>, e-mail: kilyasov1993@mail.ru

Affiliation

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 27.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 19.10.2022

Принята к публикации / Accepted 10.11.2022

Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия)

Н. А. Опарин✉, О. Б. Олейников

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

✉ nik3256-1989@yandex.ru

Аннотация

Приведены результаты петрохимических и геохимических исследований кимберлитов трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) и сравнение их микроэлементного состава с аналогами кимберлитовых провинций Якутской (Россия) и Кимберли (ЮАР). Представлены петрографический состав и результаты постмагматической карбонатизации кимберлитов трубок Манчары, им. А.П. Смелова и Дабан. В обобщенной модели верхней части трубок выделены три условных горизонта: нижний, сложенный наименее измененными породами; средний, кимберлитовые породы которого фрагментированы в результате процессов карбонатизации; верхний, выполненный интенсивно карбонатизированными породами с утраченными текстурно-структурными признаками. Полученные данные химического и микроэлементного составов пород трубок Хомпу-Майского поля отражают их вещественную специфику, предполагающую схожие условия формирования кимберлитов Центральной Якутии и Южной Африки.

Ключевые слова: кимберлит, трубка, карбонатизация, редкоземельные элементы, Хомпу-Майское поле

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Опарин Н.А., Олейников О.Б. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):486–498. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-486-498>

The geology and composition of the Khompu-May field kimberlite pipes (Central Yakutia, Russia)

N. A. Oparin✉, O. B. Oleinikov

Diamond and Precious Metal Geology Institute,

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

✉ nik3256-1989@yandex.ru

Abstract

The paper presents the results of petro- and geochemical studies of the kimberlite pipes within the Khompu-May field (Central Yakutia). Their trace element data were compared with the analogues from the Yakut Kimberlite Province, Russia and the Kimberly Kimberlite Province, RSA. We present the data on petrographic composition and results of postmagmatic carbonation of the Manchary, A.P. Smelov, and Daban pipes kimberlites. The generalized model of the upper parts of the pipes show three conventional horizons: the lower horizon of least altered rocks, the middle horizon of fragments of kimberlite carbonates, and the upper horizon of intensely carbonated rocks without recognizable textural and structural characteristics. The obtained data on chemical and trace element compositions of rocks from pipes of the Khompu-May field reflect their material specificity, suggesting similar conditions for formation of kimberlites in Central Yakutia and South Africa.

Keywords: kimberlite, pipe, carbonation, rare earth elements, Khompu-May field

Funding. This study was carried out within the Research Project of the DPMGI SB RAS.

For citation: Oparin N.A., Oleinikov O.B. The geology and composition of the Khompu-May field kimberlite pipes (Central Yakutia, Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):486–498. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-486-498>

Введение

Хомпу-Майское кимберлитовое поле расположено в северной части Алданской антеклизы и включает восемь малоизученных трубок. К настоящему времени имеются неоднозначные данные по возрасту этих пород [1–3], частично охарактеризована их минералогия [4–12]. Неосвоенными остаются вертикальное строение диатрем, петрография и геохимическая характеристика слагающих их пород. В настоящей работе рассматриваются изменения петрографического, химического и особенности микроэлементного состава порфировых кимберлитов и кимберлитовых брекчий трубок Манчары, Дабан и им. А.П. Смелова, предложена обобщенная модель строения верхних горизонтов этих тел.

Геологическое строение кимберлитовых тел

Трубки Хомпу-Майского кимберлитового поля прорывают карбонатные породы среднего кембрия и перекрыты юрскими терригенными толщами мощностью от 100 до 150 м (рис. 1) [13]. Полученные ранее Rb–Sr-датировки показывают, что трубки Манчары (358 ± 50 млн лет) и им. Артемова (341–351 млн лет) относятся к алмазносной среднепалеозойской эпохе кимберлитобразования [1, 2]. В то же время при U–Pb-датировании перовскита и апатита для трубки Манчары был получен раннепалеозойский возраст 425–431 млн лет [3]. Такие расхождения в значениях требуют проведения специализированных дополнительных определений. В пределах поля нами выделяются два куста кимберлитовых тел. Трубка Манчары находится в Хомпу-Майском кусте, а им. А.П. Смелова и Дабан – в Барылайском (см. рис. 1). Поскольку расстояние между трубками в пределах одного куста составляет от 4 до 17 км, а между ближайшими трубками разных кустов – 24 км и состав пород диатрем во многом однотипен, представляется, что они образуют единое поле.

В то же время И.Л. Махоткин с соавторами в Центральной Якутии выделяют Менда-Барылайский алмазносный район, включающий два кимберлитовых поля – Хомпу-Майское (трубки Манчары, Турахская, им. Артемова, Эрэл и аномалия Thm-53-11) и Атырдахское (трубки Апрельская, Дабан, Атырдах и им. А.П. Смелова) [3].

В плане диатремы имеют форму овала. Максимальный размер имеет трубка Манчары – 250×300 м, для которой, как и для трубки им. А.П. Смелова, скважинами определена воронко-

образная форма, а для трубки Дабан – грибовидная [14].

Диатремы сложены либо порфировым кимберлитом, либо порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией [15, 16]. Согласно классификации Б. Скотт-Смит с соавторами [17], эти два типа пород являются, соответственно, когерентным и вулканокластическим кимберлитом. Между этими породами существуют постепенные переходы, а магматические контакты отсутствуют. Трубки вскрыты на различную глубину: трубка Манчары изучена до 120 м, трубка им. А.П. Смелова – до 200, а трубка Дабан – до 90 м.

В ходе исследования установлено, что породы трубки Манчары содержат наименьшее количество ксенолитов осадочных пород (до 10 %) и представлены порфировым кимберлитом [16]. В строении трубок Дабан и им. А.П. Смелова принимают участие как порфировый кимберлит, так и кимберлитовая брекчия, количество ксенолитов в которых изменяется от 10 до 40 % соответственно. Основываясь на петрографических особенностях кимберлитов и их вторичных преобразованиях, в строении трубок мы выделили до трех условных горизонтов (нижний, средний и верхний) (рис. 2), мощности которых для каждой конкретной трубки индивидуальны.

Нижние зоны трубок Манчары (100–120 м) и им. А.П. Смелова (175–200 м) сложены наименее измененными кимберлитовыми породами с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом (рис. 2). Порфировая структура обусловлена присутствием в породе псевдоморфоз серпентина, содержание которых составляет 45–70 %. В кимберлите наблюдаются единичные макромегакристаллы пикроильменита, граната и флогопита. Мелкозернистый мезостазис выполнен преимущественно серпентином, ксеноморфными выделениями кальцита и пластинками слюды (рис. 3, а), представленной минералами ряда флогопит–киноситалит [12].

Для основной массы характерна неоднородная неравномерно-зернистая структура, обусловленная микроскоплениями разноразмерных зерен кальцита, которая позволяет предположить, что и на этих уровнях в породах произошли постмагматические изменения. В разрезе трубки Дабан, благодаря интенсивной карбонатизации, породы с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом отсутствуют, поэтому в ее строении нижний горизонт до глубины 90 м не выделяется.

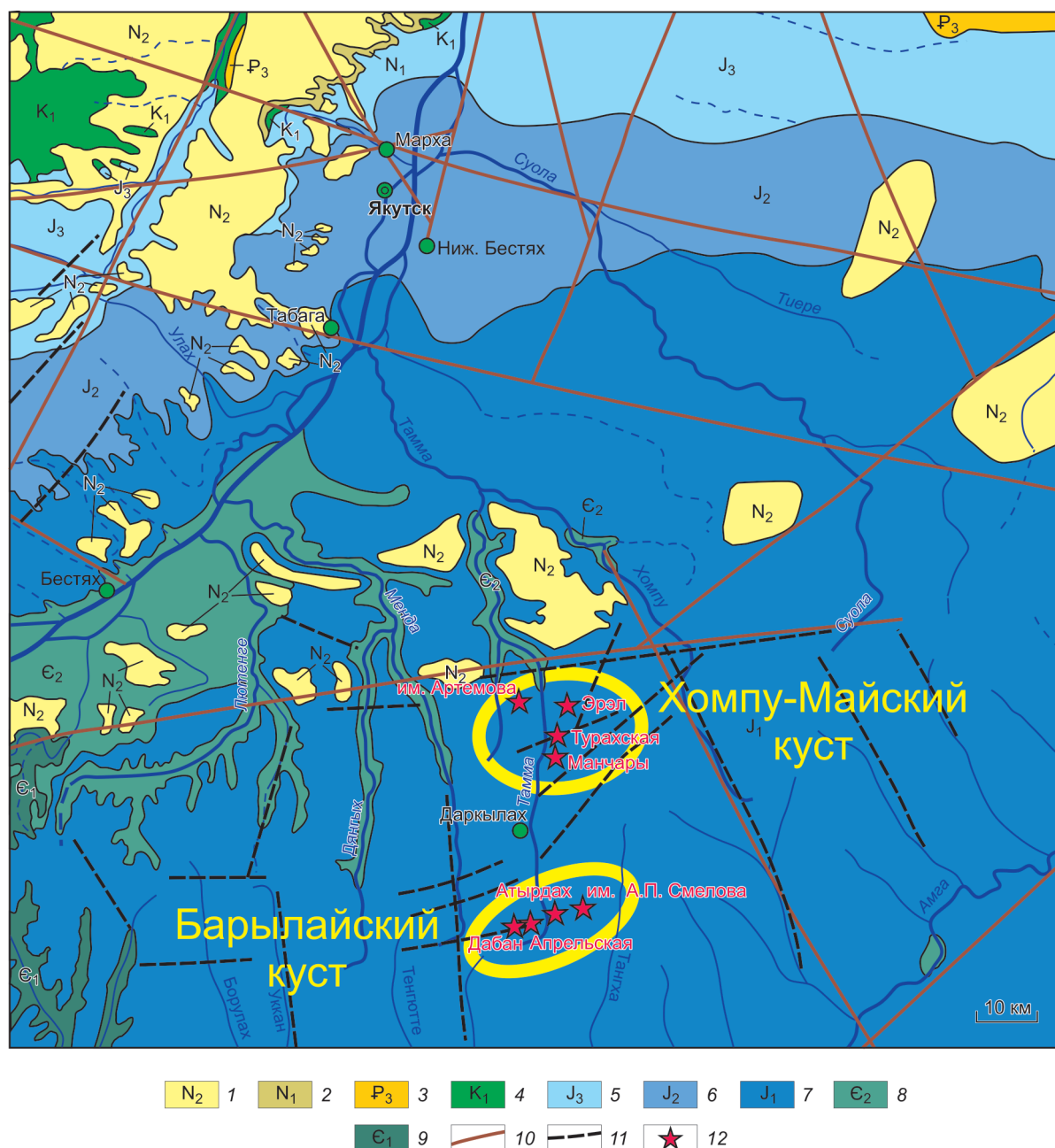


Рис. 1. Геологическая позиция Хомпу-Майского кимберлитового поля: 1 – верхний неоген, 2 – нижний неоген, 3 – верхний палеоген, 4 – нижний мел, 5 – верхняя юра, 6 – средняя юра, 7 – нижняя юра, 8 – средний кембрий, 9 – нижний кембрий, 10 – линейные элементы предположительно разломной природы, 11 – разломы неустановленной морфологии, 12 – кимберлитовые трубки.

Fig. 1. Geological position of the Khompu-May kimberlite field: 1 – Upper Neogene, 2 – Lower Neogene, 3 – Upper Palaeogene, 4 – Lower Cretaceous, 5 – Upper Jurassic, 6 – Middle Jurassic, 7 – Lower Jurassic, 8 – Middle Cambrian, 9 – Lower Cambrian, 10 – linear elements presumably caused by fault, 11 – faults of undefined morphology, 12 – kimberlite pipes.

В результате карбонатизации в пределах выделенных средних горизонтов (см. рис. 2) трубки Манчары (30–100 м) и им. А.П. Смелова (45–172 м) произошла переработка кимберлитового материала с появлением среди порфировых

кимберлитов и кимберлитовых брекчий блоков, в которых реликты кимберлитовых пород с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом погружены в связующую массу серпентин-карбонатного состава. Форма фрагментов от неправиль-

ной до шарообразной, что делает их похожими на автолиты, обуславливая автолитоподобную текстуру (рис. 3, б). Мезостазис реликтов идентичен основной массе пород нижнего горизонта. В связующей массе наблюдается замещение серпентиновых псевдоморфоз кальцитом. Карбонат образует ксеноморфные, реже идиоморфные зерна размером до 120 мкм. Количество кальцита во фрагментированных породах увеличивается, что подтверждается результатами полуколичественного рентгенофазового анализа [18].

Отличительной особенностью мезостазиса пород средних горизонтов трубки им. А.П. Смелова является присутствие доломита наряду с кальцитом в интервале глубин от 45 до 90 м. В трубке Дабан доломит также является преобладающим карбонатным минералом основной массы кимберлитов среднего горизонта (50–90 м). На этом уровне серпентиновые псевдоморфозы частично уничтожены процессом карбонатизации, в результате чего количество их реликтов составляет не более 10 %. Это приводит к тому, что порфиновая структура в породах трубки Дабан становится нечетко выраженной (рис. 3, в). Среди преимущественно доломитовой основной массы присутствуют фрагменты наименее измененного карбонат-флогопитового мезостазиса размером до 7 см (рис. 3, в). Для таких участков характерна неоднородная неравномерно-зернистая структура, обусловленная характером распределения реликтов флогопита в разноразмерной карбонатной массе.

Брекчии и порфиновые кимберлиты верхних горизонтов трубок Манчары (0–30 м), им. А.П. Смелова (0–45 м) и Дабан (0–50 м) карбонатизированы вплоть до утери текстурно-структурных признаков (см. рис. 2). Для пород этих уровней исследуемых трубок характерны доломит, магнезит, сидерит и анкерит. Появление данных карбонатов связано с высвобождением магния и железа из силикатных и рудных минералов в результате карбонатизации кимберлитовых пород. Масштабы карбонатизации для каждой трубки индивидуальны. Наименее измененной является трубка Манчары, а наиболее масштабно такие процессы проявлены в породах, слагающих трубку Дабан.

Схожая особенность увеличения карбонатной составляющей установлена в кимберлитовых породах верхних горизонтов трубки Удачная [19]. Основная масса кимберлитовых брекчий на этих уровнях приобретает карбонатный и карбонат-

серпентиновый состав, что позволяет предположить универсальность проявления процессов постмагматической карбонатизации в верхних горизонтах трубок.

Ранее И.Л. Махоткиным с соавторами упоминалось участие в строении трубки им. А.П. Смелова «карбонатитовых кимберлитов» [3], а также наличие в ней, как и в трубке Манчары, нескольких фаз внедрения. Проведенные нами петрографические исследования не подтверждают присутствие «карбонатитовых кимберлитов» в строении данных тел. Не встречены какие-либо магматические контакты между породами в пределах трубок. Все изменения вещественного состава обусловлены процессами постмагматической карбонатизации, приведшими к фрагментации пород и уничтожению их первичных текстурно-структурных признаков.

Таким образом, вертикальное строение до глубины 200 м трубок Хомпу-Майского поля характеризуется однотипным первичным составом пород и процессами карбонатизации, которые в каждом теле имели разную степень интенсивности.

Петрохимическая характеристика кимберлитовых трубок

Петрохимическое исследование образцов кимберлитовых пород проводилось методом силикатного анализа в ИГАБМ СО РАН. Изменение состава кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля рассматривалось на диаграмме (рис. 4), предложенной А. Холмсом [20]. Так, фигуративные точки составов пород трубки Манчары и наименее измененных разностей пород трубки им. А.П. Смелова образуют единую область в пределах поля кимберлитов [15]. Фигуративные точки составов пород трубки Дабан попадают в поле карбонатитовых брекчий, что соответствует их карбонатизированному составу. В это поле попадает и часть фигуративных точек измененных разностей пород трубки им. А.П. Смелова (см. рис. 4). Наименее карбонатизированные породы трубки Манчары содержат минимальное количество углекислоты и, в целом, более высокие содержания оксидов титана и магния (табл. 1). Так, в породах с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом количество углекислоты варьирует от 0,27 до 1,64 %, а оксидов титана и магния – 3,74 и 30,51 % соответственно. Во фрагментированных породах трубки Манчары содержание CO_2 достигает 4,63 %, увеличиваясь до 11,84 % в породах с утраченными текстурно-структурными признаками. Для пород верхних

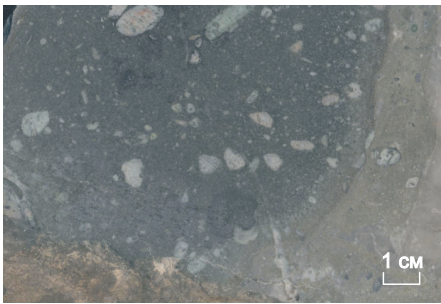
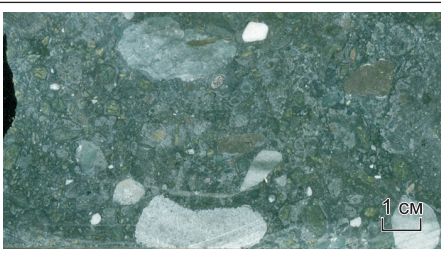
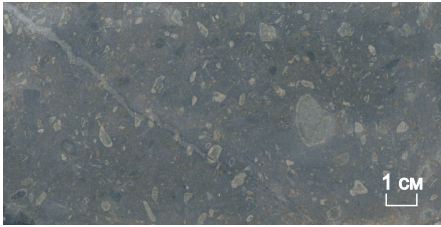
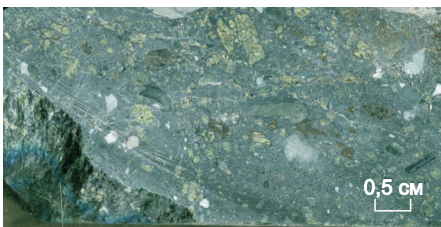
Трубка	Глубина, м	Керн кимберлитовых пород	Порода	Горизонт
Манчары	0–5		Карбонатизированный кимберлит с утраченными текстурно-структурными признаками	Верхний
им. А.П. Смелова	0–45			
Дабан	50–90		Крупнопорфировая карбонатизированная кимберлитовая брекчия с реликтами карбонат-слюдистого мезостазиса	Средний
им. А.П. Смелова	154–172		Кимберлитовая брекчия с автолитоподобной текстурой	
Манчары	100–120		Порфировый кимберлит с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом	Нижний
им. А.П. Смелова	175–200		Кимберлитовая брекчия с серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом	

Рис. 2. Обобщенная петрографическая колонка кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля.

Fig. 2. Generalized petrography of the Khompu-May field kimberlite pipes.

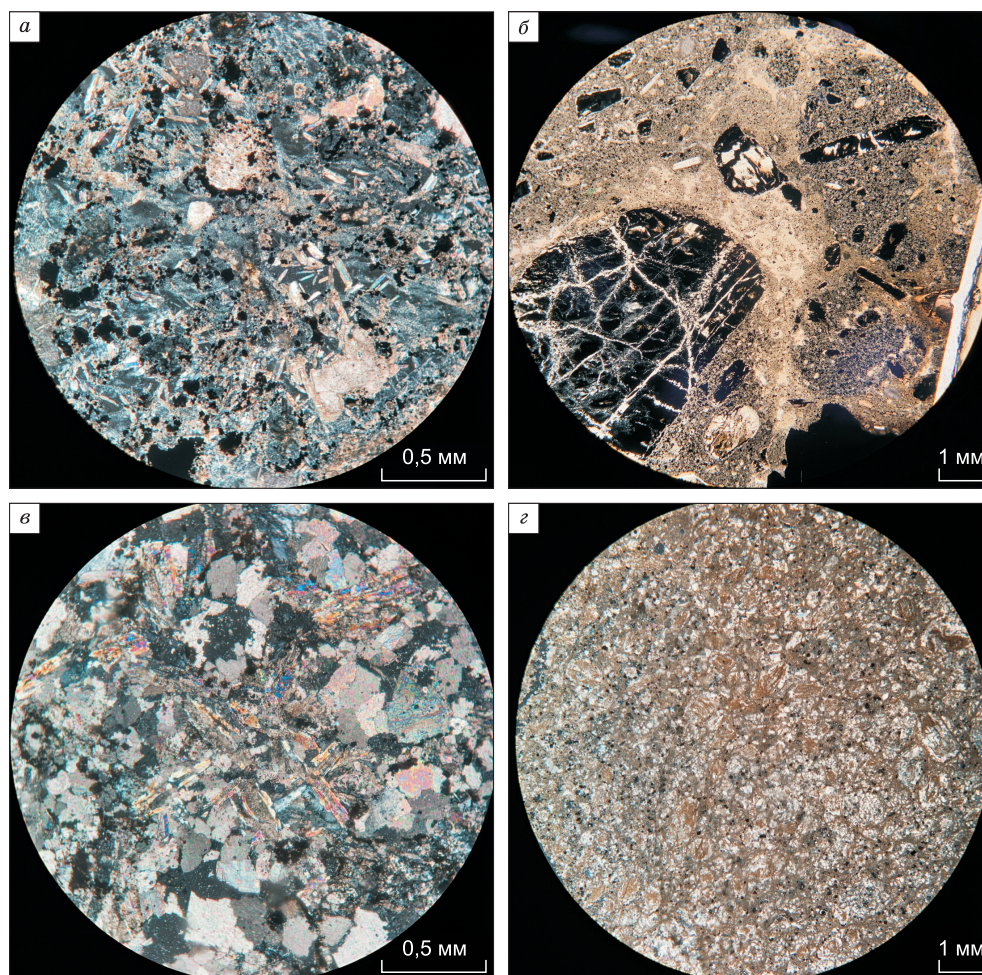


Рис. 3. Кимберлитовые породы Хомпу-Майского поля: *а* – серпентин-флогопит-карбонатный мезостазис кимберлита с неравномерно-зернистой структурой, трубка Манчары, нижний горизонт, глубина 112,4 м, николи скрещены; *б* – автолитоподобная текстура кимберлитовой брекчии, трубка им. А.П. Смелова, средний горизонт, глубина 123 м, николи параллельны; *в* – карбонат-слюдистый мезостазис с неравномерно-зернистой структурой кимберлита, трубка Дабан, средний горизонт, глубина 80 м, николи скрещены; *г* – мезостазис интенсивно карбонатизированных пород с частично утраченными текстурно-структурными признаками, трубка Дабан, верхний горизонт, глубина 13 м, николи скрещены.

Fig. 3. Kimberlites of the Khompu-May field: *a* – serpentine-phlogopite-carbonate mesostasis of kimberlite with heterogeneous texture, the Manchary pipe, lower horizon, depth 112.4 m, crossed nicols; *б* – autolithic texture of kimberlite breccia, the A.P. Smelov pipe, middle horizon, depth 123 m, parallel nicols; *в* – carbonate-micaceous mesostasis with heterogeneous texture of kimberlite, the Daban pipe, middle horizon, depth 80 m, crossed nicols; *г* – mesostasis of intensely carbonated rocks without recognizable textural and structural characteristics, the Daban pipe, upper horizon, depth 13 m, crossed nicols.

горизонтов также характерно обеднение MgO до 20,26 %.

В наименее измененных породах нижних горизонтов трубки им. А.П. Смелова содержание углекислоты составляет 7,08 % (см. табл. 1), а TiO₂ и MgO – 1,86 и 31,8 %. На более высоких уровнях количество CO₂ в породах с автолитоподобной текстурой варьирует от 16,08 до 19,08 %, а в кимберлитах с утраченными текстурно-структурными признаками достигает 36,63 %. Количество MgO в породах с утраченными текс-

турно-структурными признаками наиболее низкое и составляет 10,26 %.

В кимберлитовых породах трубки Дабан, которая является наиболее карбонатизированной, количество CO₂ перманентно увеличивается от 33,15 % на нижних горизонтах до 39,14 % – на верхних (см. табл. 1). Количество MgO в породах этого тела вдвое меньше, чем в кимберлитах других исследуемых трубок.

В целом для изученных тел характерно увеличение содержания CO₂ в породах как с авто-

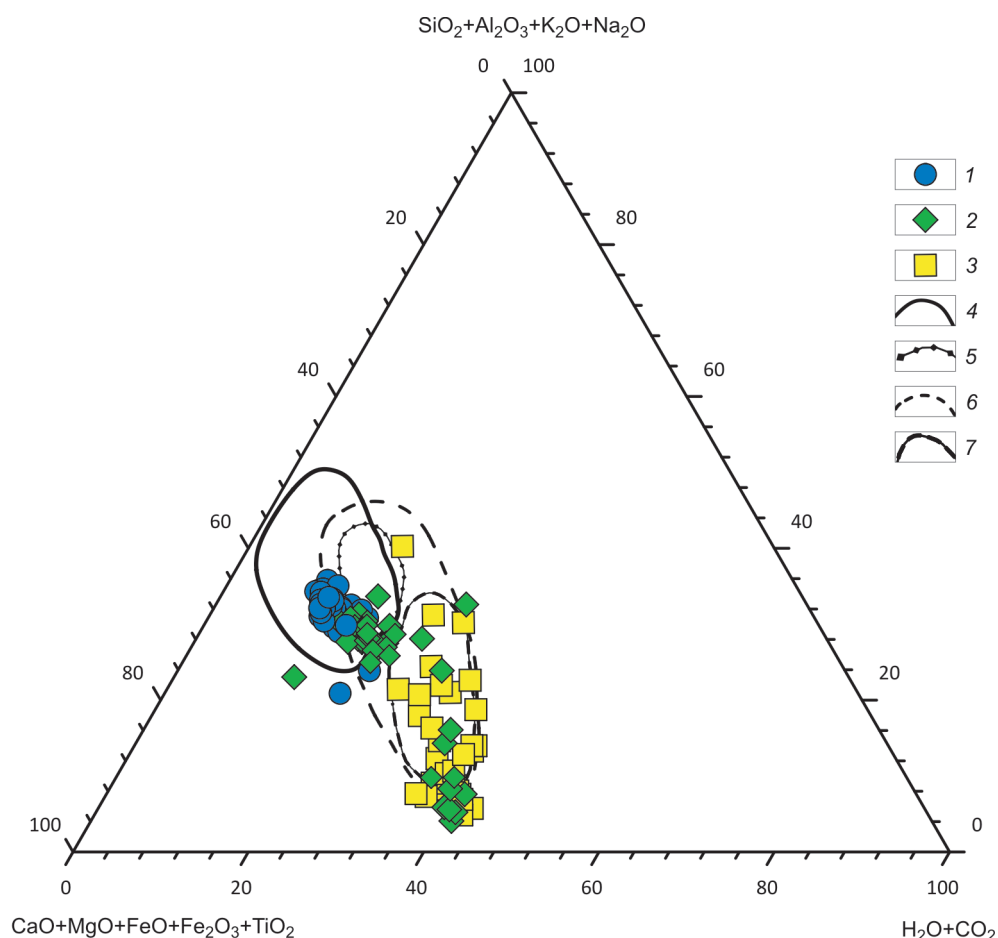


Рис. 4. Диаграмма петрогенетических взаимоотношений пород кимберлитовой формации [20]: 1 – трубка Манчары, 2 – трубка им. А.П. Смелова, 3 – трубка Дабан; поля: 4 – монтицеллитовые альнеиты [15], 5 – кимберлиты [15], 6 – кимберлитовые брекчии [15], 7 – карбонатитовые брекчии [15].

Fig. 4. Diagram of petrogenetic relationships between kimberlites [20]: 1 – the Manchary pipe, 2 – the A.P. Smelov pipe, 3 – the Daban pipe; fields: 4 – monticellite alneites [15], 5 – kimberlites [15], 6 – kimberlite breccias [15], 7 – carbonatite breccias [15].

литоподобной текстурой, так и с утраченными текстурно-структурными признаками, а также уменьшение количества оксидов титана и магния на близповерхностных уровнях (см. табл. 1).

Геохимическая характеристика кимберлитовых тел

Определение редких элементов в кимберлитах Хомпу-Майского поля проводилось в ООО «ХАЦ «Плазма» в г. Томск на масс-спектрометре ELAN (модель DRC-е, № W1520501). Исследовались породы с наименее измененным серпентинфлогопит-карбонатным мезостазиом: два образца из трубки Манчары и три образца из трубки им. А.П. Смелова. Кроме того, дополнительно изучены два образца из трубки им. Артемова, так как породы этого тела наименее карбонатизи-

рованы относительно остальных трубок Хомпу-Майского поля.

Все исследуемые образцы кимберлитов обогащены редкими элементами. Структуры *редкоземельных элементов*, нормированных по хондриту [21], продемонстрированы на рис. 5.

Общий рисунок спектров редких элементов сопоставим с таковыми кимберлитов группы I Южной Африки [22] (см. рис. 5, а). Во всех образцах наблюдается фракционирование легких редкоземельных элементов (LREE) относительно тяжелых (HREE). Наиболее высокими концентрациями РЗЭ характеризуются породы трубки им. А.П. Смелова, при этом сохраняя субпараллельную структуру распределения микроэлементов, в целом, типичную для всех исследуемых объектов.

Таблица 1

**Представительные анализы химического состава кимберлитовых пород
из трубок Хомпу-Майского поля**

Table 1

**Representative analyses of chemical composition of kimberlite rocks
from pipes of the Khompu-May field**

Окислы и элементы	Хомпу-Майский куст					Барылайский куст							
	Трубка Манчары					Трубка им. А.П. Смелова				Трубка Дабан			
	Глубина, м												
	101	79	57	35	25	172,6	124,3	115,9	61	25,7	84,3	36	13,7
SiO ₂	26,14	27,05	29,62	27,62	18,55	27,59	25,01	19,26	26,47	8,44	18,50	10,46	4,90
TiO ₂	3,74	3,55	3,74	3,52	2,40	1,86	1,60	13,08	2,73	1,56	0,87	1,04	2,28
Al ₂ O ₃	2,15	1,85	2,04	1,85	1,17	0,75	1,82	2,87	1,60	1,06	3,10	3,00	2,60
Fe ₂ O ₃	8,42	7,27	9,06	6,64	12,60	5,21	4,27	6,01	6,01	0,25	2,11	1,71	1,31
FeO	1,45	2,25	2,29	2,24	4,71	2,70	2,39	9,49	2,75	14,53	2,00	3,86	4,44
MnO	0,15	0,12	0,14	0,14	0,13	0,10	0,12	0,18	0,14	0,29	0,03	0,07	0,04
MgO	30,51	29,61	32,11	31,11	20,26	31,80	30,13	25,86	30,46	10,26	13,35	13,42	10,60
CaO	10,41	10,07	7,04	6,91	16,17	10,05	13,06	8,16	9,41	24,28	24,45	27,06	32,83
Na ₂ O	0,69	1,25	0,44	1,75	0,03	0,40	0,44	0,24	0,85	0,01	0,04	0,03	0,04
K ₂ O	0,07	0,53	0,29	0,16	0,01	0,47	0,44	0,34	1,02	0,02	0,62	0,28	0,24
H ₂ O ⁻	1,07	0,01	0,53	0,47	0,72	0,89	1,00	0,98	0,66	0,14	0,68	0,98	0,56
H ₂ O ⁺	12,64	11,60	11,55	9,45	6,82	10,63	8,79	6,88	7,66	1,15	0,14	0,00	0,00
ppp	0,44	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,18
P ₂ O ₅	1,27	0,11	0,70	1,27	4,58	1,28	0,72	0,67	1,27	1,17	0,39	0,39	0,52
CO ₂	1,64	4,63	0,27	6,90	11,84	7,08	16,08	19,08	8,97	36,63	33,15	37,94	39,14
Li ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Rb ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,28	0,25	0,24	0,26	0,30	0,21	0,32	0,26	0,16	0,19	1,31	0,16	0,16
F	0,23	0,08	0,11	0,25	0,34	0,12	0,13	0,10	0,40	0,10	0,21	0,20	0,16
Сумма	100,14	100,20	100,01	99,98	99,78	100,21	99,56	99,66	99,74	99,92	100,19	99,89	99,40

По сравнению с алмазоносными кимберлитами Далдынского и Алакит-Мархинского полей [23] (см. рис. 5, а), образцы кимберлитов трубок им. А.П. Смелова, Манчары и им. Артемова обогащены всем спектром РЗЭ. Распределение *высокозарядных элементов HFSE (Nb, Zr, Ta, Hf, Th, U, Pb, Ti)*, нормированных к примитивной мантии РМ [21], проиллюстрировано на рис. 5. По содержанию Nb, Ta, Ti и Th исследуемые образцы сопоставимы с кимберлитами группы I ЮАР (см. рис. 5, в–е). В целом изученные породы демонстрируют отрицательную титановую аномалию, которая характеризуется более высокими концентрациями TiO₂ относительно кимберлитов Далдынского и Алакит-Мархинского полей (см. рис. 5, б).

Наиболее высокие концентрации Zr отмечают в кимберлитах трубки Манчары. Подобные содержания отмечаются только в силлах Весселтон (см. рис. 5, в), что согласуется с присутствием в кимберлитах трубки Манчары и в силлах Весселтон [24] минералов циркония (бадделит, кимцеит, кальцитит, цирконолит). Кроме того, для всех исследуемых тел Хомпу-Майского поля характерна выраженная отрицательная аномалия Pb (см. рис. 5, в–е).

Крупные литофильные элементы LILE (Cs, Rb, K, Ba и Sr) демонстрируют широкую вариацию концентраций во всех исследуемых трубках. Наиболее низкими содержаниями цезия характеризуются кимберлиты трубки Манчары, что характерно и для пород из Далдынского и Алакит-

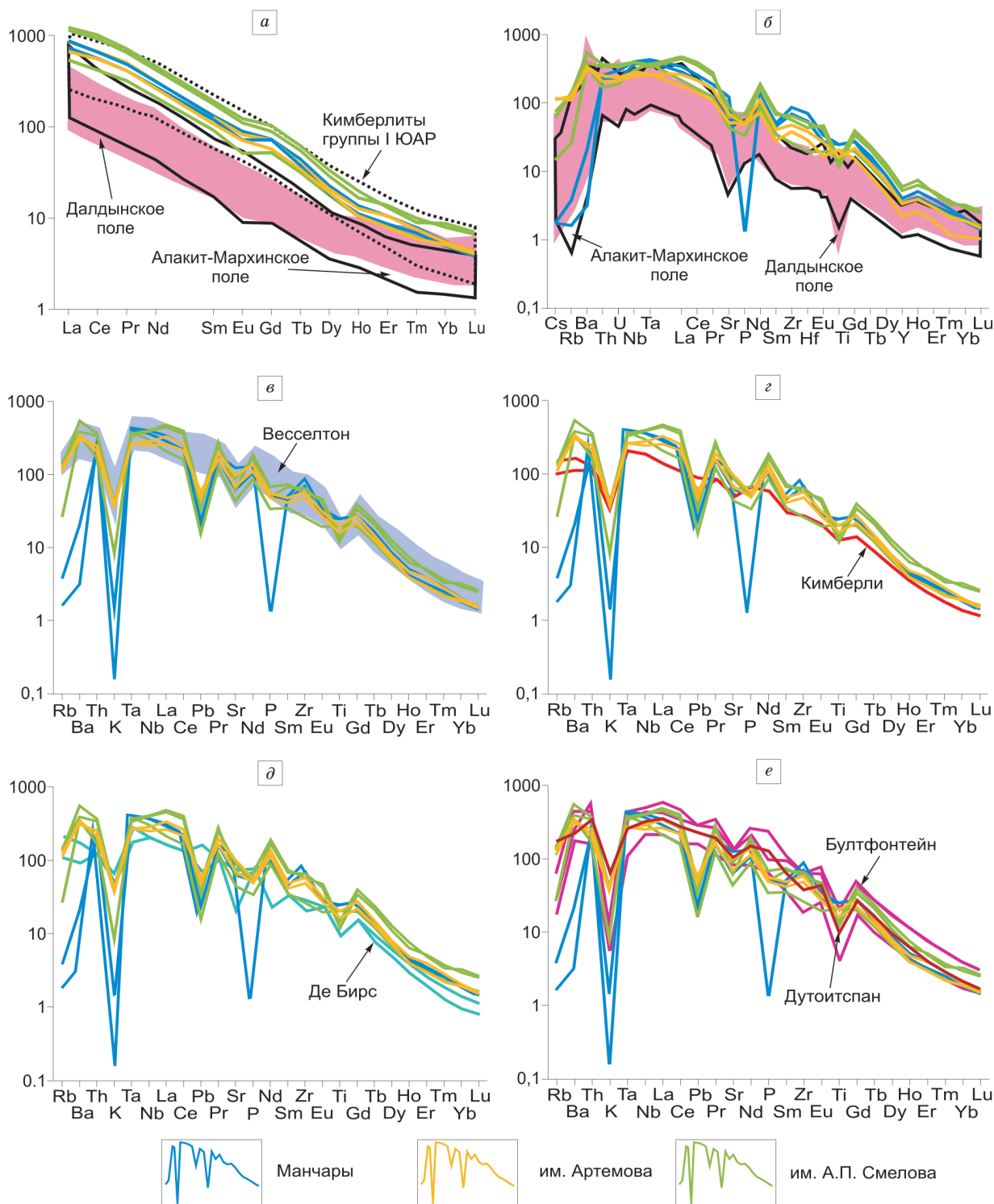


Рис. 5. Нормированные к хондриту (а) [21] и к примитивной мантии (б–е) [21] содержания редких элементов в кимберлитовых породах Хомпу-Майского, Далдынского [23], Алакит-Мархинского [23] полей и провинции Кимберли (ЮАР) [22].

Fig. 5. Trace elements normalized to chondrite (a) [21] and primitive mantle (b–e) [21] in kimberlites of the Khompu-May, Daldynskoe [23], Alakit-Markhinskoe [23] fields, Russia and the Kimberley province, RSA (South Africa) [22].

Мархинского полей (см. рис. 5, б). На плавные субпараллельные структуры обогащения редки-

ми элементами в исследуемых породах накладываются отрицательные аномалии Rb, K, Ba и Sr.

Таблица 2

Редкие элементы в кимберлитовых породах Хомпу-Майского поля (ppm)

Table 2

Trace elements in kimberlite rocks of the Khompu-May field (ppm)

Элемент	Хомпу-Майский куст					Барылайский куст		
	Трубка Манчары		Трубка им. Артемова			Трубка им. А.П. Смелова		
	Глубина, м							
	56	96	26			67,3	74,6	182,2
Cs	0,04	0,04	3,05	2,33	2,46	1,57	1,27	0,31
Rb	2,26	0,97	65,54	75,54	65,97	80,54	85,21	15,68
Ba	136,27	20,94	1180,02	2013,68	2258,91	3575,30	2534,71	2258,67
Th	17,34	20,24	2,98	19,86	16,38	28,93	26,82	13,36
U	4,42	6,04	4,67	4,72	4,31	7,30	6,87	3,81
Nb	238,85	262,33	177,00	183,85	162,77	261,63	255,07	197,45
Ta	14,96	15,96	10,56	9,83	9,79	13,31	12,28	13,87
K	354,86	39,35	11594,27	9406,91	8863,49	9130,17	9702,23	1989,32
La	185,16	220,93	118,26	215,01	168,68	308,40	288,85	135,10
Ce	362,64	430,76	236,75	432,33	357,30	657,87	598,06	269,82
Pb	3,48	3,10	13,42	6,99	8,61	7,06	5,04	2,32
Pr	40,25	47,17	26,99	49,40	40,45	70,12	63,71	31,17
Sr	1224,77	2437,67	1029,62	1928,70	1374,03	1216,88	1731,95	860,66
P	4674,46	124,76	4394,33	4958,96	4367,57	6075,89	4433,44	3026,99
Nd	132,68	163,84	89,60	168,44	138,49	233,00	207,21	108,75
Sm	18,45	20,30	11,40	19,44	16,63	29,75	27,28	14,11
Zr	725,20	908,78	399,44	599,52	502,04	588,83	680,49	272,53
Hf	15,33	19,87	8,08	12,37	10,78	12,29	14,64	5,49
Eu	4,19	5,22	2,56	4,80	4,12	7,19	6,46	2,98
Ti	29598,79	29853,68	24856,17	23993,29	19363,31	17498,46	14303,39	24324,52
Gd	14,74	14,97	8,23	14,79	11,81	21,40	18,47	10,75
Tb	1,40	1,65	0,85	1,46	1,28	2,33	2,06	1,18
Dy	4,59	5,75	3,15	5,26	4,80	8,52	7,28	4,47
Y	15,22	17,42	9,34	16,41	14,43	25,78	22,58	15,30
Ho	0,62	0,76	0,39	0,71	0,59	1,11	0,93	0,58
Er	1,40	1,71	0,84	1,71	1,30	2,13	2,24	1,33
Tm	0,17	0,20	0,08	0,19	0,15	0,23	0,25	0,15
Yb	0,81	0,90	0,48	0,89	0,83	1,42	1,29	0,83
Lu	0,10	0,10	0,07	0,11	0,10	0,18	0,17	0,11

Кимберлиты трубки Манчары демонстрируют наиболее сильное обеднение К, Ва и Rb, что отличает их от трубок ЮАР, которые обладают более высокими концентрациями этих микроэлементов (см. рис. 5, в–е). Близкие с трубкой Манчары содержания Ва, Rb и Cs отмечаются в кимберлитах Далдынского и Алакит-Мархинского полей. В целом по содержанию Rb образцы кимберлитов из трубок им. Артемова и им. А.П. Сме-

лова сопоставимы с кимберлитами группы I Южной Африки.

Исследуемые образцы из трубок им. А.П. Смелова и им. Артемова более обогащены Ва, чем породы трубок Де Бирс [22] (см. рис. 5, д) и Кимберли [22] (см. рис. 5, з) и сопоставимы с кимберлитами трубок Дутоитспан (см.рис. 5, е) [22], Бултфонтейн (см. рис. 5, е) [22] и силлов Весселтон (рис. 5, в) [22]. Отрицательные аномалии К,

Rb и Ti в южноафриканских кимберлитах группы I были проинтерпретированы Ле Роэком [22] как особенности первичной кимберлитовой магмы.

Таким образом, фигуративные точки составов кимберлитовых пород трубок Манчары, им. А.П. Смелова и Дабан на спайдердиаграммах демонстрируют схожий между собой спектр распределения редких элементов, что может свидетельствовать о единой для них системе кимберлитобразования. Породы Хомпу-Майского поля в целом имеют более близкий рисунок распределения спектров микроэлементов с кимберлитами группы I Южной Африки, чем с кимберлитами Далдынского и Алакит-Мархинского полей Якутской кимберлитовой провинции.

Заключение

Проведенное исследование пород трубок Манчары, Дабан и им. А.П. Смелова показало однотипность их петрографического состава и близкий характер постмагматических изменений, обусловленных наложенной карбонатизацией. Обобщенная модель строения верхней части кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля выглядит следующим образом: нижние горизонты тел сложены массивными породами с наименее измененной основной массой серпентин-флогопит-карбонатного состава. Благодаря карбонатизации верхних горизонтов произошло фрагментирование пород, приведшее к формированию участков с автолитоподобной текстурой, связующая масса которых представлена серпентином и кальцитом. Данный процесс не является равномерным и в объеме средних горизонтов трубки наряду с фрагментированными встречаются блоки пород с наименее измененным серпентин-флогопит-карбонатным мезостазисом.

Верхние горизонты диатрем сложены нацело карбонатизированными кимберлитовыми породами с утраченными текстурно-структурными признаками. Таким образом, при изучении петрографического состава установлено, что для трубок из разных кустов Хомпу-Майского поля характерно однотипное строение, обусловленное близким характером постмагматических изменений. Карбонатизация самых верхних горизонтов приводит и к уничтожению пиропы, пикроильменита и хромшпинелида, что объясняет их отсутствие в терригенных ореолах над трубками и затрудняет минералогический поиск таких тел. Можно предположить, что наличие верхних карбонатизированных горизонтов с утраченными

ми текстурно-структурными признаками является косвенным свидетельством малого эрозионного среза кимберлитовых диатрем.

Проведенные петрографические исследования подтверждают отсутствие фазовых взаимоотношений между кимберлитовыми породами в пределах исследуемых трубок. Появление фрагментированных пород с автолитоподобной текстурой обусловлено процессами постмагматической карбонатизации.

Исследование петрохимических особенностей кимберлитов Хомпу-Майского поля подтвердило, что все исследуемые объекты сложены кимберлитовыми породами, а вариации их химического состава обусловлены интенсивностью проявления процессов карбонатизации. Кимберлитовые породы диатрем обоих кустов Хомпу-Майского поля на спайдердиаграммах демонстрируют схожий спектр распределения редких элементов, что может свидетельствовать о единой для них системе кимберлитобразования. Кроме того, порфировые кимберлиты и кимберлитовые брекчии исследуемых диатрем по распределению спектра микроэлементов сопоставимы с кимберлитами группы I ЮАР. Трубки Манчары, им. Артемова и им. А.П. Смелова имеют характерные отрицательные аномалии Rb, K, Sr и Ti, которые также являются особенностью первичной кимберлитовой магмы южноафриканских кимберлитов.

Вещественная специфика кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля хорошо отражается в химическом и микроэлементном составе пород и позволяет предположить схожие условия формирования кимберлитов Центральной Якутии и Южной Африки.

Список литературы / References

1. Смелов А.П., Белоусова Е.А., Зайцев А.И., Олейников О.Б., Павлушин А.Д., Опарин Н.А. Первые данные о составе и возрасте погребенного фундамента Алданской антеклизы (Сибирская платформа): результаты датирования ксеногенного циркона из кимберлитов трубки Манчары. *Отечественная геология*. 2013; 5:68–72.
- [Smelov A.P., Belousova Ye.A., Zaytsev A. I., Oleynikov O. B., Pavlushin A. D., Oparin N.A. The first data on composition and age of buried basement of Aldan antecline (Siberian platform): results from a xenocrystic zircon from the Manchary pipe kimberlites. *Otechestvennaya geologiya*. 2013;5:68–72. (In Russ.)].
2. Зайцев А.И., Олейников О.Б., Опарин Н.А., Алтухова З.А., Бабушкина С.А. Rb-Sr изотопная геохимия и возраст кимберлитов аномалии Thm-04-11 (Хомпу-

Майское поле, Центральная Якутия). *Отечественная геология*. 2014;5:64–58.

[Zaytsev A.I., Oleynikov O.B., Oparin N.A., Altukhova Z.A., Babushkina S.A. The Rb-Sr isotope geochemistry and age of kimberlites from Tm-04-11 anomaly (Khompu-May field, Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. 2014;5:64–58. (In Russ.)].

3. Махоткин И.Л., Бекренев К.А., Кочнев В.Э., Хачатрян Г.К., Каменецкий В.С. Палеозойские Mg-Ti кимберлиты и Mg карбонатиты Менда-Барылайского алмазного района Южной Якутии – новый петрологический ключ к пониманию формирования Якутской алмазоносной провинции. *Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания*. 2021; 2:148–151.

[Makhotkin I.L., Bekrenov K.A., Kochnev V.E., Khachatryan G.K., Kamenetskiy V.S. Paleozoic Mg-Ti kimberlites and Mg carbonatites of the Menda-Barylai diamond-bearing region of South Yakutia – a new petrological key to understanding the formation of the Yakutian diamond-bearing province. *Proceedings of the 13th All-Russian Petrographic Conference*. 2021;2:148–151. (In Russ.)].

4. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия). *Отечественная геология*. 2017;5:37–44.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B., Babushkina S.A. Phlogopite from Manchary and Aprelskaya kimberlite pipes (Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. 2017; 5:37–44. (In Russ.)].

5. Oparin N., Oleynikov O. Groundmass chromspinelles from kimberlites of Khompu-May kimberlite field. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;906: 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012028>.

6. Oparin N., Oleinikov O. Barium phlogopite from kimberlite pipes of Central Yakutia. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018*. 2018;18(1.1):19–26. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.1/S01.003>.

7. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия). *Отечественная геология*. 2018; 5:35–41.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B. Chromospinelles from kimberlite pipes of the Khompu-May field (Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. 2018;5:35–41. (In Russ.)].

8. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия). *Отечественная геология*. 2019;6:43–49.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B. Picroilmenite macrocrystals from kimberlite pipes of the Khompu-May field (Central Yakutia). *Otechestvennaya geologiya*. 2019;6: 43–49. (In Russ.)].

9. Oparin N., Oleinikov O. Chromospinelles from kimberlite pipes from the Central Yakutia. *19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*

SGEM 2019. 2019;19(1.1):83–90. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/1.1/S01.011>.

10. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(3):13–24.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B., Baranov L.N. Apatite from the Manchary kimberlite pipe (Central Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(3):13–24. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-3-2>.

11. Oparin N., Oleynikov O. Picroilmenite from Kimberlite Pipes of Central Yakutia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020;609:012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/609/1/012028>.

12. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н. Минералы ряда флогопит–киношталит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(4):29–42.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B., Baranov L.N. Minerals of the phlogopite-kinoshitalite series from the groundmass of kimberlite rocks in pipes from the Khompu-May field (Central Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(4):29–42. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42>.

13. Смелов А.П., Андреев А.П., Алтухова З.А., Бабушкина С.А., Бекренев К.А., Зайцев А.И., Избеков Э.Д., Королева О.В., Мишнин В.М., Округин А.В., Олейников О.Б., Сурнин А.А. Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии. *Геология и геофизика*. 2010;51(1):153–159.

[Smelov A.P., Andreev A.P., Altukhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenov K.A., Zaytsev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Oleynikov O.B., Surnin A.A. Kimberlites of the Manchary pipe: a new kimberlite field in Central Yakutia. *Russian Geology and Geophysics*. 2010;51(1):153–159. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.012>.

14. Милашев В.А. *Трубки взрыва*. Л.: Недра; 1984. 268 с.

[Milashev V.A. *Explosion pipes*. Leningrad: Nedra; 1984. (In Russ.)].

15. Корнилова В.П., Никишов К.Н., Ковальский В.В., Зольников Г.В. *Атлас текстур и структур кимберлитовых пород*. М.: Наука; 1983. 157 с.

[Kornilova V.P., Nikishov K.N., Kovalskiy V.V., Zolnikov G.V. *Atlas of textures and structures of kimberlite rocks*. Moscow: Nauka; 1983. (In Russ.)].

16. Mitchell R.H. *Kimberlites, orangeites, and related rocks*. New York: Plenum Press; 1995.

17. Scott-Smith B.H., Nowicki T. E., Russell J. K., et al. *A glossary of kimberlite and related terms (Part 1, Part 2, Part 3)*. Vancouver: Scott-Smith Petrology Inc; 2017.

18. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности минерального состава кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля. *Арктика XXI век. Технические науки*. 2015;3(1):12–20.

[Oparin N.A., Oleynikov O.B., Zayakina N.V. The features of kimberlite rocks mineral composition of Khompumay field. *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki*. 2015; 3(1):12–20. (In Russ.)].

19. Маршинцев В.К. *Вертикальная неоднородность кимберлитовых тел Якутии*. Новосибирск: Наука; 1986. 240 с.

[Marshintsev V.K. *Vertical heterogeneity of kimberlite bodies of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1986. 240 p. (In Russ.)].

20. Holmes A.A. Contribution to the petrology of kimberlite and its inclusions. *Transactions of the Geological Society of South Africa*. 1936;39:379–428.

21. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth. *Chemical Geology*. 1995;120:223–253.

22. Le Roex A.P., Bell D.R., Davis P. Petrogenesis of group I kimberlites from Kimberley, South Africa:

Evidence from bulk-rock geochemistry. *Journal of Petrology*. 2003;44(12):2261–2286. <https://doi.org/10.1093/petrology/egg077>.

23. Каргин А.В., Голубева Ю.Ю., Кононова В.А. Кимберлиты Далдыно-Алакитского района (Якутия): Пространственное распределение пород с различными вещественными характеристиками. *Петрология*. 2011;19(5):520–545.

[Kargin A.V., Golubeva Yu.Yu., Kononova V.A. Kimberlites of the Daldyn-Alakit Region (Yakutia): Spatial distribution of the rocks with different chemical characteristics. *Petrology*. 2011;19(5):520–545. (in Russ.)].

24. Mitchell R.H. Accessory Rare Earth, Strontium, Barium and Zirconium Minerals in the Benfontein and Wesselton Calcite Kimberlites. *International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*. 1991;5:292–294. DOI: 10.29173/ikc2544.

Об авторах

ОПАРИН Николай Александрович, младший научный сотрудник, Author ID: 57035370200, Researcher ID: J-7673-2018, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, e-mail: nik3256-1989@yandex.ru

ОЛЕЙНИКОВ Олег Борисович, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Author ID: 8730610300, Researcher ID: K-1689-2048, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, e-mail: olei-oleg@yandex.ru

Аффилиация

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

About the authors

OPARIN, Nikolay Alexandrovich, Junior researcher, Author ID: 57035370200, Researcher ID: J-7673-2018, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, e-mail: nik3256-1989@yandex.ru

OLEINIKOV, Oleg Borisovich, Cand.Sci (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Author ID: 8730610300, Researcher ID: K-1689-2048, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, e-mail: olei-oleg@yandex.ru

Affiliation

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 20.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 31.10.2022

Принята к публикации / Accepted 10.11.2022

Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов

М. Д. Томшин, С. С. Гоголева✉

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

✉gogoleva_ss@mail.ru

Аннотация

Проведенное обобщение данных по химическому составу долеритов Вилуйско-Мархинского дайкового пояса (Вилуйский палеорифт) позволило выделить среди них геохимически аномальные участки по содержанию титана. Установлено, что в долеритах даек, ассоциирующих с кимберлитовыми трубками, в два раза увеличивается количество TiO_2 и ряда высокозарядных и редкоземельных элементов (Th, Ta, Hf, Y, Nb, REE.). Оказалось, что подобное поведение элементов наблюдается и в долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитов Куойкского поля (Молодинский дайковый пояс, Оленекский палеорифт). Делается вывод о парагенетической связи между увеличением содержания титана и редкоземельных элементов в долеритах и кимберлитах. Предполагается, что протокимберлиты опосредованно оказывали влияние на толеитовый расплав в момент его выплавки, что приводило к локальному обогащению толеитового расплава тугоплавкими компонентами. Слабо проявленные процессы геохимического выравнивания между высокотитанистыми и обычными базитами обеспечили локальность распространения первых. Внедрившиеся вслед за базитами кимберлиты располагались вблизи даек высокотитанистых долеритов, которые можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты. Учитывая сказанное, в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса выделено два новых участка: Тенкеляхский и Кюлянкинский, перспективные на открытие в их пределах новых кимберлитов.

Ключевые слова: Сибирская платформа, долериты, дайковый пояс высокотитанистые базиты, кимберлиты
Финансирование. Работа выполнена в рамках плана НИР ИГАБМ СО РАН и проекта РНФ (региональный конкурс) № 22-27-20151.

Для цитирования: Томшин М.Д., Гоголева С.С. Высокотитанистые долериты как новый критерий поисков кимберлитов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):499–513. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513>

High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting

M. D. Tomshin, S. S. Gogoleva✉

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

✉gogoleva_ss@mail.ru

Abstract

The generalization of data on the chemical composition of dolerites of the Vilyui-Markha dike swarm (Vilyui paleorift) made it possible to identify geochemically anomalous areas among them. We found that the amount of TiO_2 and a number of highly charged and rare earth elements (Th, Ta, Hf, Y, Nb, REE) practically doubled in the dolerites of dikes located near kimberlite pipes. Moreover, a similar behavior of elements was observed in the dolerites of dikes located near the kimberlites of the Kuoyk field (Molodo dike swarm, Olenek paleorift). Therefore, we conclude that there is a paragenetic relationship between the increase in the content of titanium and rare earth elements in dolerites and kimberlites. We assume that protokimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enrichment of the tholeiite melt with refractory components. Weakly manifested processes of geochemical alignment between high-Ti and ordinary basites ensured the locality of the distribution of the former. The kimberlites that penetrated after the basites were located near the dikes of high-titanite dolerites. Thus, the high-Ti dolerites of the dike swarms can be used as one of the criteria for the kimberlites prospecting. Considering the above, two new sections have been allocated within the Vilyui-Markha dike swarm: Tenkelyakh and Kyulyanke, with prospective for the discovery of kimberlites here. We also assume that protokimberlites indirectly influenced the tholeiite melt at the time of its melting, which led to local enrichment of the tholeiite melt in refractory components. Weakly manifested processes of geochemical alignment between high-Ti and ordinary mafic rocks ensured the local distribution of the former. The kimberlites in-

truded after the basites were located near the dikes of high-Ti dolerites. Thus, high-Ti dolerites of dike belts can be used as one of the search criteria for kimberlites. Finally two new sites have been identified within the Vilyui-Markhin dike belt: Tenkelyakhsky and Kyulyankinsky, both promising for the discovery of kimberlites here.

Keywords: Siberian platform, dolerites, dike swarm, high-Ti basites, kimberlites

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment to the DPMGI SB RAS and the RNF project (regional competition) № 22-27-20151.

For citation: Gogoleva S.S., Tomshin M.D. High-titanium dolerites as a new criterion for the kimberlite prospecting. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):499–513. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-499-513>

Введение

Вилуйско-Мархинский дайковый пояс (ВМДП) расположен на северо-западном крыле Вилуйского палеорифта и протянулся в северо-восточном направлении более чем на 700 км от верховьев р. Б. Ботуобия на юге в междуречье Тунг–Муна (на северо-востоке) (рис. 1). Основными магматическими образованиями пояса яв-

ляются дайки долеритов. Менее распространенны силлы, хонолиты и эруптивные аппараты базитового состава. Кроме долеритов в пределах пояса установлены кимберлиты, формирующие три кимберлитовых поля: Мало-Ботуобинское, Накынское и Сюльдюкарское (см. рис. 1). Формирование пояса проходило одновременно со становлением Вилуйской палеорифтовой струк-

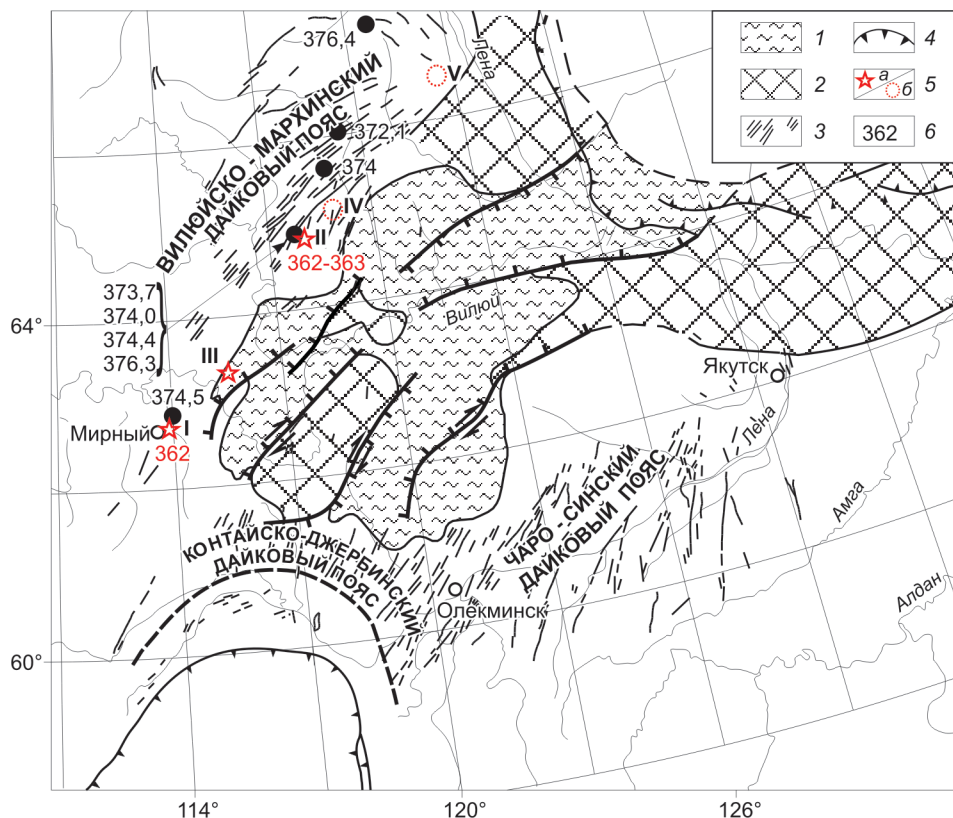


Рис. 1. Схема строения Вилуйского палеорифта по [3].

1 – рифтовая долина, выполненная терригенными отложениями мощностью до 6 км; 2 – участки наибольших поднятий; 3 – дайковые пояса; 4 – фронты фанерозойских орогенных поясов; 5 – кимберлитовые поля: а – открытые (I – Мало-Ботуобинское, II – Накынское, III – Сюльдюкарское): б – предполагаемые (IV – Тенкеляхское, V – Кюленкинское); 6 – возраст, млн лет (красное – кимберлитов, черное – базитов).

Fig. 1. The scheme of the structure of the Vilyui paleorift according to [3].

1 – rift valley formed by terrigenous deposits up to 6 km thick; 2 – areas of the largest uplifts; 3 – dike belts; 4 – fronts of Phanerozoic orogenic belts; 5 – kimberlite fields: a – open (I – Malo-Botuobinsk, II – Nakyn, III – Syuldyukar): b – assumed (IV – Tenkelyakh V – Kulenke); 6 – age, million years (red – kimberlites, black – basites).

Таблица 1

Средние химические составы (мас. %) базитов Вилуйско-Мархинского дайкового пояса

Table 1

Average chemical compositions (wt. %) of the basites of the Vilyui-Markha dyke swarm

Компонент	МИР-12	ОБ-130	ОБ-233	ОБ-288	ОБ-251	38/43	ОБ-242	50/49-17	ОБ-501	ОБ-510	ОБ-528	ОБ-566	ОБ-569	ОБ-571
SiO ₂	48,16	48,80	48,26	48,71	48,60	47,13	47,49	49,03	48,31	48,76	48,40	47,77	48,37	47,42
TiO ₂	2,32	3,20	2,32	2,81	2,33	3,55	3,78	2,93	2,62	2,94	3,06	3,62	3,16	3,37
Al ₂ O ₃	13,73	13,46	13,96	13,85	14,50	13,77	13,03	14,33	13,13	12,32	13,89	13,7	14,62	14,15
Fe ₂ O ₃	3,97	6,05	2,59	2,57	4,88	6,21	4,85	4,09	3,10	6,32	3,22	6,35	4,4	5,14
FeO	8,29	8,94	11,50	10,39	8,20	8,91	10,59	8,56	11,69	9,44	9,80	8,28	9,48	8,84
MnO	0,16	0,19	0,20	0,23	0,16	0,20	0,12	0,17	0,18	0,15	0,22	0,18	0,18	0,21
MgO	6,88	5,01	5,88	5,97	5,65	6,03	5,57	5,64	6,46	5,58	6,25	4,36	4,61	5,45
CaO	9,95	8,95	10,00	10,16	9,59	8,63	9,02	9,37	10,21	9,23	9,21	9,49	9,12	9,05
Na ₂ O	2,69	2,09	2,21	2,46	2,49	2,06	2,09	2,73	2,24	2,66	2,61	2,39	2,16	2,39
K ₂ O	0,86	1,27	1,04	0,98	1,32	1,67	1,49	1,62	0,97	1,15	1,33	1,22	1,15	1,26
P ₂ O ₅	0,27	0,60	0,31	0,33	0,29	0,35	0,52	0,33	0,29	0,41	0,35	0,4	0,34	0,42
H ₂ O	2,63	1,32	1,21	1,07	0,73	1,23	1,73	1,35	1,59	1,34	2,10	1,36	1,56	1,44
Сумма	100,00	99,89	99,58	99,53	100,0	99,73	100,2	100,1	100,4	100,3	100,5	99,12	99,15	99,16
Mg#	50	38	43	46	44	43	40	45	44	40	47	36	38	42
n	1	8	5	9	22	9	10	4	23	6	27	5	5	12

Примечание (здесь и далее в подобных таблицах). Определение порообразующих элементов проводилось классическим методом мокрой химии в лаборатории физико-химических методов анализа (ИГАБМ СО РАН); $Mg\# = Mg^{2+} \times 100 / (Mg^{2+} + 0,85 \times Fe^{2+})$, n – количество анализов.

Note (here and further in similar tables). Major oxides were analyzed by wet chemical technique at the Laboratory of Physicochemical Analytical Methods (Geology of Diamond and Precious Metals Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences); $Mg\# = Mg^{2+} \times 100 / (Mg^{2+} + 0,85 \times Fe^{2+})$; n , the number of analyses.

туры [1–3] в верхнедевонское время и, согласно изотопным данным, полученным К–Ar-, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -, Rb–Sr-, Sm/Nd-методами, укладывается в интервалы 368,5–376,3 млн лет [3–7]. Преобладают значения от 373,7 до 376,3 млн лет. Подробная характеристика долеритов пояса дана в [3–5]. В сложении интрузивов наиболее распространены призматически-офитовые габбро-долериты. По петрохимическим показателям (табл. 1) базиты пояса, как и в целом Вилуйского палео-

рифта, согласно [8], относятся к породам толеитовой серии (рис. 2, а). На диаграммах $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (содержание $\text{SiO}_2 = 47,34 - 49,20$ мас. %, суммы щелочей $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3,07 - 4,92$ мас. %, при отношении $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$) фигуративные точки частных анализов долеритов ВМДП почти поровну разделены на толеитовые и субщелочные разновидности пород [4]. Долериты характеризуются относительно высоким содержанием TiO_2 (2,48–2,60 мас. %), K_2O (0,91–2,69 мас. %) и P_2O_5

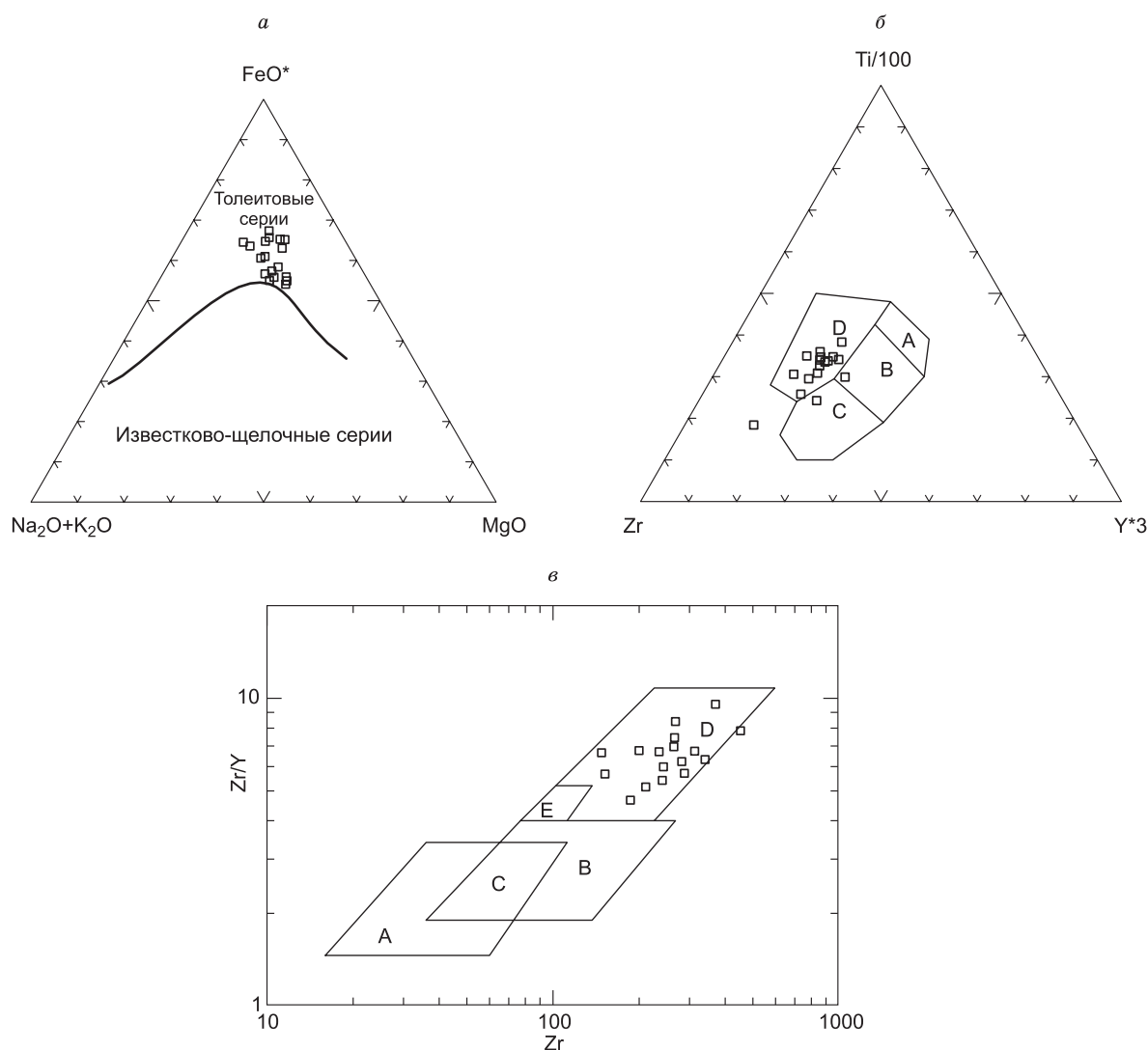


Рис. 2. Классификационные и дискриминационные диаграммы для долеритов Вилуйского палеорифта.

а – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{FeO}^* - \text{MgO}$ [8]; б – $\text{Zr} - \text{Ti} - \text{Y}$ [9] (А – толеиты островных дуг, В – базальты срединно-океанических хребтов, С – известково-щелочные базальты, Д – внутриплитные базальты); в – $\text{Zr}/\text{Y} - \text{Zr}$ [10] (А – островодужные базальты, В – базальты срединно-океанических хребтов (MORB), С – внутриплитные базальты, Д – островодужные базальты и MORB, Е – внутриплитные базальты и MORB).

Fig. 3. Classification and discrimination diagrams for dolerites of the Vilyuy paleorift.

а – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{FeO}^* - \text{MgO}$ [8]; б – $\text{Zr} - \text{Ti} - \text{Y}$ [9] (А – tholeiites of island arcs, В – basalts of mid-oceanic ridges, С – calc-alkaline basalts, Д – within-plate basalts); в – $\text{Zr}/\text{Y} - \text{Zr}$ [10] (А – island-arc basalts, В – basalts of Mid-Oceanic ridges (MORB), С – within-plate basalts, Д – island-arc basalts and MORB, Е – within-plate and MORB).

(0,29–0,41 мас. %), чем они уверенно отличаются от пермо-триасовых траппов [4, 9]. Поведение редких и рассеянных элементов рассмотрено в работе [3]. Здесь же в табл. 2 приведены значения представительных проб. Согласно дискриминационным диаграммам Дж. Пирса [10, 11], по соотношению $Zr-Ti-Y$ и $Zr/Y-Zr$ долериты Виллоуского рифта располагаются в поле внутриплитных базальтов (рис. 2, б, в).

Петрохимическая характеристика даек долеритов, расположенных вблизи кимберлитов

Изучение долеритов даек, расположенных вблизи кимберлитов Накынского поля, показало в них резкое (двукратное) увеличение содержания титана [14]. Более детальным анализом химического состава этих пород установлено, что вместе с титаном увеличивается количество Th, Ta, Hf, Y, Nd (HREE). Однако это увеличение происходит постепенно. За пределами кимберлитового поля в интрузиве Цепочный и в дайке на р. Марха (рис. 3) содержание TiO_2 равно 2,33 и 2,23 мас. %, соответствуя его нормальному содержанию для долеритов ВМДП (см. табл. 3). Внутри поля по его периферии примерно в 10 км от кимберлитов трубки Нюрбинская в интрузиве Линдакит доля TiO_2 – 2,83 мас. %. В дайках 38/43 и Усть-Ханьинская, расположенных в 3–4 км от той же трубки, – 3,14 и 3,66 мас. %, а в дайках, находящихся в непосредственной близости от трубки (на расстоянии 500–700 м от нее), уже достигает 4,45–4,65 мас. %.

Петрографические и минералогические характеристики долеритов остаются прежними. Подчеркнем лишь незначительное количественное увеличение титаномагнетита. Его доля может достигать 4–5 об. %, тогда как обычно в призматически-офитовых долеритах ВМДП она близка 2,5–3,5 об. %. Доминирует здесь титаномагнетит игольчатой и скелетной форм кристаллизации. В околотрубочных долеритах появляются зерна сфена и призмы апатита [14]. Анализ химического состава долеритов, расположенных в контурах Мало-Ботуобинского и Сьюльдюкарского кимберлитовых полей, показал тот же результат. В районе Мало-Ботуобинского поля за его пределами содержание TiO_2 в долеритах дайки, выполняющей разлом Восточный, – 2,32–3,06 мас. % (табл. 4, рис. 4). В дайке Центрального разлома за пределами контуров поля – 3,12 мас. %, а на ее южном окончании (примерно в 1 км от ким-

берлитов тр. Мир) – 3,26 мас. %. В этой же дайке, контактирующей с кимберлитовым телом, доля TiO_2 в долеритах колеблется от 3,88 мас. % до 4,17.

На Сьюльдюкарской площади в долеритах даек, вскрытых скважинами 212.5, 218/184 и 218/189 (район р. Ыгыатта), доля TiO_2 составляет от 2,01 до 2,36 мас. % – типичная для долеритов ВМДП (рис. 5, табл. 5). Южнее, в Эркютейской дайке (125Д) и в дайке, вскрытой скважиной М360, количество TiO_2 увеличивается до 3,65 и 3,49 мас. % соответственно; еще южнее, в долеритах, вскрытых скважиной 1/7, оно увеличивается до 4,43 мас. %. Юго-восточнее скв. 1/7 в 10 и 12 км от нее располагаются дайки 1/17 и Холомолохская, в которых содержание TiO_2 вновь уменьшается до рядовых значений (в первой – 2,70 и во второй – 2,31 мас. %). То есть первая и последняя группа даек находятся за пределами предполагаемого кимберлитового поля, вне зоны влияния кимберлитов. Западнее, в 12 км от дайки 1/7 в 2017 г. была открыта трубка Сьюльдюкарская, в кимберлите которой был поднят ксенолит долерита с содержанием TiO_2 6,03 мас. %.

Близкая картина в поведении выше названных элементов была отмечена и для долеритовых даек Молодинского пояса, располагающегося по южному борту Оленекского палеорифта [15]. В долеритах даек, находящихся вблизи кимберлитов Куойкского поля (рис. 7), содержание TiO_2 колеблется от 3,82 до 5,08 мас. %, а за пределами контуров поля опускается до рядовых значений – 2,25–2,47 мас. % (табл. 6).

Таким образом, видно закономерное изменение химического состава долеритов, прежде всего в поведении Ti, Th, Ta, Hf, Y, Nd в дайках, располагающихся на территориях кимберлитовых полей независимо от места положения дайковых поясов. Такое изменение возможно лишь на магматической стадии эволюции базальтового расплава. Возраст кимберлитов Накынского и Мало-Ботуобинского полей 363–364 млн лет [16]. Они возникли после становления даек ВМДП (368,5–374,4 млн лет [3, 7, 14] и не могли оказывать влияние на базиты, тем более в отсутствие прямого контакта между собой.

Обсуждение

А.И. Зайцевым по результатам изучения Rb–Sr изотопных систем кимберлитов Якутии на примере месторождений Мир, Таежное, Ботуобинское, Удачная, Айхал и др. высказывалось

Таблица 2

**Содержание петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов
в представительных пробах базитов Вилуйского рифта**

Table 2

**The content of petrogenic (wt.%) and rare (ppm) elements
in representative basite samples from the Vilyui rift**

Компонент	МИР12-4	130/Д-1	Т-68-60	ОБ-233-1	ОБ-802-7	38/43-91	ОБ-566-1	ОБ-534-4
SiO ₂	47,56	48,59	49,2	48,13	47,39	48,23	47,96	48,84
TiO ₂	3,26	3,57	2,48	2,53	4,01	2,6	3,51	3,11
Al ₂ O ₃	12,87	13,08	15,38	14,24	12,88	14,46	14,08	13,05
Fe ₂ O ₃	6,64	4,92	3,43	2,79	6,92	2,94	5,97	3,38
FeO	6,75	10,08	9,42	10,25	9,63	9,82	8,46	12,44
MnO	0,2	0,2	0,17	0,19	0,23	0,2	0,12	0,25
MgO	5,5	5,18	5,04	5,57	5,36	5,12	3,87	4,97
CaO	10,14	8,33	9,53	10,05	9,7	9,04	10,18	9,05
Na ₂ O	3,04	1,96	2,94	1,85	2,21	2,79	2,21	2,13
K ₂ O	1,86	1,37	1,32	2,69	0,91	0,99	1,15	1,15
P ₂ O ₅	0,34	0,41	0,29	0,31	0,4	0,41	0,4	0,32
H ₂ O+	1,19	1,8	0,76	0,79	0,78	2,61	1,29	1,66
Сумма	99,95	99,58	99,96	99,56	100,5	99,21	99,37	100,3
Ni	52,8	52	112	104	57	72	74	69
Co	39	44	44	40	52	39	48	48
Cr	97	89	88	100	76	44	74	54
V	307	375	321	375	434	234	306	346
Sc	26	34	31	34	37	28	35	37
Cs	0,28	—	—	—	0,39	—	0,38	0,58
Rb	26,5	36,1	23,5	29,4	19,5	25,4	23,2	28,8
Ba	312	307	259	272	202	295	305	304
Th	3,75	3,71	2,31	2,44	3,56	3,17	3,58	3,13
U	1,11	1,06	0,67	0,73	0,77	0,91	0,9	0,75
Nb	38,7	38,7	24,9	26,7	33,2	37,0	19,0	19,6
Ta	2,87	2,48	1,64	1,77	2,85	2,41	1,47	1,65
Sr	530	401	369	864	354	503	344	394
Zr	268	370	200	235	313	266	282	243
Hf	6,40	7,77	4,75	5,76	7,25	6,7	6,73	5,44
Y	32	39	30	35	46	36	45	41
Pb	25,4	—	5,2	2,9	3,0	5,1	7,6	3,0
La	36,4	34	22,5	22,6	28,3	30,2	25,9	25,4
Ce	82,2	78,2	51,5	52,5	62,9	70,0	62,7	56,4
Pr	10,2	9,88	6,71	7,05	8,35	9,19	8,17	7,09
Nd	44,2	42,4	28,6	31,5	39,6	39,8	38,2	34,4
Sm	9,24	9,14	6,48	7,35	9,74	8,86	9,03	8,11
Eu	3,03	2,93	2,04	2,23	3,06	2,95	2,67	2,63
Cd	8,59	8,83	6,35	7,36	9,86	8,55	8,74	7,51

Окончание таблицы 2

Компонент	МИР12-4	130/Д-1	Т-68-60	ОБ-233-1	ОБ-802-7	38/43-91	ОБ-566-1	ОБ-534-4
Tb	1,19	1,36	0,98	1,18	1,5	1,3	1,37	1,12
Dy	7,03	7,89	5,88	7,01	8,21	7,49	7,64	6,5
Ho	1,28	1,55	1,2	1,43	1,64	1,49	1,53	1,34
Er	3,59	4,1	3,1	3,71	4,36	3,66	4,23	3,72
Tm	0,44	0,59	0,46	0,56	0,66	0,52	0,67	0,57
Yb	2,79	3,6	2,82	3,47	3,74	3,2	4,04	3,59
Lu	0,38	0,52	0,41	0,49	0,53	0,45	0,51	0,49
Σ REE	210,6	205,0	139,0	148,4	182,5	187,7	175,5	158,9
(La/Yb) <i>n</i>	9,36	6,77	5,71	4,67	5,43	6,77	4,60	5,08
Eu/Eu*	1,04	1,00	0,97	0,93	0,95	1,04	0,92	1,03
Nb/Nb*	1,20	1,25	1,25	1,30	1,20	1,37	0,72	0,79

Примечание. Редкие элементы анализировались методом (ICP-MS) на приборе Elan 6100 DRC (ИМГРЭ, Д.З. Журавлев), анализы 1–3,13–17 на приборе ЭЛЕМЕНТ-II (ЦКП ИЗК СО РАН, С.В.Пантелеева), анализ 12 из [12]. Nb/Nb* = 0,3618×Nb/√(La·Th), Eu/Eu* = Eun/(Smn×Gdn) 0,5, *n* – значения нормированы по составу хондрита [13].

Note. Trace elements were analyzed by ICP-MS with an Elan 6100 DRC (Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Element, D.Z. Zhuravlev), analyses 1–3,13–17 were performed with an ELEMENT-II (Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, S.V. Panteleeva), analysis 12 is from [12]. Nb/Nb* = 0.3618 × Nb/√(La×Th), Eu/Eu* = Eun/(Smn × Gdn)0.5; *n*, values normalized to chondrite composition [13].

Таблица 3

Средний химический состав долеритов даек Накынского кимберлитового поля (мас. %)

Table 3

Average chemical composition of dolerite dikes of the Nakyn kimberlite field (wt. %)

Компонент	ОБ-247	Цепочечный	Линдакит	Усть-Ханьинский интрузив	38/43-30, 38/43-91	Дайки долеритов вблизи кимберлитовых трубок	
SiO ₂	47,68	48,40	46,59	47,33	47,19	47,48	46,28
TiO ₂	2,23	2,33	2,83	3,66	3,14	4,65	4,45
Al ₂ O ₃	13,35	14,16	12,45	13,18	13,12	13,91	12,69
Fe ₂ O ₃	3,83	2,56	5,52	4,74	3,03	3,47	4,05
FeO	7,54	11,26	10,18	10,63	11,44	9,66	10,68
MnO	0,31	0,20	0,17	0,12	0,20	0,15	0,16
MgO	6,92	5,61	6,66	5,46	6,01	6,02	4,95
CaO	11,67	9,81	9,34	9,04	8,08	8,83	7,40
Na ₂ O	2,72	2,31	2,18	2,11	2,46	2,87	1,96
K ₂ O	1,25	1,10	1,69	1,46	1,28	1,88	4,20
P ₂ O ₅	0,11	0,28	0,62	0,49	0,38	0,50	0,71
H ₂ O ⁺	1,94	1,36	0,93	1,72	3,16	1,96	1,24
CO ₂	–	0,13	–	0,12	0,33	–	0,41
S	0,04	–	0,10	0,04	–	0,12	0,04
F	0,07	–	0,22	0,06	–	0,08	0,24
Сумма	99,66	99,51	99,50	100,16	99,61	101,59	99,43
<i>n</i>	6	8	4	12	5	3	3

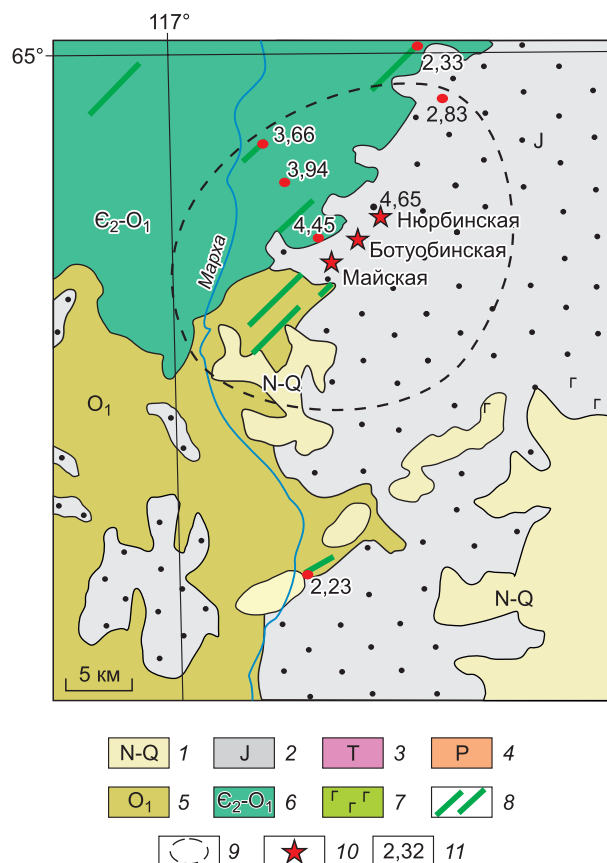


Рис. 3. Схематическая карта Накынского кимберлитового поля.

1 – неоген-четвертичные отложения; 2 – отложения юры; 3 – туфогенно-осадочные образования триаса; 4 – терригенные образования перми; 5 – карбонатные породы ордовика; 6 – нерасчлененные карбонатные породы кембрия и нижнего ордовика; 7 – пермо-триасовые траппы; 8 – среднепалеозойские дайки долеритов; 9 – условные контуры кимберлитовых полей; 10 – кимберлитовые трубки; 11 – содержание TiO_2 в долеритах.

Fig. 3. Schematic map of the Nakyn kimberlite field.

1 – Neogene-Quaternary deposits; 2 – Jurassic deposits; 3 – Tuff-sedimentary formations of the Triassic; 4 – terrigenous formations of Permian; 5 – Ordovician carbonate rocks; 6 – undifferentiated carbonate rocks of the Cambrian and Lower Ordovician; 7 – Permo-Triassic traps; 8 – Middle Paleozoic dolerite dikes; 9 – conditional contours of kimberlite fields; 10 – kimberlite pipes; 11 – TiO_2 content in dolerites.

предположение [17], что изохроны с возрастом 420 млн лет могут отвечать событиям, связанным с зарождением протокимберлитов, тогда как становление собственно кимберлитов происходило позже в позднем девоне–раннем карбоне. В [18, 19] продолжительность кимберлитового образования связывается с длительностью карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов основания литосферы и их вторич-

ным обогащением. Учитывая сказанное, логично предположить, что кимберлитовое образование могло опосредованно оказывать влияние на формирующиеся под Вилуйским палеорифтом базиты. Экспериментальными работами А.Я. Медведева [20] показано, что содержание титана в базальтовом расплаве возрастает с резким повышением давления.

Le Zhang с коллегами, проводя модельные исследования с базальтами Emeishan, показали, что базальтовые магмы с более высокими содержаниями титана и HREE могут появляться в результате частичного плавления мантийного источника типа РМ в поле устойчивости граната при более высоких давлениях, чем в случае выплавлений обычных толеитов [21].

В связи со сказанным предполагается следующее. На момент образования астеносферной базальтовой линзы, связанной с формированием Вилуйского палеорифта, протолит вторично обогащенных перидотитов, согласно [19], уже существовал. Над всплывающим диапиром протокимберлитов (см. рис. 6) формировалась зона повышенных давлений и температур, локальному воздействию которых был подвергнут выплавляющийся базальтовый расплав. Последнее способствовало поступлению в расплав более тугоплавкого компонента. Поэтому при образовании базальтов Вилуйского палеорифта возникали (локально) условия (более высокие температура и давление) для формирования высокотитанистого, обогащенного HREE толеитового расплава. Выравнивание геохимического состава между высокотитанистыми базитами и остальным расплавом было незначительным. В дальнейшем оба расплава, внедряясь в верхние горизонты земной коры, формировали дайки ВМДП, в том числе и локально, дайки высокотитанистых долеритов. Впоследствии уже по подготовленным базитами каналам поступали кимберлиты, располагаясь в поле даек долеритов с высоким содержанием титана и HREE. Таким образом, высокотитанистые долериты дайковых поясов можно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

В этой связи было просмотрено более 300 имеющихся в нашем распоряжении химических анализов долеритов ВМДП (от северного до южного его окончания). В результате в пределах ВМДП было выявлено еще два перспективных на открытие кимберлитов участка (табл. 7): один – Тенкеляхский, расположен в 20–30 км се-

Таблица 4

Химический состав долеритов даек Мало-Ботуобинского кимберлитового поля (мас. %)

Table 4

Chemical composition of dolerite dikes of the Malo-Botuobin kimberlite field (wt. %)

Компонент	MR-12	M-3	Mir-12-6	Mir-12-4	8
SiO ₂	48,16	48,14	46,86	47,56	46,39
TiO ₂	2,32	3,06	3,12	3,26	3,88
Al ₂ O ₃	13,73	13,62	12,64	12,87	14,17
Fe ₂ O ₃	3,97	1,77	7,15	6,64	3,98
FeO	8,29	11,45	7,07	6,75	9,50
MnO	0,16	0,2	0,21	0,20	0,22
MgO	6,88	6,97	5,52	5,1	5,24
CaO	9,95	8,85	9,63	10,14	9,43
Na ₂ O	2,69	1,44	3,27	3,04	2,62
K ₂ O	0,86	2,51	1,58	1,86	1,07
P ₂ O ₅	0,27	0,43	0,33	0,34	0,27
H ₂ O ⁺	0,41	0,70	1,76	1,19	0,45
ppp	2,09	0,06	—	0,74	2,33
CO ₂	0,23	—	—	0	0,22
Сумма	100,00	99,69	99,54	99,66	99,76

Примечание. MR-2 и M-3 – дайки разлома «Восточный», Мир-12-4 и Мир-12-6 дайки разлома «Центральный»; 8 – дайка, вблизи тр. Мир.

Note. MR-2 and M-3 are dikes of the «Vostochny» fault, Mir-12-4 and Mir-12-6 dikes of the «Central» fault; 8 – dike, near the Mir pipe.

вернее Накынского кимберлитового поля, а второй – Кюлянкинский, на севере ВМДП в устьевой части р. Орто-Кюлянке (рис. 8) в 100 км западнее с. Жиганск. Если для кимберлитов Тенкеляхской площади их алмазосность на сегодня не определена, то в районе р. Орто-Кюлянке кимберлиты должны быть алмазосными, поскольку в русловых отложениях р. Кюленке ниже устья р. Орто-Кюленке по данным геологов Амакинской экспедиции, известны алмазы.

В это связи представляют практический интерес долериты Чаро-Синского дайкового пояса (см. рис. 1), поскольку среди них нами выявлены участки с дайками долеритов, в которых содержание окиси титана достигает 4,0–4,5 мас. % при обычных для долеритов пояса значениях, равных 2,3–2,5 мас. %. Таким образом, предлагаемый нами метод можно уверенно использовать как один из поисковых критериев на кимберлиты.

Основные выводы

1. Установлено, что в пределах Вилуйско-Мархинского дайкового пояса присутствуют

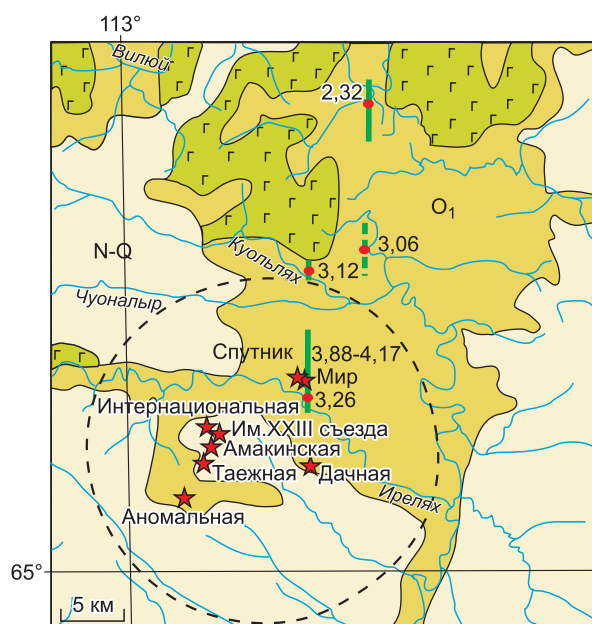


Рис. 4. Схематическая карта Мало-Ботуобинского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3.

Fig. 4. Schematic map of the Malo-Botuobin kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.

Таблица 5

**Средний химический состав долеритов даек
в районе Сюльдюкарского кимберлитового поля, мас. %**

Table 5

Average chemical composition of dolerite dikes in the area of the Syuldyukar kimberlite field, wt. %

Компонент	218/189	218/184	212,5	125/D-5	M360	1/7	1/17	16/22
SiO ₂	47,32	48,55	46,74	48,62	47,19	46,57	48,48	48,77
TiO ₂	2,36	2,01	2,02	3,49	3,65	4,43	2,70	6,03
Al ₂ O ₃	14,31	14,49	14,73	13,29	14,11	14,72	14,42	18,18
Fe ₂ O ₃	6,07	1,96	6,75	5,51	6,01	3,62	3,71	5,47
FeO	8,49	13,99	5,22	9,45	7,48	8,84	10,21	5,97
MnO	0,04	0,08	0,16	0,19	0,16	0,14	0,18	0,06
MgO	6,03	6,54	8,89	5,07	6,97	6,69	6,04	4,48
CaO	7,96	7,83	8,08	9,03	8,62	7,62	7,39	0,77
Na ₂ O	2,04	2,29	2,17	2,07	2,36	2,25	1,98	0,56
K ₂ O	1,67	1,11	1,53	1,27	1,06	2,46	3,37	3,22
P ₂ O ₅	0,32	0,23	0,24	0,65	0,37	—	—	0,59
H ₂ O ⁺	1,83	1,41	1,47	1,39	0,67	—	—	4,19
CO ₂	0,83	0,97	1,33	0,00	1,61	0,00	0,00	1,92
S _{общ}	0,09	0,28	0,25	0,06	0,13	—	—	0,11
F	0	0	0	0,08	0	—	—	0
Total	99,36	101,74	99,58	100,17	100,39	97,34	98,48	100,32
Mg#	28	50	63	38	24	48	44	42
n	2	2	2	7	1	6	6	1

Таблица 6

Средний химический состав долеритов Куойкского поля, мас. %

Table 6

Average chemical composition of dolerites of the Kuoik field, wt. %

Компонент	175	193	54	43	45	46	56	68	69	Молодинское поле
SiO ₂	46,81	48,39	47,75	49,62	48,24	48,21	50,16	48,14	48,51	48,61
TiO ₂	3,82	5,08	4,59	4,11	4,44	4,68	2,25	30,1	2,47	2,51
Al ₂ O ₃	12,85	12,46	12,11	11,34	10,78	11,48	14,83	13,54	13,52	13,29
Fe ₂ O ₃	6,53	5,88	4,44	6,62	5,51	4,30	3,80	5,05	4,40	5,10
FeO	9,75	9,82	11,84	10,02	11,64	12,44	9,42	10,25	9,94	8,63
MnO	0,18	0,18	0,19	0,13	0,18	0,18	0,18	0,22	0,21	0,16
MgO	5,68	4,65	4,70	4,30	4,55	5,02	5,17	5,21	5,59	5,50
CaO	9,77	8,61	8,64	7,88	7,71	7,39	9,45	9,39	10,24	9,30
Na ₂ O	2,11	2,39	2,21	2,55	2,19	2,38	2,34	2,48	2,45	2,62
K ₂ O	0,68	1,11	1,14	1,20	2,38	1,33	0,92	1,11	1,01	1,50
P ₂ O ₅	0,32	0,73	0,88	0,95	0,66	0,66	0,29	2,33	0,29	0,44
H ₂ O	1,56	0,65	1,75	1,18	1,34	1,43	1,36	2,08	1,85	1,90
Ррр	0,07	0,10	—	0,18	0,10	0,11	—	—	—	0,56
Сумма	100,15	100,06	100,24	100,15	99,76	99,61	100,17	100,66	100,48	100,12
N	3	1	9	3	2	2	5	5	3	35

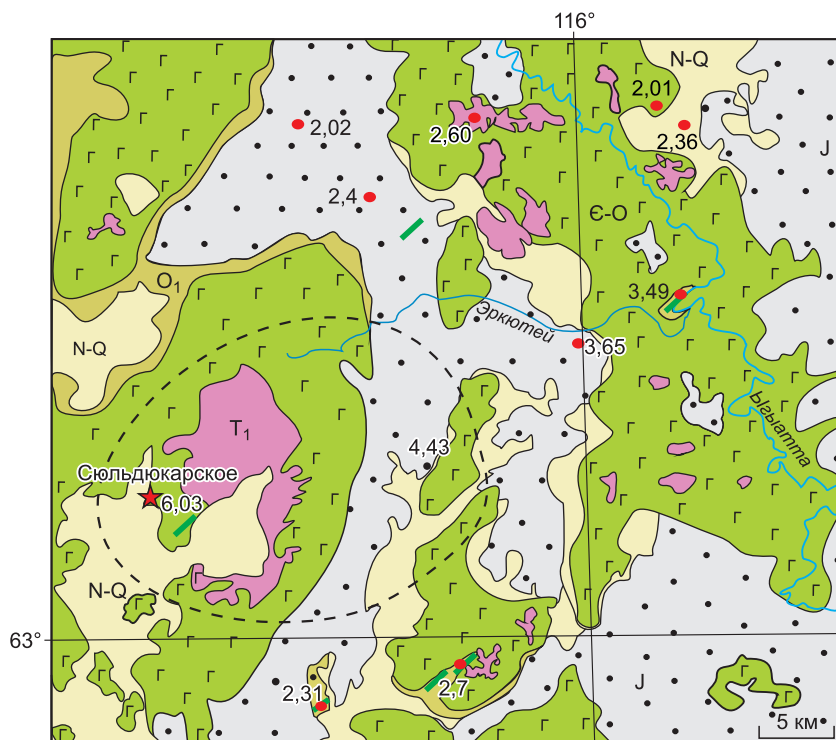


Рис. 5. Схематическая карта Сюльдюкарского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3.

Fig. 5. Schematic map of the Syuldukar kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.

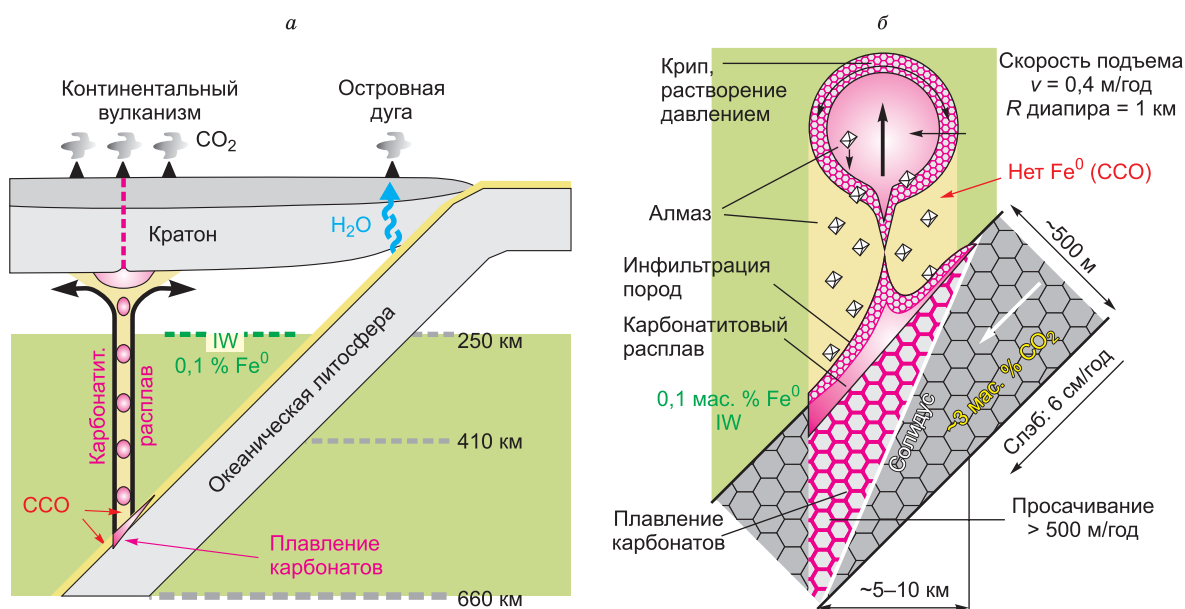


Рис. 6. Схема «большого мантийного клина» и плавления стагнирующего или простого слэба (а); модель образования и подъема карбонатитового диапира, включающая несколько этапов (б) (рисунок взят из работы [19]).

Fig. 6. The scheme of the «large mantle wedge» and melting of a stagnant or simple slab (a); a model of the formation and rise of a carbonatite diapir, including several stages (b) (the figure is taken from [19]).

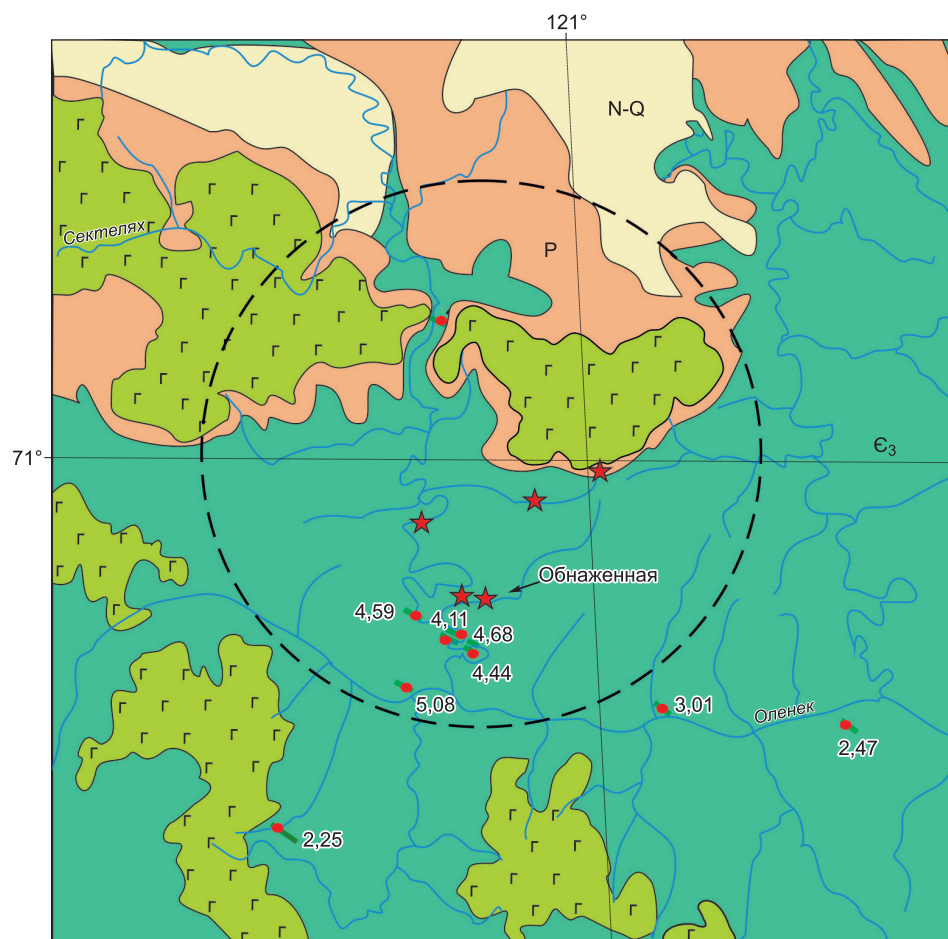


Рис. 7. Схематическая карта Куойкского кимберлитового поля. Усл. обозн. см. рис. 3.

Fig. 7. Schematic map of the Kuoyk kimberlite field. Symbols: See Fig. 3.

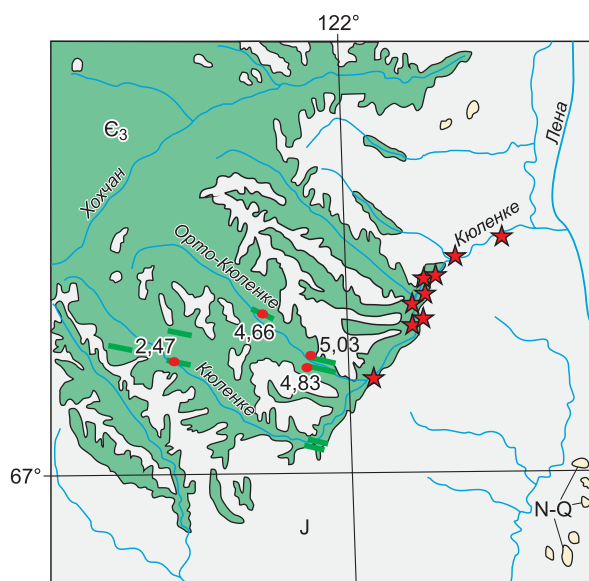


Рис. 8. Геологическая карта территории р. Кюленке.

Fig. 8. Geological map of the territory of the Kulenke river.

участки с аномально высокими содержаниями в базитах титана и ряда высокзарядных и редкоземельных элементов. Эти участки приурочены к кимберлитам.

2. Предполагается, что протокимберлиты, опосредованно воздействуя на выплавляющиеся базальты, способствуют переходу в расплав тугоплавкого реститового компонента и обогащению базальтов титаном и HREE.

3. Локальность данного процесса обусловлена незначительными (~1 км) размерами всплывающего протокимберлитового диапира и слабо проявленными процессами геохимического выравнивания между обычными и высокотитанистыми базальтовыми расплавами.

4. Возможно использование полученного критерия высокотитанистости долеритов дайковых поясов как одного из поисковых критериев на кимберлиты.

Таблица 7

Средний химический состав долеритов в районе рек Тенкелях и Орто-Кюленке, мас. %

Table 7

Average chemical composition of dolerites in the area of the Tenkelyakh and Ortho-Kulenke rivers, wt. %

Компонент	Тенкелях										Орто-Кюленке					
	114,5/82	134/42	126/79	124/45	118/71	134/37	110/35	ОВ-224	ОБ-810	ОБ-812	ОБ-801	ОБ-803	ОБ-804			
SiO ₂	49,62	47,7	48,39	48,65	48,25	49,5	46,25	47,93	48,00	47,59	48,15	48,53	48,79			
TiO ₂	2,78	3,08	2,71	2,72	2,48	2,94	4,74	2,27	4,66	5,03	4,88	2,89	2,47			
Al ₂ O ₃	14,11	13,77	14,5	14,48	13,53	14,56	14,53	13,59	13,83	14,40	14,64	13,84	14,08			
Fe ₂ O ₃	4,26	3,91	5,11	3,52	3,83	4,46	5,23	2,82	5,50	5,13	3,70	5,28	4,06			
FeO	7,71	8,72	9,60	10,69	10,75	8,14	7,70	12,01	8,10	7,52	9,13	8,18	8,85			
MnO	0,17	0,17	0,19	0,18	0,20	0,17	0,13	0,19	0,18	0,14	0,18	0,17	0,21			
MgO	5,95	5,48	4,39	4,91	6,28	5,09	5,73	6,75	5,58	5,27	6,02	6,45	6,71			
CaO	9,71	9,01	9,68	10,13	10,28	8,33	9,45	10,57	5,52	7,95	5,95	9,91	9,73			
Na ₂ O	1,87	1,40	2,04	1,98	2,01	2,51	2,29	1,85	3,06	2,03	2,6	2,18	2,12			
K ₂ O	1,04	4,21	0,82	1,05	0,52	1,76	1,45	0,63	2,21	1,54	2,13	1,18	1,3			
p ₂ O ₅	0,25	0,36	0,28	0,28	0,28	0,49	0,55	0,41	0,54	0,50	0,56	0,35	0,28			
H ₂ O+	1,09	0,95	1,08	0,81	1,13	1,20	1,25	0,41	2,04	1,50	2,05	1,04	1,4			
ppp	0,54	0,50	0,24	0,09	0,00	0,24	0,13	–	0,69	2,03	0,31	0,27	0,13			
CO ₂	0,36	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	–	–	–	–	–			
s	0,07	0,12	0,07	0,05	0,03	0,08	0,05	0,00	–	–	–	–	–			
F	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,06	0,03	–	–	–	–	–			
Сумма	99,56	99,42	99,5	99,58	99,6	99,52	99,54	100,24	100,01	100,63	100,30	100,27	100,09			
	n = 3	n = 2	n = 5	n = 3	n = 1	n = 3	n = 2	n = 3	n = 7	n = 6	n = 5	n = 7	n = 9			

Список литературы/References

1. Левашов К.К. Среднепалеозойская рифтовая система востока Сибирской платформы. *Советская геология*. 1975;10:49–58.
[Levashov K.K. Srednepaleozoyskaya riftovaya sistema vostoka Sibirskoy platformy. *Sovetskaya geologiya*. 1975;10:49–58. (In Russ.)]
2. Полянский О.П., Прокопьев А.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Ревердатто В.В. Рифтогенная природа формирования Вилюйского бассейна (Восточная Сибирь) на основе реконструкций осадконакопления и механико-математических моделей. *Геология и геофизика*. 2013;54(2):163–183.
[Polyanskiy O.P., Prokopenov A.V., Babichev A.V., Korobeynikov S.N., Reverdatto V.V. The rift origin of the Vilyui basin (East Siberia), from reconstructions of sedimentation and mechanical mathematical modeling. *Geologiya i geofizika*. 2013;54(2):163–183. (In Russ.)]
3. Томшин М.Д., Копылова А.Г., Константинов К.М., Гоголева С.С. Базиты Вилюйского палеорифта. Геохимия и последовательность становления. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1503–1518.
[Tomshin M.D., Kopylova A.G., Konstantinov K.M., Gogoleva S.S. Basites of the Vilyui paleorift: geochemistry and sequence of intrusive events. *Geologiya i geofizika*. 2018;59(10):1503–1518. (In Russ.)]
4. Олейников Б.В., Саввинов В.Т., Погудина М.А. Основные типы трапповых интрузивов среднепалеозойской и верхнепалеозойской-нижнемезозойской трапповых формаций зоны сочленения Тунгусской и Вилюйской синеклиз. *Геология и геохимия базитов восточной части Сибирской платформы*. М.: Наука; 1973:4–75.
[Oleynikov B.V., Savvinov V.T., Pogudina M.A. Osnovnye tipy trappovykh intruzivov srednepaleozoyskoy i verkhnepaleozoyskoy-nizhnemezozoysskoy trappovykh formatsiy zony sochleneniya Tungusskoy i Vilyuyskoy sinekliz. *Geologiya i geokhimiya bazitov vostochnoy chasti Sibirskoy platformy*. Moskva: Nauka; 1973:4–75. (In Russ.)]
5. Масайтис В.Л., Михайлов М.В., Селивановская Т.В. *Вулканизм и тектоника Патомско-Вилюйского авлакогена*. М.: Наука; 1975. 174 с.
[Masaytis V.L., Mikhaylov M.V., Selivanovskaya T.V. *Vulkanizm i tektonika Patomsko-Vilyuyskogo avlakogena*. Moskva: Nauka; 1975. 174 p. (In Russ.)]
6. Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): eruption at the time of Late Devonian extinction events. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010;300:239–245.
7. Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н. Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон). *Геология и геофизика*. 2014;55(2):185–196.
[Kiselev A.I., Yarmolyuk V.V., Ivanov A.V., Yegorov K.N. Middle paleozoic basaltic and kimberlitic magmatism in the northwestern shoulder of the Vilyui rift, Siberia: relations in space and time. *Geologiya i geofizika*. 2014;55(2):185–196. (In Russ.)]
8. Irvine T.N., Baragar W.R.A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canad. J. Earth Sci.* 1971;8:523–548.
9. Олейников Б.В. *Геохимия и рудогенез платформенных базитов*. Новосибирск; 1979. 264 с.
[Oleynikov B.V. *Geokhimiya i rudogenez platformennykh bazitov*. Novosibirsk; 1979. 264 p. (In Russ.)]
10. Pearce J.A., Cann J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1973;19:290–300.
11. Pearce J.A., Norry M.J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1979;69:33–47.
12. Polyansky O.P., Prokopenov A.V., Koroleva O.V., Tomshin M.D., Reverdatto V.V., Selyatitsky A.Yu., Travin A.V., Vasiliev D.A. Time correlation between the formation of dike swarms and crustal extension stages in the Middle Paleozoic Vilyui rift basin (Siberian platform). *Lithos*. 2017;282–283:45–64. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.020>
13. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. *Magmatism in ocean basins. Geol. Soc. London Spec. Publ.* 1989;42:313–345.
14. Земнухов А.Л., Зайцев А.И., Копылова А.Г., Томшин М.Д., Яныгин Ю.Т. Базитовый магматизм Усть-Ханьинского междуречья (Якутия). *Геология алмазов – Настоящее и будущее*. Воронеж; 2005: 482–494.
[Zemnukhov A.L., Zaytsev A.I., Kopylova A.G., Tomshin M.D., Yanygin Yu.T. Bazitovyy magmatizm Ust-Khaninskogo mezhdurechya (Yakutiya). *Geologiya almazov – Nastoyashchee i budushchee*. Voronezh; 2005: 482–494. (In Russ.)]
15. Томшин М.Д., Киселев А.И., Копылова А.Г. Молодинский дайковый пояс среднепалеозойских долеритов на северо-востоке Сибирской платформы. *Вестник Ир. ГТУ*. 2010;2(42):24–30.
[Tomshin M.D., Kiselev A.I., Kopylova A.G. Molodinskiy daykovyy po yas srednepaleozoyskikh doleritov na severo-vostoke Sibirskoy platformy. *Vestnik Ir. GTU*. 2010;2(42):24–30. (In Russ.)]
16. Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции. *Докл. РАН*. 2004;399(1): 95–99.
[Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Polyanichko V.V., Malkovets V.G., Sobolev N.V. Novye dannyy o vozraste kimberlitov Yakutskoy almazonosnoy provintsii. *Dokl. RAN*. 2004;399(1):95–99. (In Russ.)]
17. Зайцев А.И., Смелов А.П. *Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции*. Якутск: Офсет; 2010. 108 с.

[Zaytsev A.I., Smelov A.P. *Izotopnaya geokhronologiya porod kimberlitovoy formatsii Yakutskoy provintsii*. Yakutsk; Ofset; 2010. 108 p. (In Russ.)]

18. Agashev A.M., Ionov D.A., Pokhilenko N.P., Golovin A.V., Cherepanova Y., Sharygin I.S. Metasomatism in lithospheric mantle roots: Constraints from whole-rock and mineral chemical composition of deformed peridotite xenoliths from kimberlite pipe Udachnaya. *Lithos*. 2013;160-161:201–215. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.11.014>

19. Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н. Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом. *Геология и геофизика*. 2015; 56(1-2):361–383.

[Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Litasov K.D., Pokhilenko L.N. Carbonatite metasomatism of peridotite litho-

spheric mantle: implications for diamond formation and carbonatite-kimberlite magmatism. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):361–383 (In Russ.)]

20. Медведев А.Я., Альмухамедов А.И., Парадина Л.Ф. Растворимость титана в базальтовом расплаве (по экспериментальным данным). *Докл. РАН*. 1987; 293(5):1218–1220.

[Medvedev A.Ya., Almukhamedov A.I., Paradina L.F. Rastvorimost titana v bazaltovom rasplave (po eksperimentalnym dannym). *Dokl. RAN*. 1987; 293(5):1218–1220. (In Russ.)]

21. Le Zhang, Zhong-Yuan Rena, Handler M.R., Ya-Dong Wu, Lei Zhang, Sheng-Ping Qiana, Xiao-Ping Xia, Qing Yang, Yi-Gang Xu. The origins of high-Ti and low-Ti magmas in large igneous provinces, insights from melt inclusion trace elements and Sr-Pb isotopes in the Emeishan large Igneous Province. *Lithos*. 2019;344-345: 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.06.014>

Об авторах

ТОМШИН Михаил Дмитриевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

ГОГОЛЕВА Саргылана Семеновна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, e-mail: gogoleva_ss@mail.ru

Аффилиация

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39, Российская Федерация

About the authors

TOMSHIN, Mihail Dmitrievich, Cand. Sci (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0001-5865-7521>, e-mail: tmd@diamond.ysn.ru

GOGOLEVA, Sargylana Semenovna, Leading Engineer of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-1043-3710>, e-mail: gogoleva_ss@mail.ru

Affiliation

Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 17.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 31.10.2022

Принята к публикации / Accepted 10.11.2022

Геохимия органического вещества пород верхнеюрских отложений форланда Индигиро-Зырянского прогиба

И. Н. Зуева^{1,✉}, О. Н. Чалая¹, В. А. Каширцев^{1,2}, А. И. Сивцев³,
А. Р. Александров¹, Ю. С. Глязнецова¹, С. Х. Лифшиц¹

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

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

³Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉inzu@ipng.ysn.ru

Аннотация

Работа посвящена геохимическим исследованиям органического вещества пород по разрезу верхней юры Илин-Тасского антиклинория по естественным обнажениям и керновому материалу из зоны форланда, где верхнеюрские отложения надвинуты на меловые. В отличие от меловых и кайнозойских отложений для юрских отсутствуют материалы по органической геохимии, позволяющие оценить их нефтематеринский потенциал. Результаты геохимических исследований юрских пород аллохтона (форланда) дадут возможность прогноза материнских свойств в области автохтона под меловыми отложениями внутренней части краевого прогиба. Новые данные по составу и химической структуре битумоидов показали, что исходное органическое вещество характеризуется смешанной природой с преобладанием планктоногенного материала, способного генерировать большие количества жидких углеводородов. Преимущественно алифатический состав углеводородной части битумоидов обусловлен главным образом аквагенной природой исходного материала, на что указывают данные хромато-масс-спектрометрии по распределению насыщенных углеводородов. Вместе с тем сдвиг максимума n-алканов в высокомолекулярную область, заметное присутствие полиаренов и ароматический характер углеродного скелета смол и асфальтенов обусловлены примесью углефицированных остатков. В целом полученные результаты показали, что геохимические особенности органического вещества верхнеюрских отложений Индигиро-Зырянского бассейна позволяют их оценивать как нефтематеринские. Присутствие аллохтонных битумоидов свидетельствует о миграционных процессах, происходивших внутри юрской толщи. Это позволяет считать, что на Алазейском поднятии в области выклинивания юрских пород можно ожидать нефтяные скопления.

Ключевые слова: форланд, органическое вещество, битумоиды, углеводороды, смолы, ИК-фурье-спектрометрия, хромато-масс-спектрометрия

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

Благодарности. Авторы благодарят коллег, принимавших участие в выполнении аналитических определений. Мы также признательны рецензенту и редакторам за замечания и рекомендации, которые улучшили содержание статьи и ее восприятие.

Для цитирования: Зуева И.Н., Чалая О.Н., Каширцев В.А., Сивцев А.И., Александров А.Р., Глязнецова Ю.С., Лифшиц С.Х. Геохимия органического вещества пород верхнеюрских отложений форланда Индигиро-Зырянского прогиба. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):514–526. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-514-526>

The organic geochemistry of rocks from Upper Jurassic deposits foreland of the Indigiro-Zyryansky trough

I. N. Zueva^{1,✉}, O. N. Chalaya¹, V. A. Kashirtsev^{1,2}, A. I. Sivtsev³,
A. R. Aleksandrov¹, Yu. S. Glyaznetsova¹, S. Kh. Lifshits¹

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

²A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Novosibirsk, Russian Federation

³Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉inzu@ipng.ysn.ru

Abstract

The work is devoted to geochemical studies on the organic matter of rocks along the section of the Upper Jurassic of the Ilin-Tassky anticlinorium using natural outcrops and core material from the foreland zone, where the Upper Juras-

sic deposits were thrust over the Cretaceous. There are no materials on organic geochemistry for the Jurassic sediments in contrast to the Cretaceous and Cenozoic, that would allow us to assess their oil source potential. The results of geochemical studies of Jurassic rocks of the allochthon (foreland) will make it possible to predict the oil source properties in the autochthonous area under the Cretaceous deposits of the inner part of the trough. New obtained data on the composition and chemical structure of bitumoids showed that the initial organic matter was of a mixed nature with a predominance of planktonic material capable generating large amount of liquid hydrocarbons. The predominantly aliphatic composition of the hydrocarbon part of the bitumoids was mainly due to the aquagenic nature of the initial material, as indicated by the chromatomass spectrometry data on the distribution of saturated hydrocarbons. At the same time, the shift of the maximum of n-alkanes to the high-molecular-weight region, the noticeable presence of polyarenes, and aromatic character of the carbon skeleton of resins and asphaltenes could be due to the admixture of carbonized residues. In general, the obtained results showed that the geochemical features of the organic matter of the Upper Jurassic deposits of the Indigiro-Zyryansky basin allow them to assess as oil source. The presence of allochthonous bitumoids indicates migration processes that took place within the Jurassic strata. This suggests that oil accumulations can be expected on the Alazeysky uplift in the area of pinch-out of the Jurassic rocks

Keywords: foreland, organic matter, bitumoids, hydrocarbons, resins, IR-Fourier spectrometry, gas chromatography-mass spectrometry

Funding. This study was carried out in the framework of fundamental research program 122011200369-1 on scientific equipment of the Shared core facilities (SCF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS”, grant number 13.SCF.21.0016.

Acknowledgements. The authors are thankful all colleagues who participated in the analytical studies. We are also grateful to the editors and reviewers for the comments and recommendations, which improved the manuscript and its perception.

For citation: Zueva I.N., Chalaya O.N., Kashirtsev V.A., Sivtsev A.I., Aleksandrov A.R., Glyaznetsova Yu.S., Lifshits S.Kh. The organic geochemistry of rocks from Upper Jurassic deposits foreland of the Indigiro-Zyryansky trough. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):514–526. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-514-526>

Введение

Инди́ги́ро-Зыря́нский проги́б (ИЗП) расположен между Илин-Тасским антиклинорием Момского хребта и Алазейским поднятием. Его протяженность составляет около 500 км при ширине до 100 км. В целом ИЗП имеет структуру краевого прогиба: зона сочленения прогиба с антиклинорием (форланд) имеет чешуйчатонадвиговое строение и пологое Приалазейское (субплатформенное) крыло. Во внутреннем крыле складчато-разрывные деформации проявлены не только в нижнемеловых, но и в кайнозойских отложениях, вплоть до миоценовых. Меловые и палеоген-неогеновые толщи смяты в крутые линейные асимметричные и запрокинутые складки и нарушены взбросами и надвигами [1]. Разрез верхнемезозойских и кайнозойских отложений представлен главным образом континентальными, нередко угленосными образованиями, мощность которых нарастает к внутреннему крылу прогиба и оценивается в 5 км для верхнемезозойских и в 2,5 км для кайнозойских пород. Форланд антиклинория сложен верхнеюрскими отложениями, надвинутыми на меловые. Все исследователи отмечают, что формирование верхнеюрских осадков происходило в морских и лагунных бассейнах в восстановительных и нейтральных

обстановках диагенеза [2–4]. Органическое вещество (ОВ) осадков представлено планктонным и водорослевым материалом, в той или иной мере разбавленным детритом высшей континентальной растительности. Если степень преобразованности ОВ меловых отложений ожогинской свиты вблизи форланда достигает стадии МК₂ [1–4], то катагенетическая изменчивость ОВ верхнеюрского комплекса на территории антиклинория оценивается до стадии апокатагенеза и, возможно, начального метаморфизма. Здесь нефтематеринский потенциал мезозойских пород практически полностью исчерпан, а возможные скопления углеводородов (УВ) разрушены в результате коллизии [5, 6]. После бурения четырех параметрических скважин (рис. 1) в конце прошлого века региональные и поисковые работы в ИЗП были свернуты. Вместе с тем, если по меловым и кайнозойским отложениям имеются материалы по органической геохимии [2, 4, 6], позволяющие в первом приближении оценить их нефтематеринский потенциал, то любые, даже немногочисленные, данные по юрским породам аллохтона (форланда) дают возможность прогноза материнских свойств в области автохтона под меловыми отложениями внутренней части краевого прогиба.

Материал и методы исследования

В работе геохимическим исследованиям подверглись образцы, представляющие разрез верхней юры Илинь-Тасского антиклинория (естественные обнажения вдоль р. Индигирка, 8 образцов) и керновый материал (6 образцов) из скважины № 272-05, пробуренной в зоне форланда. Из метаморфизованных пород антиклинория не удалось экстрагировать хлороформом сколько-нибудь заметных количеств растворимого ОВ, и поэтому они из дальнейшего обсуждения исключены. Результаты исследования кернового материала скважины отражены в таблицах 1–3 и на рисунках 1–4.

Образцы пород керна скважин и естественных обнажений после дезинтеграции в шаровых мельницах экстрагировались хлороформом. Мальтеновая часть битумоидов, полученная после осаждения асфальтенов избытком петролейного эфира, исследовалась методами ИК-фурье-спектрометрии и хромато-масс-спектрометрии (ХМС) на системе, включающей газовый хроматограф

Agilent 6890, имеющий интерфейс с высокоэффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Масс-хроматограммы получены по общему ионному току (ТIC), а также сканированием по характеристическим фрагментным ионам. Идентификация индивидуальных УВ осуществлялась компьютерным поиском в библиотеках Национального института стандартов NIST05, по литературным данным и, главным образом, реконструкцией структур по характеру ионной фрагментации при электронном ударе [7].

Результаты исследований и обсуждение

Общая геохимическая характеристика образцов из скважины №272-05 приведена в табл. 1. По групповому и компонентному составу битумоидов (с учетом особенностей распределения алифатических и ароматических УВ см. табл. 2, 3 и рис. 2–4) вполне отчетливо намечаются два типа ОВ, характеризующие верхнюю часть разреза (в интервалах глубин 352–633 м) и нижнюю (641–688,2 м). В литологическом отношении эти части разреза мало чем отличаются друг от друга и представлены главным образом алевролитами, реже темными, почти черными аргиллитами с редкими прослоями серых мелкозернистых песчаников. Стратиграфически оба уровня относятся к бастакской свите верхней юры.

Содержание органического углерода в аргиллитах и алевролитах бастакской свиты обычно выше 1 % и достигает почти 4 % в основании верхнего горизонта. Битумоиды (битумы) с концентрациями выше 0,1 % обычно видны в породах в виде полосчатого насыщения, а при битумоидных коэффициентах выше 4–5 % их вполне можно относить к аллохтонным (подвижным) компонентам. В частности, подобные битумы в пермских отложениях Хараулахского форланда рассматриваются как вещественные следы миграции УВ в направлении Сибирской платформы на доколлизийном этапе развития Верхоянского бассейна.

В групповом составе битумоидов в верхней части разреза содержание масел составляет от 47 до 50 % и смол 42–45 %, заметно изменяется только количество асфальтеновых компонентов от 5 до 9,6 %. В нижней части разреза (626–682 м) возрастает количество масел до 66 % и уменьшается – смол и асфальтенов (см. табл. 1).

Результаты изучения химической структуры битумоидов верхней части разреза показали

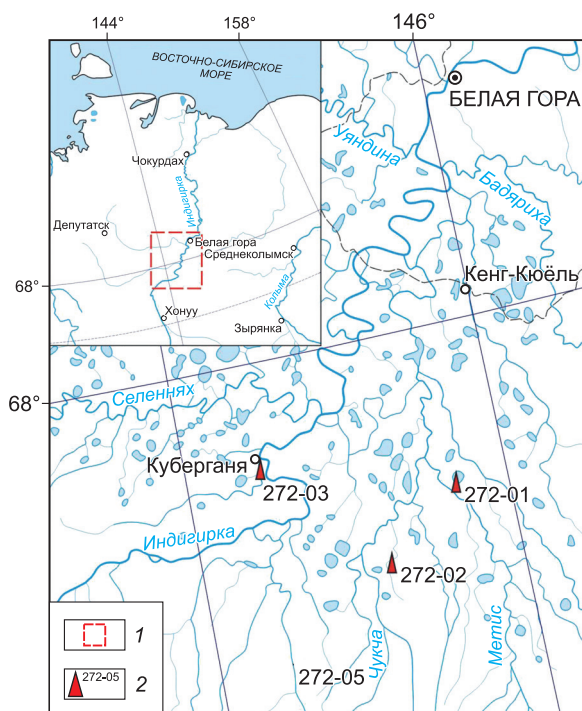


Рис. 1. Схема расположения структурно-параметрических скважин в северо-западной части Индигиро-Зырянского прогиба. 1 – место расположения объекта; 2 – структурно-параметрические скважины.

Fig. 1. Location scheme of structural-parametric wells in the northwestern part of the Indigiro-Zyryansky trough. 1 – object location; 2 – structural-parametric wells.

**Геохимическая характеристика битумоидов
из верхнеюрских отложений (Индибирская скв. 272-05)**

Table 1

**Geochemical characteristics of bitumoids
from the Upper Jurassic deposits (the Indigirskaya well 272-05)**

Номер образца Sample number	Глубина отбора, м Sampling Interval, m	CPI* CPI*	C _{орг.} , % C _{org.} , %	$\alpha_{\text{ХБ}}$, % α_{ChB} , %	$\beta_{\text{ХБ}}$, % β_{ChB} , %	Групповой состав ХБ, % Group composition ChB, %			Смолы спб/бенз Resins alk-benz/benz
						УВ HC	Смолы Resins	Асфальтены Asphaltenes	
10983	352-354	0,90	1,16	0,024	2,1	50,0	44,9	5,0	2,33
10984	416	0,99	1,11	0,016	1,5	50,2	41,7	8,0	1,21
10985	494-498	0,84	2,01	0,025	1,3	47,5	42,9	9,6	1,06
10986	626-633		3,68	0,136	3,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10987	641	0,98	2,06	0,112	5,5	66,4	30,8	2,8	1,19
10988	682-688	0,97	1,40	0,053	3,8	62,4	32,7	4,9	0,91

Примечание. * – степень зрелости органического вещества; n.d. – нет данных; ХБ – хлороформенный битумоид; УВ – углеводороды; бенз – бензольные смолы; спб – спиртобензольные смолы.

Note. * – maturity coefficient of organic matter; n.d. – no data; ChB – chloroform bitumoid; HC – hydrocarbons; benz – benzol resins; alch-benz – alcoholbenzene resins.

невысокие значения относительной оптической плотности поглощения карбонильных групп ($D_{1700}^I = D_{1700}/D_{1460}$) от 0,41 до 0,47 и низкие – (0,21) в нижней части разреза (см. рис. 2). В то же время, установлены высокие концентрации карбонильных групп в бензольных и особенно в спиртобензольных смолах. Относительные коэффициенты поглощения этих групп в спиртобензольных смолах $D_{1700}^I \geq 1$ при $D_{1700}^I > D_{1600}^I$ и в бензольных – $D_{1700}^I < 1$ при $D_{1700}^I > D_{1600}^I$ (см. рис. 2). Судя по высокому содержанию смолистых компонентов (см. табл. 1) и особенностям их химической структуры (см. рис.2), битумопроявления, вероятно, в разной степени подверглись химическому окислению [8].

В химической структуре углеводородной части битумоидов по данным ИК-фурье-спектроскопии обращает внимание существенно алифатический характер битумоидов из нижней части разреза при сравнительно незначительном содержании ароматических циклов. Преобладание здесь высокомолекулярных алифатических структур (по данным ХМС) обычно характерно для УВ, генерированных ОВ с существенной примесью высшей континентальной растительности. Не противоречат этому и отношения пристан/фитан, типичные для субокислительных обстановок диагенеза. Вместе с тем, примесь углефи-

цированных остатков могла обусловить значительное содержание ароматических циклов и в битумоидах верхней части разреза, для которых относительная оптическая плотность поглощения ароматических циклов (D_{1600}^I) составляет в среднем 0,33 по сравнению с $D_{1600}^I = 0,19$ растворимой части ОВ нижней части разреза (см. рис. 2).

Результаты исследования насыщенных УВ методом ХМС показали, что изученные образцы характеризуются преобладанием алканов нормального строения с преимущественным содержанием относительно низкомолекулярных гомологов в верхней части разреза, а в нижней – максимум сдвинут на высокомолекулярные УВ (см. табл. 2, рис. 3). Содержание изопреноидов составляет от 5,3 до 10,3 %, их соотношение с н-алканами 0,07–0,20. В составе изопреноидов основная доля 48–63 % приходится на сумму пристана и фитана.

Отношение пристан/фитан в низах разреза (1,79–2,07) типично для субокислительных обстановок диагенеза, а вверху (0,61–0,94) – для восстановительных. Судя по значениям отношений пристана и фитана к рядом элюирующимся н-алканам nC_{17} и nC_{18} (<1), ОВ, по-видимому, не подвергалось существенным бактериальным изменениям [9–11]. Коэффициент отношения нечетных алканов к четным (CPI), близкий к еди-

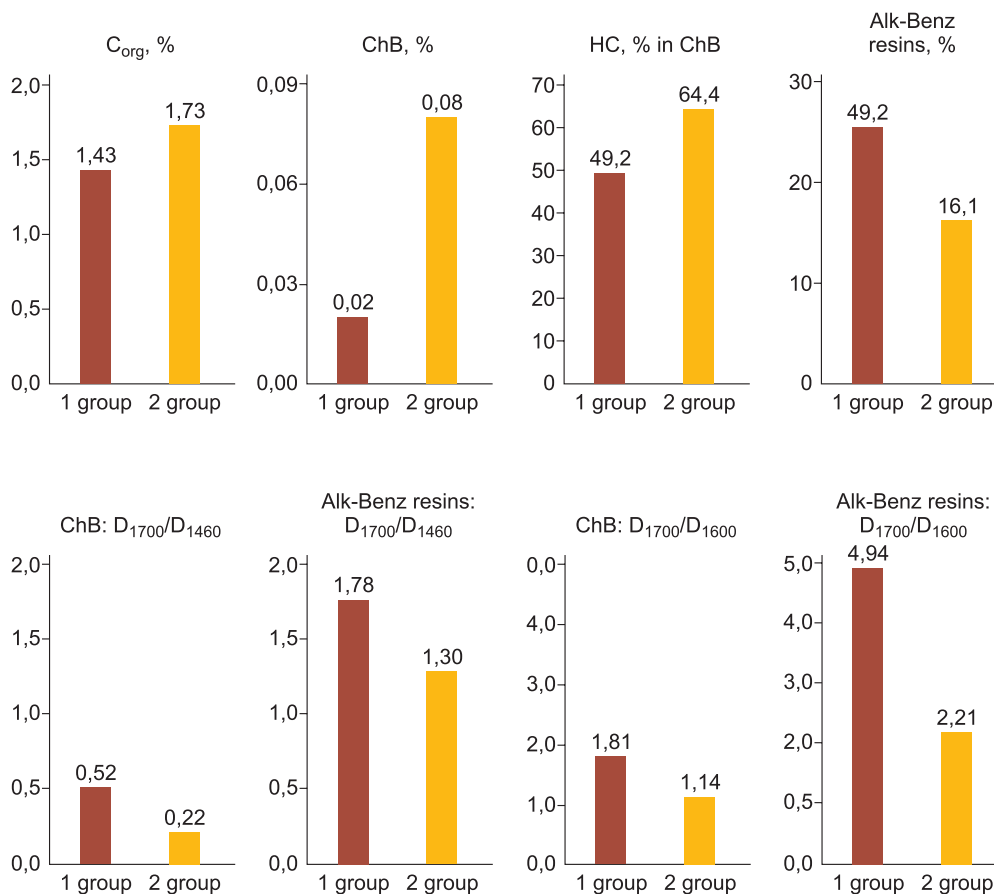


Рис. 2. Средние значения геохимических параметров битумоидов из верхнеюрских отложений

1 группа – верхняя часть разреза, обр. 10983 – 10986, 2 группа – нижняя часть разреза обр. 10987 и 10988, ChB – содержание хлороформенного битумоида; HC – содержание углеводородов, Alk-Benz – содержание спиртобензольных смол, D_{1460} – относительная оптическая плотность поглощения метиленовых и метильных групп; D_{1700} – относительная оптическая плотность поглощения карбонильных групп, D_{1600} – относительная оптическая плотность поглощения ароматических циклов.

Fig. 2. Average values of geochemical parameters of bitumoids for two groups samples from the Upper Jurassic deposits.

1 group – the top part of the section, the samples: 10983–10986; 2 group – the bottom part of the section, the samples: 10987 and 10988; ChB – chloroform bitumoid; HC – hydrocarbons; Alk-Benz – alcohol-benzol resins; D_{1460} – relative absorbance of methylene and methyl groups; D_{1700} – relative absorbance of carbonyl group; D_{1600} – relative absorbance of aromatic rings.

нице (0,84–0,99), указывает на высокую катагенетическую зрелость ОВ.

Данные ИК-фурье-спектрометрии и ХМС по индивидуальному составу показали, что состав и характер распределения ароматических УВ верхней части разреза принципиально не отличаются от нижней (см. табл. 3). Единственное, что их различает, это существенная разница в концентрациях фракций АУ на общее количество масел. Состав и особенности распределения ароматических УВ зависят как от исходного ОВ (ретен, например, типичен для хвойных растений), так и от интенсивности диагенетических и катагенетических преобразований [12–14]. В ряде работ рассматриваются процессы образо-

вания полициклических аренов планктоногенным ОВ в зависимости от условий диагенеза и катагенеза [15–17]. Значения метилфенантренового индекса 1,79–1,94, как и CPI, свидетельствуют о существенном, почти апокатагенетическом преобразовании ОВ (см. табл. 3). Индекс рассчитывается как соотношение концентраций термодинамически устойчивых β -замещенных метилфенантренов (2-метилфенантренов и 3-метилфенантренов) к концентрациям собственно фенантрена и его α -замещенных структур [18]. Количество нафталиновых УВ невелико, среди них преобладают диметилзамещенные гомологи. Для β - и α -метилнафталинов прослеживается та же направленность в изменениях соотноше-

ний изомеров, как и в фенантренах. Присутствие перилена, пиреновых, бензпиреновых и хризеновых структур обычно указывает на участие остатков высшей растительности в общем составе исходного ОБ [20–23].

Химическая структура смол и асфальтенов также несет генетическую информацию об исходной органике [29–31]. В частности, уста-

новлена высокая ароматичность углеродного скелета усредненной молекулы смолистой части битумоидов: $D_{1600}^I = 0,15 \rightarrow$ бензольные смолы: $D_{1600}^I = 0,65 \rightarrow$ спиртобензольные смолы: $D_{1600}^I = 0,64 \rightarrow$ асфальтены: $D_{1600}^I = 0,73$ (см. рис. 2).

Геохимическая картина формирования верхнеюрских отложений Индигиро-Зырянского бассей-

Таблица 2

Индивидуальный состав насыщенных углеводородов масляных фракций битумоидов верхнеюрских отложений (Индигирская скв.272-05)

Table 2

Individual composition of saturated hydrocarbons of oil fractions of bitumoids from the Upper Jurassic deposits (Indigirskaya well 272-05)

Параметры Parameters	Номер образца Sample number				
	10983	10984	10985	10987	10988
Интервал отбора, м Sampling interval, m	352–354	416	494–498	641	682–688
Групповой состав алкановых УВ, % на $\sum$ идентифицированных алканов: n-алканы Group composition of alkane-HC on $\sum$ identified alkanes: n-alkanes	50,36	48,15	51,40	74,88	68,68
Изопреноиды Isoprenoids	10,32	8,52	9,58	5,30	8,44
2-и 3-метилалканы 2-and 3methylalkanes	39,32	43,33	39,02	19,82	22,88
12- и 13-метилалканы 12-and 13methylalkanes	отс.	отс.	отс.	отс.	отс.
$\sum \text{n.k.-nC}_{20} / \sum \text{nC}_{21-\text{к.к}}$ $\sum \text{b.b.-nC}_{20} / \sum \text{nC}_{21-\text{e.b.}}$	2,98	1,74	2,15	1,09	1,17
Максимум n-алканов Max. n-alkanes	nC ₁₃ , nC ₁₄	nC ₁₆	nC ₁₆	nC ₁₈ , nC ₁₉ , nC ₂₀	nC ₁₅ , nC ₁₆
Коэфф. нч/ч по всему ряду (CPI) Coefficient odd/even along whole row	0,90	0,99	0,84	0,98	0,97
Изопреноиды/n-алканы Isoprenoids/n-alkanes	0,20	0,17	0,18	0,07	0,12
Пристан/фитан Pristan/phytan	0,61	0,64	0,94	1,79	2,07
Пристан/норпристан Pristan/norpristan	1,38	1,46	1,40	1,31	1,49
iC ₁₉ /nC ₁₇	0,55	0,59	0,61	0,34	0,58
iC ₂₀ /nC ₁₈	0,66	0,71	0,52	0,17	0,27
(iC ₁₉ +iC ₂₀)/(nC ₁₇ +nC ₁₈)	0,61	0,66	0,56	0,25	0,54
(iC ₁₉ +iC ₂₀)/ $\sum$ (iC ₁₅ -iC ₁₈)	1,36	2,17	1,89	1,27	1,03

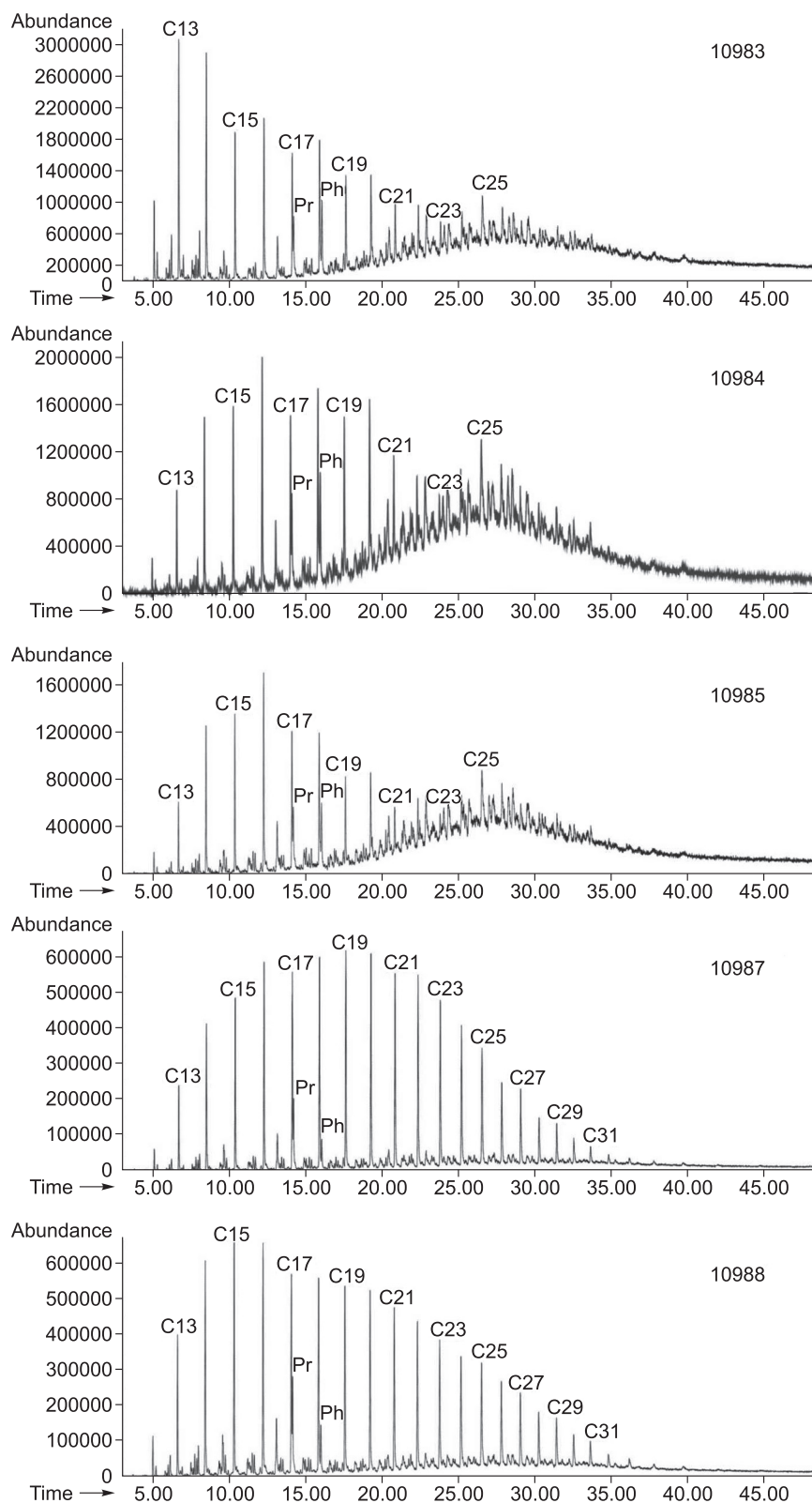


Рис. 3. Масс-фрагментограммы по иону m/z 57 насыщенных углеводородов в битумоидах верхнеюрских отложений.

Fig. 3. Mass fragmentograms by ions m/z 57 of saturated hydrocarbons in the bitumoids of the Upper Jurassic deposits.

Таблица 3

**Индивидуальный состав ароматических углеводородов масляных фракций
в битумоидах верхнеюрских отложений (Индигирская скв.272-05)**

Table 3

**Individual composition of aromatic hydrocarbons of oil fractions of bitumoids
from the Upper Jurassic deposits (Indigirskaya well 272-05)**

Пик Peak	Параметры Parameters	Номер образца Sample number				
		10983	10984	10985	10987	10988
	Интервал отбора, м Sampling interval, m	352–354	416	494–498	641	682–688
	Ароматические УВ, % на масла Aromatic HC, % in oil fraction	27,91	33,33	35,17	7,84	8,31
Нф Nph	Нафталин Naphtalene	0,18	0,18	0,23	0,05	0,05
Мнф Mnph	Метилнафталины (сумма) Methylnaphtalenes (sum)	0,31	0,32	0,39	0,09	0,09
Дмнф Dmnph	Диметилнафталины (сумма) Dimethylnaphtalenes (sum)	0,91	0,93	1,15	0,26	0,27
Тмнф Tmnph	Триметилнафталины (сумма) Trimethylnaphtalene (sum)	0,39	0,40	0,49	0,11	0,12
Ф Ph	Фенантрэн Phenanthrene	4,72	4,91	6,06	1,35	1,43
3-мф 3-mph	3-метилфенантрэн 3-methylphenanthrene	2,61	2,86	3,62	0,73	0,78
2-мф 2-mph	2-метилфенантрэн 2-methylphenanthrene	4,72	4,81	5,95	1,53	1,50
9-мф 9-mph	9-метилфенантрэн 9-methylphenanthrene	0,65	0,66	0,82	0,18	0,19
1-мф 1-mph	1-метилфенантрэн 1-methylphenanthrene	0,76	0,78	0,96	0,21	0,23
Дмф Dmph	Диметилфенантрены (сумма) Dimethylphenanthenes (sum)	4,49	4,58	5,66	1,26	1,34
Тмф Tmph	Триметилфенантрены (сумма) Trimethylphenanthenes (sum)	1,22	1,24	1,54	0,34	0,36
Пир Pyg	Пирен Pyrene	0,69	0,70	0,87	0,19	0,21
Хрз Chrs	Хризен Chrysene	2,58	2,63	3,25	0,72	0,77
Бзп Bzp	Бензопирен Benzopyrene	2,13	2,17	2,58	0,60	0,63
Прл Prl	Перилен Perylene	0,97	0,99	1,22	0,27	0,29

Пик Peak	Параметры Parameters	Номер образца Sample number				
		10983	10984	10985	10987	10988
Инп Inp	Инденопирен Indenopylene	0,49	0,50	0,62	0,14	0,15
МФИ MPHI	Метилфенантроновый индекс * Mehtylphenantheren index	1,79	1,81	1,83	1,94	1,84

$$\text{МФИ}^* = 1,5 \cdot (3\text{-мф} + 2\text{-мф}) / (\Phi + 9\text{-мф} + 1\text{-мф})$$

$$\text{MPHI}^* = 1,5 \cdot (3\text{-mph} + 2\text{-mph}) / (\text{Ph} + 9\text{-mph} + 1\text{-mph})$$

на в целом достаточно хорошо совпадает с общегеологической характеристикой фаций [24–26] и свидетельствует о прибрежно-морских условиях накопления осадков, когда относительно подвижная среда литорали сменилась застойными условиями лагуны и накоплением смешанного план-

ктонно-водорослевого ОВ с фрагментами континентальной флоры.

Заключение

Нефтегазоносность краевых прогибов во многом определяется целым рядом особенностей их

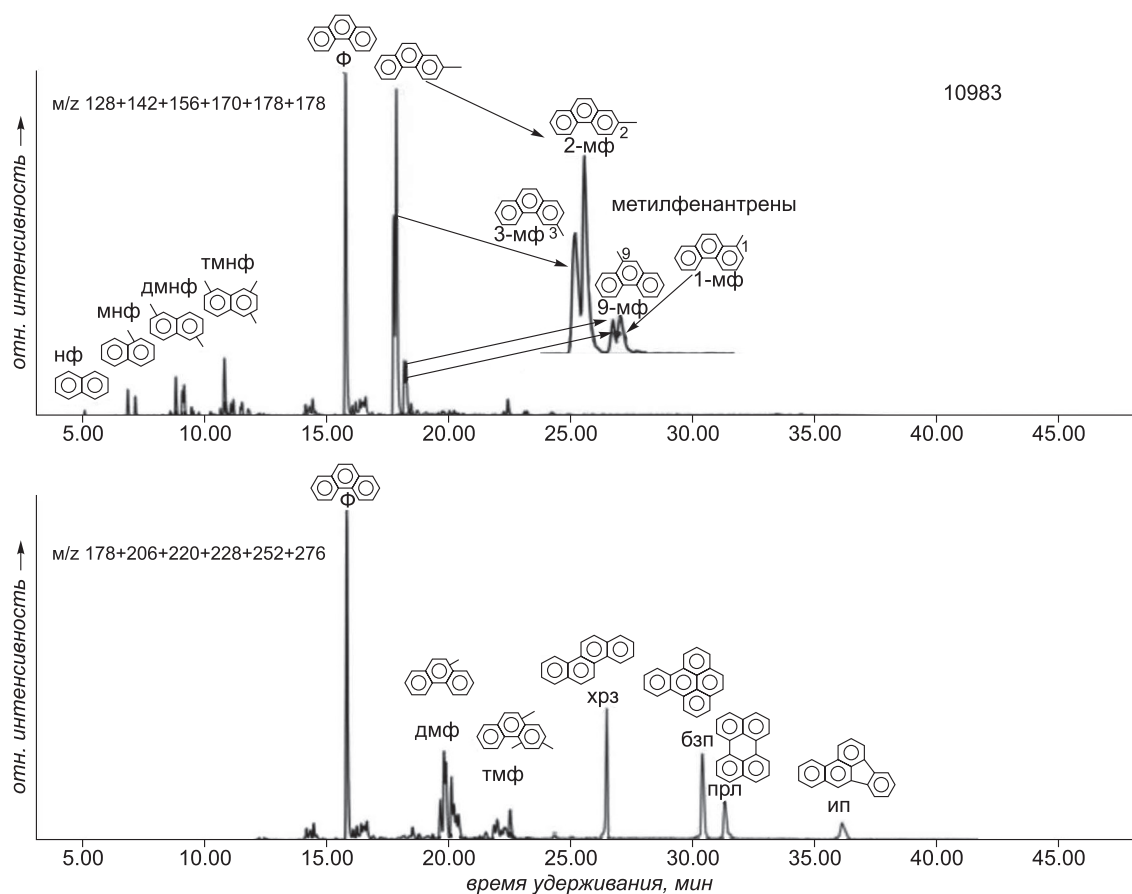


Рис. 4. Синтетические масс-хроматограммы (по фрагментным ионам), характеризующие распределения ароматических углеводородов во фракции масел пробы 10983.

Fig. 4. Synthetic mass chromatograms (by fragment ions) characterizing the distribution of aromatic hydrocarbons in oil fraction of sample 10983.

развития и главным образом геодинамикой. На раннем этапе на краю кратона формируется пассивная континентальная окраина, открывающаяся в обширный морской бассейн. Отложения формируют определенный наклон в сторону кратона, а возрастающая мощность осадков по направлению к открытому морю позволяет достичь термобарических условий главной зоны нефтеобразования. Наклон пород и разность геостатических давлений определяют элизионную миграцию флюидов в сторону кратона, дающую в ряде случаев уникальные скопления УВ. Пример тому битумные месторождения Западно-Канадского прогиба (Атабаска, Колд-Лейк и др.) и Оленекское и Мунское месторождения на платформенном крыле Предверхооянского прогиба [10, 27]. Коллизионные (складчатые и горообразовательные) процессы по существу завершают процессы нефтеобразования и ведут к частичному разрушению скоплений в области форланда.

Геохимические особенности верхнеюрских отложений Индигиро-Зырянского бассейна вполне позволяют их оценивать как нефтематеринские, а наличие аллохтонных битумоидов свидетельствует о миграционных процессах, происходивших внутри юрской толщи. Поэтому есть все основания считать, что на Алазейском поднятии в области выклинивания юрских пород мы вправе ожидать нефтяные скопления.

Список литературы / References

1. Гайдук В.В., Слюдюков И.Ш., Гриненко О.В., Имаев В.С. Структура и нефтегазоносность кайнозойского Индигиро-Зырянского прогиба. *Тектоника и нефтегазоносность Якутии*. ЯФ СО РАН. Якутск; 1989:75–87.

[Gaiduk V.V., Syundyukov I.Sh., Grinenko O.B., Imayev V.S. Structure and oil and gas potential of the Cenozoic Indigiro-Zyryansk trough. *Tectonics and oil and gas potential of Yakutia*. YaF SO RAN. Yakutsk; 1989: 75–87 (In Russ.)]

2. Иванов В.В., Клубов Б.А. *Нафтиды и нафтоиды Северо-Востока СССР*. М.: Наука; 1979. 147 с.

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

3. Слюдюков И.Ш., Гайдук В.В. Историко-генетические предпосылки нефтегазоносности Индигиро-Зырянского прогиба. *Нефтегазоносность и вопросы освоения месторождений нефти и газа Якутии*. ЯФ СО РАН. Якутск; 1990:39–49.

[Syundyukov I.Sh., Gaiduk V.V. Historical and genetic prerequisites for the oil and gas potential of the Indigiro-Zyryansk trough. *Oil and gas potential and is-*

sues of development of oil and gas fields of Yakutia. YaF SO RAN. Yakutsk; 1990:39–49. (In Russ.)]

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

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

5. Чочиа Н.Г., Баранова З.Е., Вольнов Д.А. Перспективы нефтегазоносности Зырянского прогиба. *Тектоника и нефтегазоносность востока СССР*. ВНИГРИ. Вып. 309. Л.; 1972:133–150.

[Chochia N.G., Baranova Z.E., Vol'nov D.A. et al. Prospects of oil and gas potential of the Zyryansk trough. *Tectonics and oil and gas potential of the East of the USSR*. VNIGRI. Issue 309. L.; 1972:133–150. (In Russ.)]

6. Иванов В.В., Семенов Г.А., Гаврилов Б.П., Клубов Б.А., Балыкина Е.П. Литолого-битуминологическая характеристика юрских и меловых отложений Индигиро-Зырянского прогиба. *Проблемы нефтегазоносности Северо-Востока СССР*. 1973;49:108–129.

[Ivanov V.V., Semenov G.A., Gavrilov B.P., Klubov B.A., Balykina E.P. Lithological and bituminological characteristics of Jurassic and Cretaceous deposits of the Indigiro-Zyryansk trough. *Problems of oil and gas potential of the North-East of the USSR*. 1973;49:108–129. (In Russ.)]

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

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

8. Головкин А.К., Горбунова Л.В., Камьянов В.Ф. Закономерности в структурно-групповом составе высокомолекулярных гетероатомных компонентов нефтей. *Геология и геофизика*. 2010;51(3):364–374.

[Golovko A.K., Gorbunova L.V., Kam'yanov V.F. Regularities in the structural and group composition of high-molecular heteroatomic components of oils. *Geology and geophysics*. 2010;51(3):364–374. (In Russ.)]

9. Петров Ал.А. *Углеводороды нефти*. М.: Наука; 1984. 264 с.

[Petrov Al.A. *Hydrocarbons of oil*. М.: Nauka; 1984. 264 p. (In Russ.)]

10. Каширцев В.А. *Органическая геохимия нафтидов востока Сибирской платформы*. Якутск: ЯФ СО РАН; 2003. 160 с.

[Kashircev V.A. *Organic geochemistry of naphthides of the East of the Siberian platform*. Yakutsk: YaF SO RAN; 2003. 160 p. (In Russ.)]

11. Петров Ал.А. *Химия алканов*. М.: Наука; 1974. 243 с.
[Petrov Al. A. *Chemistry of alkanes*. М.: Nauka; 1974. 243 p. (In Russ.)]
12. Hauke V., Adam P., Trendel J.M. Isoarborinol through geological times: evidence for its presence in the Permian and Triassic. *Organic Geochemistry*. 1995; 23:91–93.
13. Borrego A.G., Blanco C.G., P'ttmann W. Geochemical significance of the aromatic hydrocarbon distribution in the bitumens of the Puertollano oil shales. Spain. *Organic Geochemistry*. 1997;26:219–228.
14. Каширцев В.А., Парфенова Т.М., Головки А.К., Никитенко Б.Л., Зуева И.Н., Чалая О.Н. Биомаркеры-фенантроны в органическом веществе разновозрастных отложений и нефтях Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1720–1729. DOI: 10.15372/GiG20181013
[Kashircev V.A., Parfenova T.M., Golovko A.K., Nikitenko B.L., Zueva I.N., Chalaya O.N. Biomarkers – phenanthrenes in organic matter of deposits of different ages and oils of the Siberian platform. *Geology and Geophysics*. 2018;59(10):1720–1729. DOI: 10.15372/GiG20181013. (In Russ.)]
15. Azevedo D.A., Aquino Neto F. R., Simoneit B. R. T., Pinto A. C. Novel series of tricyclic aromatic terpanes characterized Tasmanian tasmanite. *Organic Geochemistry*. 1992;18:9–16.
16. Парфенова Т.М., Коровников И.В., Эдер В.Г., Меленевский В.Н. Органическая геохимия синской свиты нижнего кембрия (северный склон Алданской антеклизы). *Геология и геофизика*. 2017;5:723–738. DOI: 10.15372/GiG20170504.
[Parfenova T.M., Korovnikov I.V., Eder V.G., Melenevskij V.N. Organic geochemistry of the Sin formation of the Lower Cambrian (northern slope of the Aldan antecline). *Geology and Geophysics*. 2017;5:723–738. DOI: 10.15372/GiG20170504. (In Russ.)]
17. Парфенова Т.М. Геохимия стеранов и триароматических стероидов битумоидов иниканской свиты кембрия (юго-восток Сибирской платформы). *Химия нефти и газа: Материалы Международной конференции*. Томск; 2015:69–74.
[Parfenova T.M. Geochemistry of stepanov and triaromatic steroids of bitumoids of the Inican formation of the Cambrian (south-east of the Siberian platform) *Chemistry of oil and gas: Proceedings of the International Conference*. IOA SB RAS. Tomsk; 2015:69–74. (In Russ.)]
18. Radke M. Application of aromatic compounds as maturity indicator in source rocks and crude oils. *Mar. Petr. Geol.* 1988;5:224–236.
19. Laflamme R.E., Hites R.A. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1978; 42:289.
20. Борисова Л.С., Фурсенко Е.А. Влияние процессов биodeградации на состав и строение асфальтенов нефтей Западной Сибири. *Георесурсы*. 2018;(4): 301–307. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2018.4.301-307>
[Effect of biodegradation processes on the composition and structure of asphaltenes in West Siberian oils. *Georesursy*. 2018;(4):301–307. In Russ.] DOI:10.18599/grs.2018.4.301-307
21. Borisova L.S. The origin of asphaltenes and main trends in evolution of their composition in during lithogenesis. *Petroleum Chemistry*. 2019;59(10):1118–1123. DOI: 10.1134/S0965544119100037.
22. Борисова Л.С. *Геохимия асфальтенов и смол рассеянного органического вещества пород и нефтей юры и нижнего мела Западно-Сибирского бассейна*: Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск; 2020. 36 с.
[Borisova L.S. *Geochemistry of asphaltenes and resins of dispersed organic matter of rocks and oils of the Jurassic and Lower Cretaceous of the West Siberian basin*: Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Novosibirsk. 2020. 36 p. (In Russ.)]
23. Парфенова Т.М. Новые сведения о геохимии порфиринов, смол и асфальтеновых компонентов битумоидов куонамской свиты кембрия (северо-восток Сибирской платформы). *Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций*. Томск; 2018. С. 696. DOI: 10.17223/9785946217408/445
[Parfyonova T.M. New information on the geochemistry of porphyrins, resins and asphaltene components of bitumoids of the Kuonam formation of the Cambrian (northeast of the Siberian platform). *Promising materials with a hierarchical structure for new technologies and reliable structures*. Tomsk; 2018. P. 696 (In Russ.)]. DOI: 10.17223/9785946217408/445
24. Гайдук В.В. *Реконструкция структуры надвиговых поясов и локальная оценка их нефтегазоносности на примере Индигиро-Зырянского, Предверхоханского прогибов и Нюйско-Джербинской впадины*: Автореф. дисс. д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск. 1995. 37 с.
[Gaiduk V.V. *Reconstruction of the structure of thrust belts and local assessment of their oil and gas potential on the example of the Indigiro-Zyryansky, Predverkhoyansky troughs and the Nyuysko-Dzherba depression*. Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Novosibirsk; 1995. 37 p. (In Russ.)]
25. Сивцев А.И., Чалая О.Н., Зуева И.Н. Верхнеюрско-нижнемеловой нефтегазоносный комплекс востока Сибирской платформы. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2018;1:81–87. DOI 10.20403/2078-0575-2018-1-81-87.
[Sivtsev A.I., Chalaya O.N., Zueva I.N. Upper Jurassic-Lower Cretaceous oil and gas complex of the east of the Siberian platform. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*. 2018; 1:81–87. (In Russ.)]. DOI 10.20403/2078-0575-2018-1-81-87
26. Сивцев А.И., Александров А.Р., Алексеев В.А. Литологическая характеристика северо-западной части Индигиро-Зырянского прогиба. *Геология и мине-*

раально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции. Якутск: ИМЗ СО РАН. 2018;1:175–178.

[Sivtsev A.I., Aleksandrov A.R., Alekseev V.A. Lithological characteristics of the northwestern part of the Indigiro-Zyryansky trough. Geology and mineral resources of the North-East of Russia: *Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2018. Ya-

kutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 2018; 1:175–178. (In Russ.)]

27. Kashirtsev V.A., Hein F.J. Overview of natural bitumen fields of the Siberian platform, Olenek uplift, Eastern Siberia, Russia. F. J. Hein, D. Leckie, S. Larter, and J. R. Suter, eds. Heavy-oil and oil-sand petroleum systems in Alberta and beyond. *AAPG Studies in Geology*. 2012;64:509–529.

Об авторах

¹ЗУЕВА Ираида Николаевна, ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, Researcher ID: J-9373-2018; <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, e-mail: inzu@ipng.ysn.ru

¹ЧАЛАЯ Ольга Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Researcher ID: J-9329-2018; <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, e-mail: oncha@ipng.ysn.ru

^{1,2}КАШИРЦЕВ Владимир Аркадьевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Researcher ID: N-1655-2014, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, e-mail: KashirtsevVA@ipgg.sbras.ru

³СИВЦЕВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Researcher ID: F-1077-2014, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>, e-mail: maraday@yandex.ru

²АЛЕКСАНДРОВ Александр Романович, научный сотрудник, Researcher ID: AAD-8376-2021, <https://orcid.org/0000-0001-6459-8951>, e-mail: sutuka1956@mail.ru

²ГЛАЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, Researcher ID: J-9714-2018, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, e-mail: glyaz1408@mail.ru

²ЛИФШИЦ Сара Хаимовна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Researcher ID: K-1438-2018, <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>, e-mail: shlif@ipng.ysn.ru

Аффилиация

¹Институт проблем нефти и газа, Сибирское отделение РАН, 677980, г. Якутск, ул. Петровского, 2, Российская Федерация

²Институт нефтяной геологии и геофизики, Сибирское отделение РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Российская Федерация

³Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677013, г. Якутск, ул. Кулаковского, 50, Российская Федерация

About the authors

¹ZUEVA, Iraida Nikolaevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Researcher ID: J-9373-2018, <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, e-mail: inzu@ipng.ysn.ru glyaz1408@mail.ru

¹CHALAYA, Olga Nikolaevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Researcher ID: J-9329-2018; <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, e-mail oncha@ipng.ysn.ru

^{1,2}KASHIRCEV, Vladimir Arkadievich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Corresponding Member of RAS, Chief Researcher, Researcher ID: N-1655-2014, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, e-mail KashirtsevVA@ipgg.sbras.ru

³SIVTSEV, Aleksei Ivanovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher ID: F-1077-2014, <https://orcid.org/0000-0001-8386-2383>, e-mail: maraday@mail.ru

²ALEKSANDROV, Alexander Romanovich, Researcher, Researcher ID: AAD-8376-2021; <https://orcid.org/0000-0001-6459-8951>, e-mail: sutuka1956@mail.ru

²GLYAZNETSOVA, Yuliya Stanislavovna, Cand. Sci. (Chemistry), Head of the Laboratory, Researcher ID: J-9714-2018; <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, e-mail: glyaz1408@mail.ru

²LIFSHITS, Sara Khaimovna, Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, Researcher ID: K-1438-2018; <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>; e-mail: shlif@ipng.ysn.ru

Affiliation

¹Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2 Petrovsky st., Yakutsk 677980, Russian Federation

²A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Akademika Koptuyuga pr., Novosibirsk 630090, Russian Federation

³M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 50 Kulakovsky st., Yakutsk 677013, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 14.03.2022

Поступила после рецензирования / Revised 21.09.2022

Принята к публикации / Accepted 11.10.2022

Обогащение полезных ископаемых

УДК 622.755

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

Механизм дополнительной сегрегации минералов по плотности в постели центробежно-вибрационного концентратора

О. Ю. Очосов[✉], А. И. Матвеев

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
[✉]ochos@mail.ru*

Аннотация

Испытан центробежно-вибрационный концентратор конструкции Института горного дела Севера СО РАН, разработанный на основе ранее проведенных исследований. Отличие данного концентратора от существующих аналогов заключается в том, что его рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленные вдоль оси своего вращения. Результаты испытаний показали высокую степень влияния частоты вибрационных колебаний на извлечение тяжелых минералов, что явилось основой разработки новой конструкции центробежного концентратора. Новая конструкция имеет возможность управления параметрами вибрационных колебаний, что позволяет активно использовать новый эффективный механизм сегрегации (улавливания) тяжелых компонентов. Достигнут наилучший уровень извлечения тяжелых минералов до 63,9 % при частоте колебательных воздействий 22 Гц и амплитуде 2 мм при разделении искусственной смеси, состоящей из речного песка и магнетита крупностью 0,5 мм. Определено, что накопленная постель тяжелых минералов в рабочем органе центробежно-вибрационного концентратора переходит в активное разрыхленное состояние при амплитуде колебаний более 1,5 мм. В случае переработки естественных минеральных комплексов возможны экспериментальный подбор и обоснование наиболее рациональных режимных условий разделения.

Ключевые слова: центробежный концентратор, обогащение, извлечение, вибрационные колебания, центробежная сила, постель, тяжелые минералы, золото, концентрат, хвосты

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной программы НИР №FWRS-2021-0022. Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант №13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Очосов О. Ю., Матвеев А. И. Механизм дополнительной сегрегации минералов по плотности в постели центробежно-вибрационного концентратора. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):527–538. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

The mechanism of additional segregation of minerals by density in the bed of the centrifugal-vibrating concentrator

O. Yu. Ochoso[✉], A. I. Matveev

*Chersky Institute of Mining of the North,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
[✉]ochos@mail.ru*

Abstract

In this study we tested a centrifugal vibration concentrator developed by the Institute of Mining of the North SB RAS. Unlike existing analogues, the working body of the concentrator performs vibrations directed along its rotation axis. The test results showed a high degree of influence of the vibration frequency on the extraction of heavy minerals. The new centrifugal concentrator has the ability to control the parameters of vibrations, enabling an active use of the new effective mechanism for segregation (trapping) of heavy components. The best level of extraction of heavy minerals

(63.9 %) was achieved with an oscillation frequency of 22 Hz and an amplitude of 2 mm when separating an artificial mixture consisting of river sand and magnetite with a grain size of -0.5 mm. The accumulative bed of heavy minerals in the working organ of the centrifugal vibration concentrator passes into an active loosened state with an oscillation amplitude of more than 1.5 mm. Experimental selection and justification of the most rational regime conditions is applicable in the case of processing natural mineral complexes.

Keywords: centrifugal concentrator, enrichment, extraction, vibration vibrations, centrifugal force, bed, heavy minerals, gold, concentrate, tailings

Funding. This study was carried out within the framework of the budget programme (number FWRS-2021-0022). We used the equipment of the Shared core facilities (SCF) of the Federal Research Centre SB RAS for the laboratory research (grant number 13.SCF.21.0016).

For citation: Ochosov O.Yu., Matveev A.I. The mechanism of additional segregation of minerals by density in the bed of the centrifugal-vibrating concentrator. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):527–538. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-527-538>

Введение

Для многих регионов России горнодобывающая промышленность была, есть и останется в перспективе основой социально-экономического развития. К этим регионам относятся и Якутия и Северо-Восток России. К числу ключевых проблем развития горнодобывающей промышленности относится модернизация существующих технологий переработки и обогащения золота, в том числе создание новых рациональных геотехнологий, отвечающих современным требованиям эффективности производства. Основная задача эффективного недропользования на современном этапе в части обогащения и переработки золотосодержащего сырья формулируется как повышение уровня полноты и комплексности извлечения полезных компонентов при добыче и переработке, а также глубокой переработке продуктов извлечения на основе детального изучения технологических свойств труднообогатимого золота.

На фоне постепенного сокращения запасов золотосодержащих месторождений в переработку начинает вовлекаться минеральное сырье с более низким содержанием золота или с преобладающим содержанием труднообогатимого золота, но при этом традиционные технологии обогащения золота, в особенности на базе промприборов и небольших обогатительных установок, остаются ориентированными на переработку и обогащение легкообогатимого минерального сырья. В связи с этим технологические потери при использовании традиционных технологий добычи могут достигать 25–54 % [1, 2].

Основными параметрами, характеризующими труднообогатимость золота, являются его фракционный состав, крупность и форма частиц, чем мельче золото, тем сложнее оно поддается обога-

щению, поэтому решение проблем обогащения мелкого и тонкого золота остается актуальной задачей [3–5]. В целом, решение проблем обогащения мелкого и тонкого золота повышает эффективность рационального использования этого ценного природного ресурса.

Существующая технология

Развитие технологий обогащения минерального сырья позволяет вовлекать в переработку месторождения с более низким содержанием полезных компонентов со сложным фракционным составом. В области гравитационного обогащения тяжелых минералов это стало возможным благодаря появлению современных центробежных концентраторов безнапорного типа, которые в первую очередь применяются в золотодобывающей промышленности [6–10].

Принципиально конструкция центробежных концентраторов остается однотипной, но они различаются формой улавливающей поверхности рабочего органа и способом разрыхления минеральной постели. Принципиальная конструкция центробежных концентраторов представлена на рис. 1.

Подобные аппараты, в основном, состоят из рабочего органа (ротора) в виде чаши или конуса, который соединен с приводным валом и системой подшипников, установленных на раме, также в аппаратах имеются устройства для загрузки и разгрузки продуктов обогащения [11]. Центробежная сила в этих концентраторах создается принудительным вращением исходного материала в виде пульпы при подаче питания на дно рабочего органа. Под действием центробежной силы тяжелые частицы оседают внутри улавливающих рифлей рабочего органа, формируя постель из тяжелых минералов, а легкие

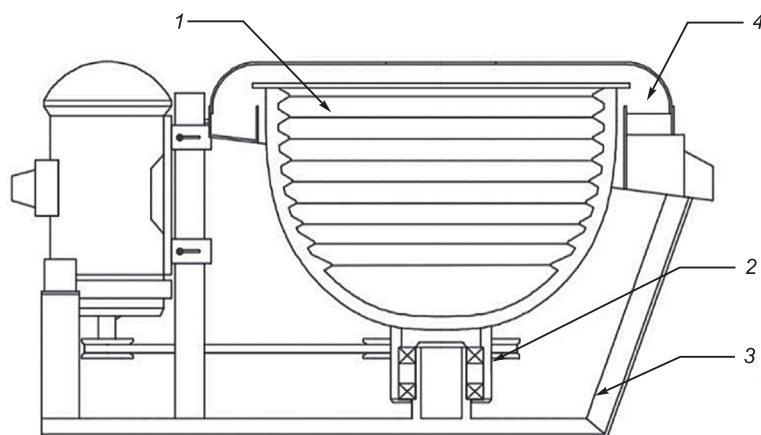


Рис. 1. Безнапорный центробежный концентратор. 1 – рабочий орган в виде чаши; 2 – приводной вал с системой подшипников; 3 – несущая рама; 4 – устройство загрузки и разгрузки продуктов обогащения.

Fig. 1. Non-pressure centrifugal concentrator. 1 – a working body in the form of a bowl; 2 – a drive shaft with a bearing system; 3 – a supporting frame; 4 – a device for loading and unloading enrichment products.

уносятся смывным потоком пульпы за пределы рабочего органа.

На данный момент существует множество разновидностей безнапорных центробежных концентраторов. По способу разрыхления постели они делятся на группы: без разрыхления постели (центрифуги); с механическим разрыхлением постели (типа Orocon); с вибрационным разрыхлением постели (типа ЦВК, СЦВ); с флюидизационным разрыхлением постели (с помощью оживающей воды) (концентраторы Knelson, Falcon, СЦМ, Итомак).

Один из распространенных центробежных аппаратов – концентратор Кнелсона, представляющий собой высокоскоростную центрифугу, в которой создается центробежное поле с ускорением до 60g, снабженную устройством для подачи оживающей (промывной) воды. Данный аппарат в последнее время является эталоном по извлечению мелкого и тонкого золота, т. е. эффективность всех вновь разрабатываемых и создаваемых аппаратов центробежной сепарации сравнивается с результатами обогащения. Существует соответствующий международный тест испытания GRG [12, 13].

У концентратора ЦВК ОАО «Грант» разрыхление постели в нарифлениях конической вращающейся чаши производится путем наложения планетарных колебаний высокой частоты (до 150:1/с). У концентратора ЦКПП АО «Полиметалл» разрыхление постели в нарифлениях производится путем деформации конической

чаши из полиуретана тремя роликами в процессе ее вращения, так что верхний срез чаши принимает вид треугольника со сглаженными углами. Этим достигаются разные значения центробежной силы на разделяемые частицы в разных точках внутренней поверхности чаши и достигаются условия для поддержания разрыхленного состояния постели.

Несколько оригинально и просто вопрос обеспечения оптимальной разрыхленности и сегрегационного разделения в условиях подачи оживающей воды решается в концентраторе «ИТОМАК», в котором расположение оси вращения рабочего конуса находится в горизонтальной (или наклонной) плоскости [14]. Такое расположение оси вращения приводит к самопроизвольным колебаниям минерального слоя, в результате чего интенсивность процесса распределения частиц по плотности возрастает. Горизонтальное (или наклонное) положение ротора позволяет ускорить разгрузку, повысить надежность работы и улучшить условия эксплуатации основных узлов концентратора.

Сравнительными исследованиями А.В. Богдановича [15] на искусственных смесях различного размера и производительности, с различными принципами разрыхления осевшего продукта – «Knelson-3», «Falcon SB-40», «ЦВК-100» конструкции ОАО «Грант» и ЦКПП-120 конструкции АО «Полиметалл», показано преимущество концентраторов (ЦВК и ЦКПП) сегрегацион-

ного типа, лучше извлекающих тонкие частицы с высокой плотностью, чем аппараты, в которых разрыхление постели ведется взвешивающим потоком воды.

Применение безнапорных центробежных концентраторов позволяет доизвлекать мелкое и тонкое золото, теряющееся с хвостами традиционного шлюзового обогащения, что в ряде случаев экономически выгодно, причем не только собственно из золотоносных, но и таких, в которых основными полезными компонентами являются другие полезные компоненты, такие как медь, никель, железо, цинк и т. д. Но, вместе с тем, опыт эксплуатации безнапорных центробежных концентраторов показывает существенные различия в эффективности их использования, связанные с высокой динамикой процесса, сложностью их регулирования по мере накопления тяжелых минералов в формирующейся постели в рабочей зоне сепараторов. Это часто приводит к «насыщению» и снижению фактической «емкости» по улавливанию полезного компонента. Помимо этого, сложность процесса центробежной концентрации обуславливает особые требо-

вания к условиям эксплуатации, квалификации и опыту работы обслуживающего персонала.

Для наиболее широко распространенных центробежных концентраторов, работающих с использованием флюадизационного способа разрыхления минеральной постели, одним из важных условий эксплуатации, обеспечивающих эффективность его работы, является подача чистой воды [16], что в большинстве случаев при разработке россыпных месторождений представляет дополнительные затраты. В случае использования оборотной воды эффективность извлечения золота обеспечивают центробежные концентраторы, работающие по вибрационному способу разрыхления минеральной постели за счет снятия излишней вязкости воды и нейтрализации влияния тонкодисперсных взвешенных шламов [17].

Материалы исследований

В лаборатории ОПИ ИГДС СО РАН по результатам ранее проведенных исследований по изучению влияния вибрационных колебаний на минеральную постель [18, 19] было установлено, что максимально быстрое расслоение постели по плотности происходит при вибрационных колебаниях, направленных перпендикулярно направлению осаждающей силы, т. е. силы тяжести. Основываясь на этом эффекте расслоения минеральных частиц под действием направленных вибрационных колебаний, был разработан и изготовлен новый центробежно-вибрационный концентратор, главной особенностью которого, в отличие от существующих аналогов, является то, что рабочий орган совершает вибрационные колебания, направленные вдоль оси своего вращения [20]. А также по результатам исследований сформирована новая заявка на изобретение в части усовершенствования более раннего патента.

Концентратор (рис. 2) состоит из ротора 1 в виде усеченного конуса или чаши, со сменной улавливающей поверхностью с внутренней стороны 2, соосно установленного на верхней стороне центрального вала 3, который соосно помещен в приводной вал 4, вращающийся на подшипниках 5, укрепленных в несущем корпусе 6. Приводной вал вращается с помощью клиноременной передачи 7 и двигателя 8. В нижней части центрального вала помещен вибратор в виде соосно укрепленного сердечника 9, вокруг которого расположены электрические катушки 10,

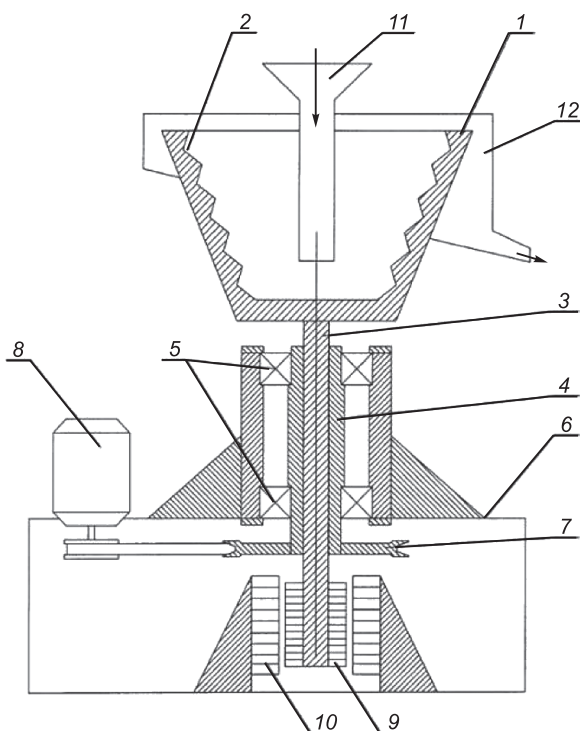


Рис. 2. Конструкция центробежно-вибрационного концентратора. Пояснения см. в тексте.

Fig. 2. Design of a centrifugal vibration concentrator. Explanations see in the text.

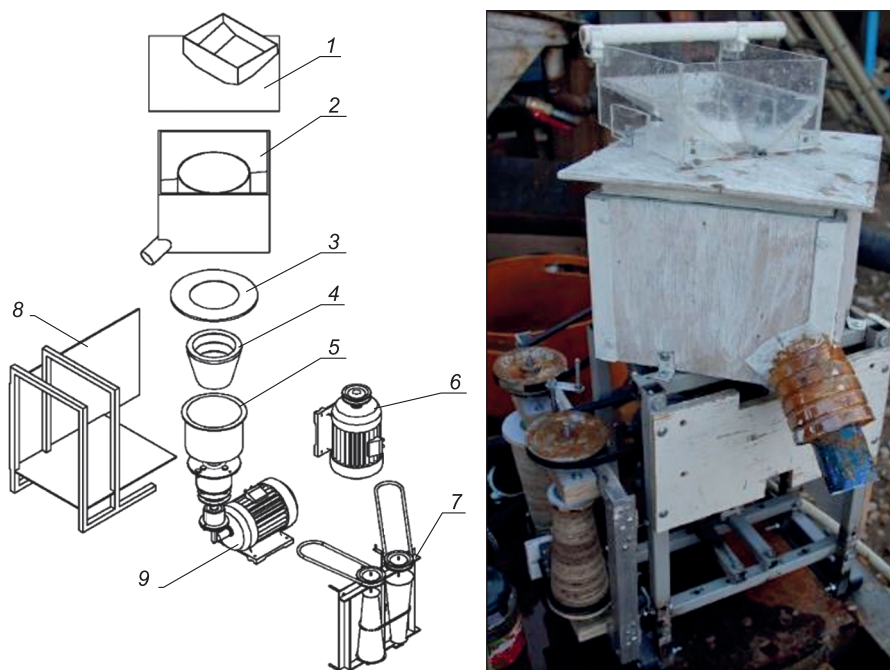


Рис. 3. Общий вид лабораторной модели центробежно-вибрационного концентратора. 1 – крышка с приемным бункером, 2 – кожух, 3 – зажимное кольцо, 4 – съемная футеровка, 5 – узел рабочего органа, 6 – приводной двигатель, 7 – валковый вариатор, 8 – несущая рама, 9 – двигатель вибратора.

Fig. 3. General view of a laboratory model of a centrifugal vibration concentrator. 1 – cover with a receiving hopper, 2 – casing, 3 – clamping ring, 4 – removable lining, 5 – working body assembly, 6 – drive motor, 7 – roller variator, 8 – supporting frame, 9 – vibrator motor.

установленные в несущем корпусе. Центральный вал вместе с ротором и сердечником вращается с равной скоростью с приводным валом, посредством шпоночного или шлицевого соединения с возможностью совершения колебательного движения, генерируемого вибратором, вдоль оси своего вращения. Также концентратор оснащен патрубком исходного питания 11, помещенным внутри ротора, и устройством для разгрузки продуктов разделения 12.

Концентратор работает следующим образом. Исходное питание в виде пульпы подается через патрубок исходного питания 11 на дно ротора 1, вращающегося посредством двигателя 8, клиноременной передачи 7, приводного вала 4 с подшипниками 5 в корпусе 6 и центрального вала 3. При этом под действием центробежной силы более плотные частицы задерживаются в улавливающей поверхности 2, а менее плотные разгружаются через разгрузочное устройство 12. Для предотвращения уплотнения попавших в улавливающую поверхность 2 более плотных частиц ротор 1 совершает колебательные движения по оси своего вращения, генерируемый вибратором

в виде сердечника 9, вокруг которого расположены электрические катушки 10, посредством центрального вала 3.

Общий вид изготовленной лабораторной модели центробежно-вибрационного концентратора представлен на рис. 3. Несущая рама концентратора выполнена из профилированной трубы с размерами 15×15×1,2, соединенных болтовыми креплениями. Рабочий орган изготовлен в виде чаши со съемной футеровкой из оргстекла.

Рабочий орган устанавливается на приводной вал, помещенный в корпус шарикорадиальных подшипников. Передача вибрационных колебаний на рабочий орган осуществляется через систему роликовых подшипников, установленных на нижней части приводного вала. Вращение рабочего органа осуществляется асинхронными электродвигателями мощностью 0,55 кВт и 0,3 кВт частотой вращения 1250 об./мин. Режим работы концентратора является периодическим, т. е. по мере соответствующего накопления тяжелых полезных компонентов в постели полученный концентрат разгружают в накопитель концентрата.

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов

Table 1

Summary table of experimental results

Параметр	Номер эксперимента								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота колебания ротора, Гц	40	40	40	22	22	22	0	0	0
Частота оборотов ротора, об./мин	460	375	260	460	375	260	460	375	260
Технологические параметры									
Извлечение, %	39,40	54,20	63,10	34,70	59,20	64,30	32,00	41,00	27,90
Содержание магнетита в концентрате, %	4,52	6,83	7,79	4,27	7,00	7,96	3,59	4,79	3,18
Выход, г	87,20	79,40	81,00	81,30	84,60	80,80	89,20	85,60	87,60

Эксперименты на концентрате проводились при частоте вращения рабочего органа 460, 375 и 260 об./мин, при частоте вибрационных колебаний 40, 22 Гц и без разрыхления, т. е. при частоте 0 Гц. При проведении экспериментов использовалась 5000 г искусственной смеси, состоящей из речного песка (–0,5 мм) и магнетита (–0,315 мм).

Для оценки и сравнения результатов экспериментов в табл. 1 и на рис. 4 приведены основные сводные качественно-количественные показатели обогащения в зависимости от параметров работы концентратора. Из таблицы и рисунка видно, что при одинаковой частоте колебаний ротора 40 Гц с уменьшением частоты оборотов ротора с 460 до 260 об./мин извлечение увеличивается с 39,4 до 63,1 %. Это связано с тем, что разрыхленность минеральной постели при снижении скорости оборотов ротора усиливается вследствие ослабления уплотняющей центробежной

силы, такая же динамика наблюдается при частоте колебаний 22 Гц. При работе ротора без вибрационных колебаний (0 Гц) извлечение магнетита остается на низком уровне 30–40 % из-за чрезмерного уплотнения минеральной постели. При одинаковой скорости оборотов ротора 260 об./мин с увеличением частоты вибрационных колебаний с 22 до 40 Гц наблюдается незначительное снижение извлечения с 64,3 до 63,1 %, а при скорости оборотов ротора 375 об./мин – с 59,2 до 54,2 %, возможно, это связано с тем, что увеличивается вероятность выноса минеральной постели из улавливающих рифлей при чрезмерной величине вибрационных колебаний. Наилучшие результаты по извлечению тяжелых минералов получены при частоте оборотов рабочего органа 260 об./мин и частоте колебаний 22 Гц – 64,3 %, при этой же частоте оборотов, но без разрыхления постели извлечение составило 27,9 %.

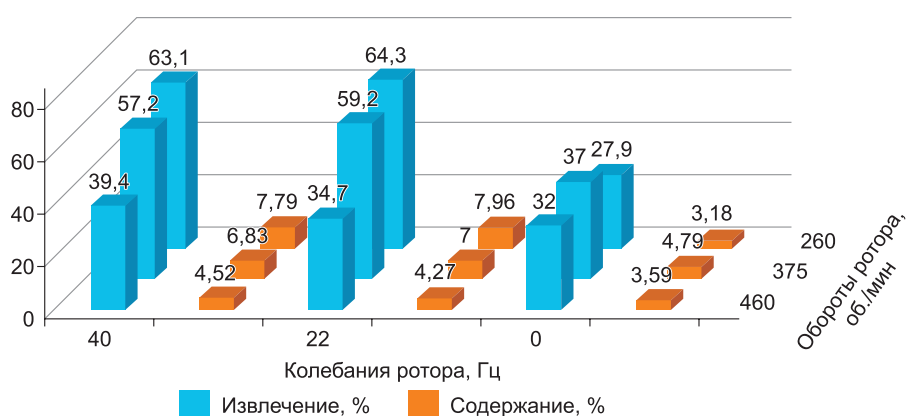


Рис. 4. Результаты экспериментов на центробежно-вибрационном концентраторе.

Fig. 4. Results of experiments on a centrifugal vibration concentrator.

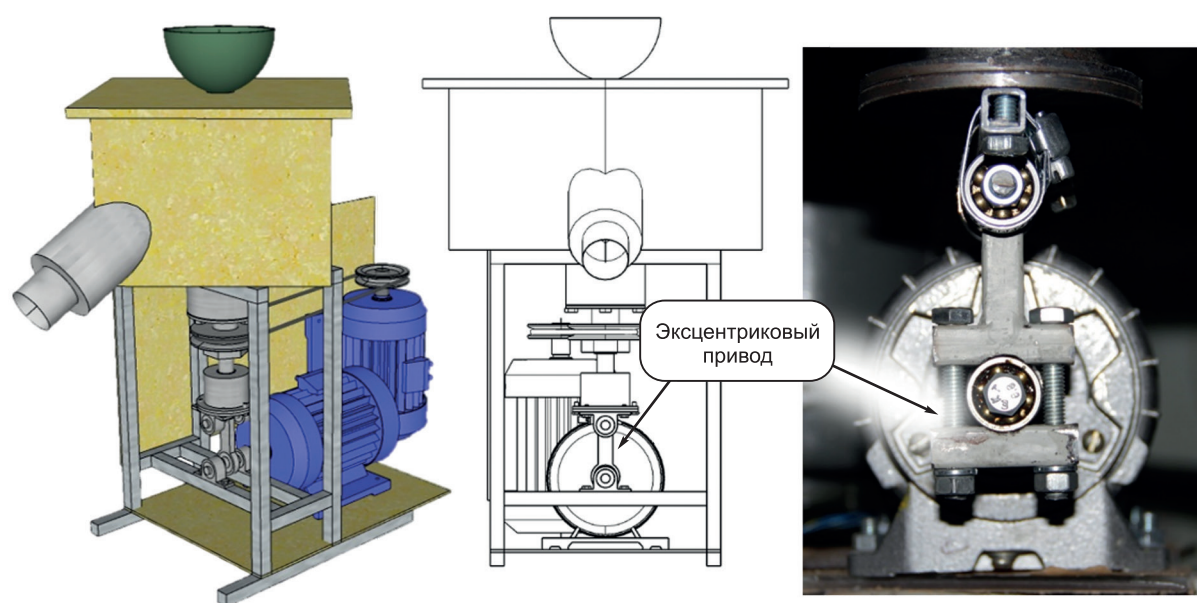


Рис. 5. Модернизированный центробежно-вибрационный концентратор.

Fig. 5. Upgraded centrifugal vibration concentrator.

Полученные результаты показывают степень влияния частоты вибрационных колебаний на извлечение тяжелых минералов, однако эксперименты проводились при фиксированном значении амплитуды колебаний рабочего органа 2,5 мм ввиду конструктивных ограничений центробежного концентратора.

В связи с этим для дальнейшего проведения исследований по уточнению рациональных параметров вибрационных колебаний и механизма их воздействия на процесс сегрегации (улавливания) тяжелых компонентов, проведена модернизация конструкции центробежного концентратора, а именно, доработана система привода вибратора для обеспечения возможности регулирования амплитуды колебаний (рис. 5). Техническая характеристика модернизированного концентратора приведена в табл. 2.

Было изготовлено пять вариантов эксцентриковых валов с амплитудой 0,5, 1, 1,5, 2 и 2,5 мм (рис. 6), благодаря которым возможно регулирование амплитуды колебаний с шагом 0,5 мм.

Система регулирования оборотов рабочего органа в виде валкового вариатора заменена на систему регулирования оборотов двигателя при помощи частотного преобразователя VACON0020-3L, что существенно упростило конструкцию концентратора и позволило расширить диапазон параметров колебательного воздействия.

Эксперименты на концентраторе проводились при заданной частоте вращения рабочего органа 260 об./мин, в диапазоне частоты колебаний от 0 до 60 Гц и амплитуде колебаний от 0,5 до 2,5 мм. Диапазоны регулирования параметров колебаний выбраны на основе конструктивных ограничений изготовленного концентратора, так как при частоте колебаний до 60 Гц выдерживается необходимая амплитуда колебаний.

При проведении экспериментов использовалась 2000 г искусственной модельной смеси, состоящей из речного песка (–1 мм) и магнетита (–0,5 мм). Результаты экспериментов приведены в табл. 3 и на рис. 7.

Таблица 2
Техническая характеристика
центробежно-вибрационного концентратора

Table 2
Technical characteristics
of the centrifugal vibration concentrator

Диаметр рабочего органа	134 мм
Масса	35 кг
Производительность	60 кг/ч
Габариты ДхШхВ	650×396×592 мм
Объем концентрата	До 100 г
Потребляемая мощность	1,5 кВт

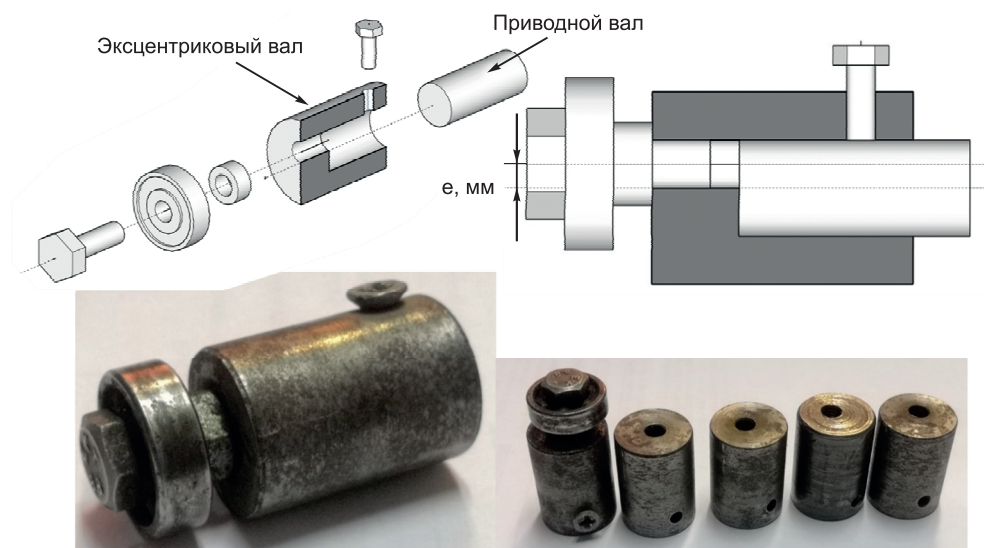


Рис. 6. Эксцентриковые валы привода вибратора центробежно-вибрационного концентратора.

Fig. 6. Eccentric shafts of the vibrator drive of the centrifugal vibration concentrator.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что при всех равных условиях экспериментов максимальное извлечение достигается на уровне колебаний 22 Гц при амплитуде колебаний более 1,5 мм. Достигнут максимальный уровень извлечения 61,2 % при амплитуде 2 мм. При меньших значениях амплитуды 1,5 мм постель концентратора сохраняет высокую степень уплотнения и уровень извлечения существенно падает до 35,2 %. В диапазоне от 0 до 22 Гц постель сохраняет высокую степень уплотнения, с чем связан низкий уровень извлечения, по сравнению с диапазоном частоты от 22 до 40 Гц, где достигается максимальное значение извлечения 63,9 %. При частоте колебаний более 40 Гц извлечение снижается до уровня 26,9 %, что

свидетельствует о массовом выносе материала постели из области рифленой поверхности рабочего органа.

В существующих вибрационных центробежных концентраторах векторы вибрационных колебаний находятся преимущественно в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения, т. е. в плоскости действия векторов центробежной силы, при котором траектории движения частиц взаимно пересекаются, что снижает эффект улавливания тяжелых частиц в постели (рис. 8).

В отличие от существующих вибрационных центробежных концентраторов, направленное воздействие вибрационных колебаний по оси вращения рабочего органа дает возможность снижения неуправляемого столкновения частиц

Т а б л и ц а 3

Сводная таблица результатов экспериментов

Table 3

Summary table of experimental results

Частота колебания ротора, Гц	Амплитуда колебаний ротора, мм									
	0,5		1,0		1,5		2,0		2,5	
	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %	Извл. ϵ , %	Сод. β , %
0	28,20	4,25	31,20	4,26	36,10	5,10	33,70	4,85	37,20	4,61
22	35,20	4,78	36,50	4,88	40,30	6,23	63,90	8,34	62,40	10,05
40	38,10	5,93	37,10	5,15	42,10	6,06	58,70	9,06	61,20	8,49
60	32,10	4,78	37,10	5,60	36,90	5,31	26,90	5,23	27,80	4,56

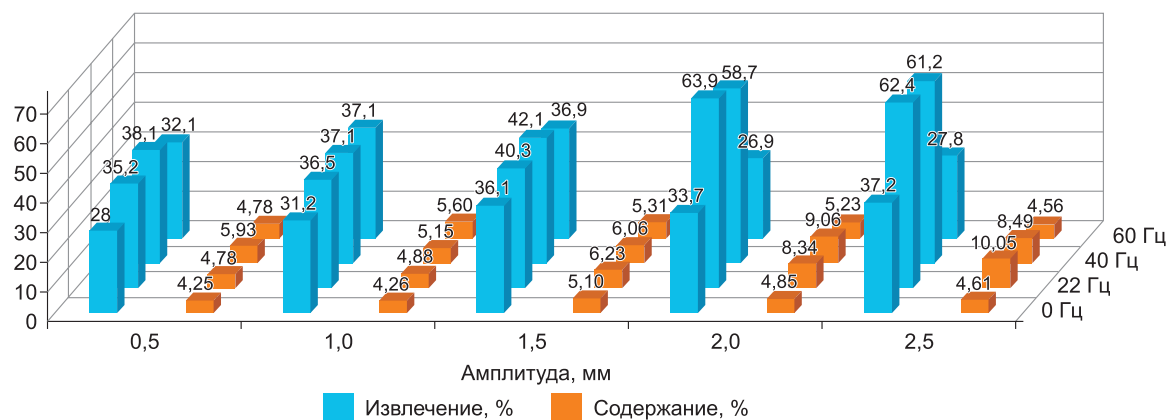


Рис. 7. Результаты экспериментов на модернизированном концентраторе.

Fig. 7. Results of experiments on the upgraded hub.

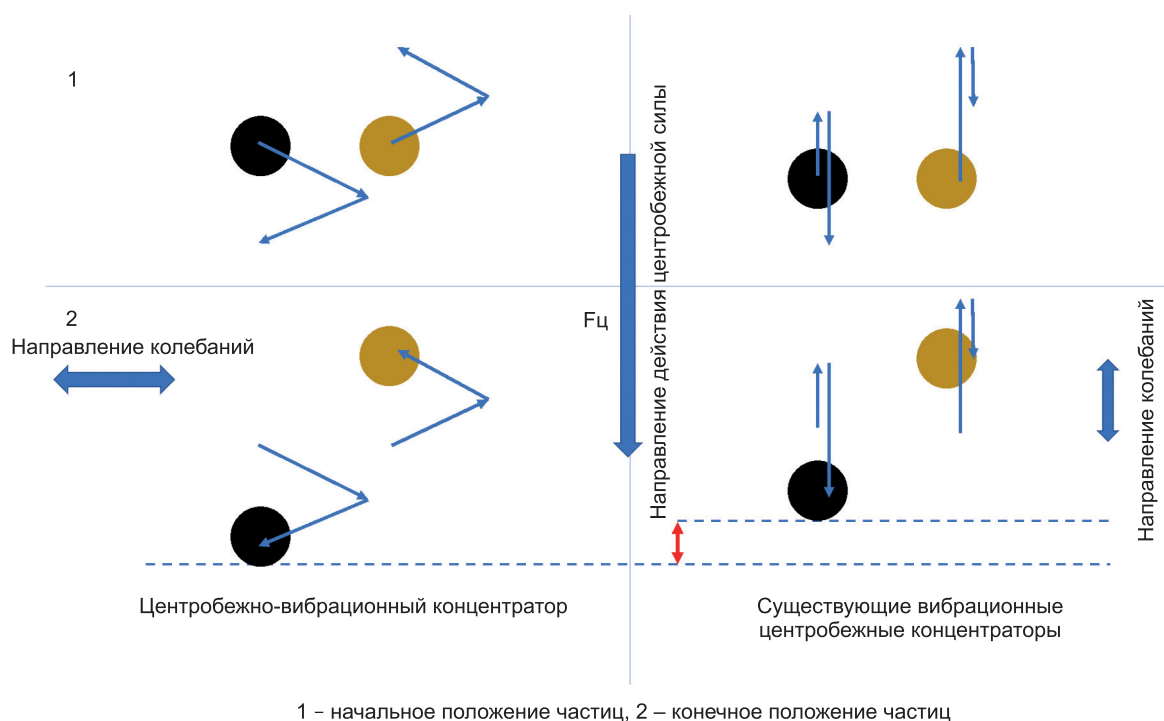


Рис. 8. Траектория перемещения тяжелых (черный) и легких (коричневый) частиц в поле действия центробежных сил при наложении вибрационных колебаний.

Fig. 8. The trajectory of movement of heavy (black) and light (brown) particles in the field of action of centrifugal forces during the imposition of vibration vibrations.

друг с другом за счет постоянного разрыхления постели в вертикальном срезе. При этом происходит постоянное раскрытие промежуточных зазоров между частицами, где и отмечается преимущественное западание тяжелых частиц, а заданная частота колебаний способствует избирательному выдавливанию легких частиц из постели по создаваемой суммарной разнице сил.

Заключение

Экспериментально показан эффект применения направленных колебаний на процесс разделения минералов в постели центробежных аппаратов разделения, что означает создание нового дополнительного рационального механизма сегрегации минералов по плотности в постели центробежного аппарата концентрации в поле дейст-

вия направленных колебательных воздействий. Определено, что постель тяжелых минералов в рабочем органе центробежно-вибрационного концентратора переходит в разрыхленное состояние при амплитуде колебаний более 1,5 мм. При этом достигнут наилучший уровень извлечения тяжелых минералов 63,9 % при частоте колебательных воздействий 22 Гц и амплитуде 2 мм при разделении искусственной смеси, состоящей из речного песка и магнетита крупностью –0,5 мм. Новый аппарат центробежной концентрации требует изготовления опытно-промышленных моделей для последующей реализации в технологических операциях в золотодобывающих предприятиях. Перспектива внедрения концентратора связана с доводочными операциями по повышению качества получаемых концентратов и снижению потерь. В случае естественных минеральных комплексов в условиях промышленных золотодобывающих предприятий возможны экспериментальный подбор и обоснование наиболее рациональных режимных условий разделения.

Список литературы / References

1. Липич А.В., Барышников В.И. Пути снижения технологических потерь при промывке золотоносных песков. *Безопасность труда в промышленности*. 2001;(7):14–16.
[Lipich A.V., Baryshnikov V.I. Ways to reduce technological losses during the washing of gold-bearing sands. *Occupational Safety in Industry*. 2001;(7):14–16. (In Russ.)]
2. Попова Ю.Т. Выбор типа промывочной установки на основе анализа существующих моделей для условий разработки россыпей Забайкалья. *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов*. 2017; 182–186.
[Popova Yu. T. Selection of the type of washing plant based on the analysis of existing models for the conditions of development of placers in Transbaikalia. *Kulagin readings: technique and technology of production processes*. 2017; 182–186. (In Russ.)]
3. Мязин В.П., Литвинцева О.В., Закиева Н.И. *Технология обогащения золотосодержащих песков: учебное пособие*. Чита: ЧитГУ; 2006. 110 с.
[Myazin V.P., Litvinseva O.V., Zakieva N.I. *Technology of enrichment of gold-bearing sands: textbook*. Chita: ChitGU; 2006. 110 p. (In Russ.)]
4. Ван-Ван-Е А.П., Литвинцев В.С., Секисов Г.В. Состояние и развитие ресурсного потенциала золотодобывающей отрасли ДФО. *Горный информационно-аналитический бюллетень. Дальний Восток-2*, 2009; 32–36.
[Van-Van-Ye A.P., Litvintsev V.C., Sekisov G.V. State and development of the resource potential of the gold mining industry of the Far Eastern Federal District. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. Dalniy Vostok-2*, 2009;32–36. (In Russ.)]
5. Медков М.А., Крысенко Г.Ф., Эпов Д.Г., Юдаков А.А. Переработка техногенного золотосодержащего сырья. *Вестник ДВО РАН*. 2010;(5):75–79.
[Medkov M.A., Krysenko G.F., Epov D.G., Yudakov A.A. Processing of aurum-containing technogenic waste. *Vestnik DVO RAN*. 2010;(5):75–79. (In Russ.)]
6. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. *Гравитационные методы обогащения*. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1993. С. 300–301.
[Shokhin V.N., Lopatin A. G. *Gravitational enrichment methods*. Textbook for high schools. 2nd ed., revised. and additional. M.: Nedra; 1993. P. 300–301. (In Russ.)]
7. Федотов К.В., Тютюнин В.В. *Обогащение в центробежных концентраторах*: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ; 2009. 120 с.
[Fedotov K.V., Tyutyunin V.V. *Enrichment in centrifugal concentrators*: monograph. Irkutsk: Izd-vo IrGTU; 2009. 120 p. (In Russ.)]
8. Афанасенко С.И. Применение центробежных концентраторов ИТОМАК с автоматической системой управления на действующих предприятиях. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*. 2020; С. 272–274.
[Afanasenko S.I. Application of ITOMAK centrifugal concentrators with an automatic control system at operating enterprises. *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials*. 2020; P. 272–274. (In Russ.)]
9. Афанасенко С.И. и др. Центробежный концентратор «КРЦ-400» с планетарным движением рабочего конуса. *Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья*. 2020; С. 275–278.
[Afanasenko S.I. et al. Centrifugal concentrator «KRC-400» with planetary movement of the working cone. *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials*. 2020; P. 275–278. (In Russ.)]
10. Пелих В.В., Салов В.М. Специфика применения центробежных сепараторов Кнелсон с периодической разгрузкой. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2015;107(12):229–235.
[Pelikh V. V., Salov V. M. Application specifics of Knelson centrifugal separators with periodic discharge. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2015;107(12):229–235. (In Russ.)]
11. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. *Гравитационные методы обогащения*. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра; 1993. С. 293–295.
[Shokhin V.N., Lopatin A. G. *Gravitational enrichment methods*. Textbook for high schools. 2nd ed., revised. and additional. M.: Nedra; 1993. P. 293–295. (In Russ.)]

12. Суримбаев Б.Н. и др. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды—GRG. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):92–103.

[Surimbaev B.N. et al. Estimation of the gravity concentration of gold ore – GRG. *Mining Science and Technology*. 2020;5(2):92–103. (In Russ.)]

13. Сенченко А.Е. и др. Технологическая оценка обогатимости руды гравитационными методами. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2020;(4):262–280.

[Senchenko A.Ye. et al. Technological assessment of ore concentration by gravity methods. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020;(4):262–280. (In Russ.)]

14. Ярмола Д.А., Афанасенко С.И., Лазариди А.Н. Теоретический анализ процесса обогащения в центробежном концентраторе с горизонтальной осью вращения. *Сборник материалов Международной конференции «Перспектив Свободный-2016»*. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 15–25 апреля 2016. Красноярск; 2016. С. 50–52.

[Yarmola D.A., Afanasenko S.I., Lazaridi A.N. Theoretical analysis of the enrichment process in a centrifugal concentrator with a horizontal axis of rotation. *Materials of the International conference «Prospect Svobodny-2016»*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, April 15–25, 2016. Krasnoyarsk; 2016. P. 50–52. (In Russ.)]

15. Богданович А.В., Петров С.В. Сравнительные испытания центробежных концентраторов различных типов. *Обогащение руд*. 2001(3):38–42.

[Bogdanovich A.V., Petrov S.V. Comparative tests of centrifugal concentrators of various types. *Obogashchenie rud*. 2001(3):38–42. (In Russ.)]

16. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. *Технология обогащения золотосодержащего сырья*: Учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом «МИСиС»; 2011. С. 116–122.

[Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Technology of enrichment of gold-bearing raw materials*: Textbook for universities. M.: Izd. dom «MISiS», 2011. P. 116–122 (In Russ.)]

17. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. *Технология обогащения золотосодержащего сырья*: Учебное пособие для вузов. М.: Изд. дом «МИСиС»; 2011. С. 122–126.

[Bocharov V.A., Ignatkina V.A. *Technology of enriching gold-containing raw materials*: A textbook for universities. M.: Izd. dom «MISiS»; 2011. P. 122–126. (In Russ.)]

18. Очосов О.Ю., Матвеев А.И. Повышение эффективности разделения минеральных частиц под действием центробежных сил за счет использования направленных вибрационных колебаний. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016;(10): 259–265.

[Ochoso O.Yu., Matveev A.I. Higher efficiency of mineral particle segregation under centrifugal forces due to directional vibration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016; (10):259–265. (In Russ.)]

19. Очосов О.Ю., Матвеев А.И. Изучение влияния вибрационных колебаний на процесс концентрации тяжелых минералов под действием центробежной силы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018;(9):179–185.

[Ochoso O.Yu., Matveev A.I. Effect of vibrations on concentration of heavy minerals under action of centrifugal force. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018(9):179–185. (In Russ.)]

20. RU Российская Федерация, Пат. 2535323 С2, МПК В03 5/32 *Центробежно-вибрационный концентратор для разделения материалов* / Очосов О.Ю., Матвеев А.И.; заявитель и патентообладатель Учреждение Рос. акад. наук Ин-т горн. дела Севера им. Н.В. Черского Сиб. отд-ния Рос. акад. наук. – № 2013109952/03; заявл. 05. 03. 2013; опубл. 10. 12. 2014, Бюл. №34.

[RU Russian Federation, Pat. 2535323 C2, МПК В03 5/32 *Centrifugal-vibratory concentrator for material separation* / Ochoso O.Yu., Matveev A.I.; applicant and patentee N.V. Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. - No. 2013109952/03; dec. 03/05/2013; publ. 10. 12. 2014, Bull. No. 34. (In Russ.)]

Об авторах

ОЧОСОВ Олег Юрьевич, старший инженер, e-mail: ochos@mail.ru

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, зав. лаб., Author ID: 7102723417, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

Аффилиация

Институт горного дела им. Н.В. Черского, Сибирское отделение РАН, 677018, г. Якутск, пр. Ленина, 43, Российская Федерация

About the authors

OCHOSOV, Oleg Yurievich, Senior Engineer, e-mail: ochos@mail.ru

MATVEEV, Andrey Innokentevich, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Author ID: 7102723417, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, e-mail: andrei.mati@yandex.r

Affiliation

Chersky Institute of Mining of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Lenina pr., Yakutsk 677018, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 21.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 17.10.2022

Принята к публикации / Accepted 26.11.2022

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-539-546>

Инженерно-геокриологические условия Енисейской Арктики

П. Н. Скрябин

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

✉ vsp@mpi.ysn.ru

Аннотация

Представлены результаты инженерно-геокриологических исследований криолитозоны в естественных условиях и при освоении региона. Количественно оценено влияние снежного, растительного и напочвенного покровов на формирование теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. На основе математического моделирования охарактеризовано влияние техногенных воздействий на тепловой режим грунтов. Приведены результаты прогноза изменения термического состояния грунтов при освоении территории северной тайги, лесотундры и южной тундры. Предложены основные задачи геотемпературного мониторинга при организации стационаров и полигонов в осваиваемых районах региона.

Ключевые слова: Енисейская Арктика, климат, криолитозона, температура грунтов, мощность деятельного слоя, техногенное воздействие

Финансирование. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН 1.5.12.4 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика».

Для цитирования: Скрябин П.Н. Инженерно-геокриологические условия Енисейской Арктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):539–546. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-539-546>

Engineering and geocryological conditions of the Yenisei Arctic

P. N. Skryabin

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

✉ tatyana_umka91@mail.ru

Abstract

The article presents the results of engineering and geo-cryological studies of the permafrost zone in natural conditions and during the area development. We have quantitatively estimated the influence of snow, vegetation and ground cover on the formation of thermal soil regime of the annual heat turnover layer. The influence of technogenic impacts on the thermal soil regime is described using mathematical modeling. We provide the forecast results of the thermal state of soils during the territory development of the northern taiga, the forest-tundra, and the southern tundra. We discuss the main tasks of geo-temperature monitoring in the process of organizing stations and polygons in the areas under development.

Keywords: Yenisei Arctic, climate, permafrost zone, soil temperature, active layer thickness, technogenic impact

Funding. This study was carried out within the framework of the budget project “Thermal field and cryogenic strata of the North-East of Russia. Features of formation and dynamics” (project number 1.5.12.4).

For citation: Skryabin P.N. Engineering and geocryological conditions of the Yenisei Arctic. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):539–546. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-539-546>

Введение

Интенсивное хозяйственное освоение Енисейской Арктики в значительной мере определяется инженерно-геокриологической изученностью ее территории. Освоение региона сопровождается нарушением растительного и напочвенного

слоя, микрорельефа, режима снегоотложений, поверхностного стока и мерзлотных условий. Изменение теплового режима грунтов приводит к недопустимым деформациям сооружений, а иногда и их полному разрушению. Эти факторы вызывают развитие опасных для устойчиво-

сти сооружений криогенных процессов – термокарста, солифлюкции, оврагообразования и др. Поэтому до начала освоения территорий необходимо оценить инженерно-геокриологические условия.

Районы исследований в Енисейской Арктике распространены севернее Полярного круга. Сведения о многолетнемерзлых породах были получены при первых работах по изучению природных условий региона. Исследования криолитозоны начали систематически проводиться в советское время в связи с освоением районов Красноярского края. Плановые геокриологические изыскания стали проводиться Игарской мерзлотной станцией, которую в 1930 г. основал Главсевморпуть, в 1937 г. она была передана в систему Академии наук СССР. По инициативе М.И. Сумгина в 1936 г. на участке станции были организованы режимные термические наблюдения. В 1940–1960 гг. геокриологические условия в долине р. Енисей на участке Игарка–Усть-Порт изучали сотрудники мерзлотной станции. Первые экспериментальные исследования криогенных процессов, физико-механических свойств мерзлых пород проведены А.М. Пчелинцевым [1]. С 1964 г. Игарская НИМС Института мерзлотоведения СО АН СССР начала изучение геокриологических условий вдоль трассы магистрального газопровода Игарка–Талнах, а также в районах месторождений природного газа. Результаты исследований температуры, морфологии и распространения многолетнемерзлых пород равнинных территорий Енисейско-Пясинского Севера детально освещены в работах Г.С. Константиновой, А.П. Тыртикова, Н.Ф. Григорьева, Е.Г. Карпова и др. [2–10].

Изменения инженерно-геокриологических условий на линии электропередач Курейская ГЭС–Игарка–Хантайское водохранилище–Норильск, на участках «мертвой» железной дороги Салехард–Игарка и будущего нефтепровода Ванкор–Игарка оценены Е.Г. Карповым и Е.Л. Барановским [11].

Особенности инженерно-геокриологических условий осваиваемых районов региона освещены в работах научно-исследовательских и проектных организаций: мерзлотной станции Норильского горно-металлургического комбината, Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова, ВНИИГаз Министерства газовой промышленности СССР, Главной геофизической

обсерватории им. А.И. Воейкова, ИМЗ СО АН СССР и других [12–21].

Анализ результатов значительного объема исследований показывает, что мерзлотные условия региона изучены весьма неравномерно и не в полной мере. Более детально изучены районы городов Игарка, Дудинка, Норильск. Мало изучены мерзлотные условия на левобережье р. Енисей, южнее трассы газопровода Солёное–Норильск, а также на междуречье Енисея и Пясины.

Изучение инженерно-геокриологической обстановки в естественных условиях и при техногенных воздействиях представляет интерес в научно-теоретическом плане и для практических целей (проектирования, строительства и эксплуатации линейных и площадных сооружений, охраны и рационального использования геологической среды и пр.). Это свидетельствует об актуальности подобных исследований в осваиваемых районах криолитозоны и, в частности, в Енисейской Арктике.

Основной целью статьи является оценка инженерно-геокриологических условий рассматриваемого региона. Ведущими компонентами исследований считаются:

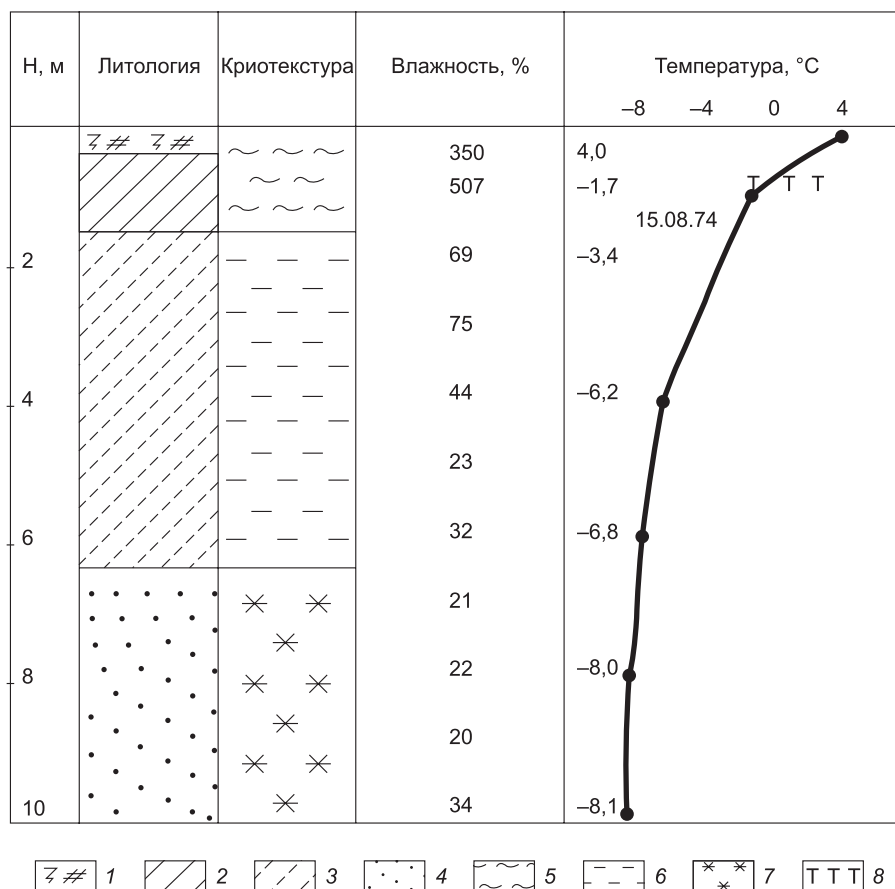
- природные условия (климат, рельеф, растительность);
- распространение многолетнемерзлых пород, их состав, мощность, температура, криогенное строение, подземные льды, мощность и строение слоя сезонного оттаивания-промерзания;
- современные экзогенные криогенные процессы;
- водно-физические свойства горных пород.

Методы исследований

Исследования инженерно-геокриологических условий проводятся с учетом требований методических рекомендаций для равнинных территорий криолитозоны [22].

Верхний горизонт толщи многолетнемерзлых пород отличается от подстилающей своим строением, свойствами и генезисом. Криогенное строение слоя характеризуется широким развитием различных текстур и поясков льда (см. рисунок). Грунты часто перенасыщены льдом, влажность суглинков и супесей достигает 200 %, а объемная льдистость 0,8. На участках освоения глубина сезонного оттаивания грунтов возрастает, что приводит к деформациям земной поверхности.

Начиная с 1950-х гг. геокриологи стали организовывать круглогодичные стационарные



Инженерно-геокриологический разрез скв. 1а (станция Солёный).

1 – мох, торф; 2 – суглинок; 3 – супесь; 4 – песок; 5–7 – криогенная текстура: 5 – тонкослоистая; 6 – линзовидная; 7 – массивная; 8 – слой протаивания.

Engineering geocryological section of well 1a (Solyony station).

1 – moss, peat; 2 – loam; 3 – sandy loam; 4 – sand; 5–7 – cryogenic texture: 5 – thin-layered; 6 – lenticular; 7 – massive; 8 – thaw layer.

исследования теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. Эти работы особенно расширились в 1970-х гг., когда началось планомерное освоение криолитозоны Европейского Севера, Западной и Восточной Сибири, а также Дальнего Востока.

Стационарные теплобалансовые исследования были выполнены в подзонах северной тайги и южной тундры Енисейской Арктики в 1971–1978 гг. и охватывали широкий круг вопросов, связанных с изучением теплового режима грунтов в естественных условиях и при освоении этой территории [20].

В основу исследований был положен метод теплофизики ландшафтов. Экспериментальные исследования включали микрометеорологические, актинометрические, теплофизические, гидротермические наблюдения и геокриологиче-

ский прогноз. Стационары были организованы в наиболее типичных мерзлотно-климатических условиях на участках местности, различающихся наземными покровами, составом грунтов и видами техногенного воздействия. В 1971–1974 гг. на Игарском теплобалансовом стационаре Института мерзлотоведения СО АН СССР в подзоне северной тайги режимные исследования были проведены на пяти площадках: разнотравный луг, березовый лес, оголенный участок, торфяник, с пленочным покрытием. Работы в подзоне южной тундры на Соленинском стационаре в 1974–1976 гг. охватили мохово-лишайниковый и сфагново-ерниковый тундровые участки, осоково-сфагновое болото, площадки с удаленным и нарушенным напочвенным покровами. с пенопластовым и бревенчатым покрытиями. В 1977–1978 гг. в подзоне южной тундры сезонный ста-

ционар в районе пос. Геологический включал следующие площадки: мохово-лишайниковый, мохово-ерниковый, тундровые участки, с удаленным напочвенным покровом, с естественным зарастанием, с посевами различных трав.

Принятая для условий Заполярья рациональная методика режимных стационарных наблюдений достаточно проста, точна и надежна.

Результаты и обсуждение

Многолетние исследования сотрудников Игарской НИМС позволили оценить особенности формирования геокриологических условий в различных природных условиях.

В северной зоне многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Талики встречаются под глубокими реками и водоемами шириной более 1 км. Мощность мерзлых пород на пойме составляет от 50–70 до 170–350 м. Температура грунтов на подошве слоя ее годовых колебаний равна $-1 \div -3$ °С. На первой надпойменной террасе температура пород понижается до $-4 \div -5$ °С, а мощность увеличивается от 100–150 на юге до 180–450 м на севере. На озерно-аллювиальной равнине и на водораздельном плато температура мерзлых грунтов равна $-5 \div -8$ °С, а мощность достигает 200–550 м.

Центральная геокриологическая зона характеризуется почти сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Температура пород на глубине нулевых ее амплитуд в пределах поймы изменяется от -1 до -2 , на надпойменной террасе – от -2 до -4 , а на водораздельном плато – от -3 до -6 °С. Мощность многолетнемерзлых пород на пойме равна 40–75 м, на надпойменной террасе – 75–100 м, на водораздельных пространствах 100–250 м.

В южной геокриологической зоне многолетнемерзлые породы термически малоустойчивы. Под руслами рек, под акваториями озер и на участках со снежным покровом мощностью 1,5–2 м встречаются сквозные талики. Мощность мерзлых отложений на пойме составляет около 20 м, температура на подошве нулевых амплитуд равна $-0,5 \div -0,6$ °С. Мощность мерзлых толщ на надпойменной террасе превышает 30 м. На подошве слоя годовых колебаний температура пород изменяется от $-0,1$ до $-0,5$ °С.

Во всех подзонах повсеместно распространены подземные льды. Полигонально-жильные льды залегают в торфяниках под слоем сезонного протаивания грунтов на глубине всего лишь

0,5–0,6 м. Мощность льдов достигает 4–5 м. В глинистых грунтах развиты сегрегационные льды. На контакте суглинков и отложений с валунными материалами встречаются пластовые льды мощностью до 2 м. В озерно-ледниковых глинах обнаружены уникальные залежи пластовых льдов, мощность которых превышает 20–30 м.

Оценка многолетней изменчивости теплового режима грунтов с учетом изменений климата проведена для трех пунктов (Соленый, Алыкель, Игарка), расположенных в подзонах южной тундры, лесотундры и северной тайги. При моделировании использованы данные натурных наблюдений за снегоотложениями, напочвенными покровами, составом, влажностью и температурным режимом грунтов. Теплофизические характеристики покровов и грунтов определены в полевых условиях и по справочникам.

Моделирование позволило определить изменение средней годовой температуры (t_0) и глубины сезонного протаивания грунтов (ξ) от метеоусловий и оценить пределы их колебаний (табл. 1). Из климатических факторов наибольшей изменчивостью характеризуется снежный покров, а наименьшей – среднегодовая температура воздуха. При этом введены следующие обозначения: $t_{вз}$ – среднегодовая температура воздуха, $\Sigma|+t_{вз}|$ и $\Sigma|-t_{вз}|$ – суммы положительных и отрицательных значений воздуха.

Оценка изменения теплового режима грунтов проведен по видам типичных нарушений естественных условий (табл. 2). Охлаждающее влияние уплотненного снега на среднегодовую температуру грунтов увеличивается от 4 в тундре до 5 °С в северной тайге. Глубина сезонного протаивания уменьшается на 0,1 на севере, на 0,2 м на юге. Удаление снежного покрова в тундре и лесотундре снижает t_0 на 4–10 °С, сокращает ξ на 0,2–0,4 м. Снятие мохово-торфяного покрова повышает t_0 на 0,3–1 °С, увеличивает ξ на 0,2–0,6 м. Удаление напочвенного и снежного покровов приводит к понижению t_0 на 5–9 °С, сокращает ξ на 0,1–0,3 м (см. табл. 2).

В 1974–1977 гг. Институт мерзлотоведения СО АН СССР проводил инженерно-геокриологические исследования на Соленинском и Мессояхских газовых месторождениях и на трассе газопровода Мессояха–Норильск. На основе данных натурных наблюдений была оценена эффективность методов инженерной и биологической рекультивации, рассмотрен комплекс мероприятий и средств, способствующих защите мерзлот-

Таблица 1

Многолетние вариации параметров климата и теплового режима грунтов

Table 1

Long-term variations in climate parameters and soils thermal regime

Параметры/Parameters	$t_{B3}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma +t_{B3} , ^\circ\text{C} \cdot \text{мес}$	$\Sigma -t_{B3} , ^\circ\text{C} \cdot \text{мес}$	$h_c, \text{м}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\xi, \text{м}$
Южная тундра/Southern Tundra						
Максимум/Maximum	-7,0	42,3	-122,2	0,76	-5,3	0,56
Минимум/Minimum	-14,8	18,7	-196,5	0,30	-11,0	0,34
Лесотундра/Forest Tundra						
Максимум/Maximum	-6,5	44,8	-118,5	0,82	-1,8	1,36
Минимум/Minimum	-14,6	21,6	-196,9	0,25	-7,8	0,93
Северная тайга/Northern Taiga						
Максимум/Maximum	-5,3	50,3	-107,9	0,99	0,0	1,46
Минимум/Minimum	-10,6	34,8	-167,6	0,30	-4,3	1,02

Таблица 2

Прогноз изменений температуры и глубины сезонного протаивания грунтов

Table 2

Forecast of the change and the depth of soils seasonal thawing

Естественные условия/ Natural Conditions	Уплотнение снега/ Snow Settlement	Удаление снега/ Snow Removal	Удаление растительного покрова/ Vegetation Removal	Удаление снега и растительного покрова/ Snow & Vegetation Removal
$\frac{t_0, ^\circ\text{C}}{\xi, \text{м}}$	$\frac{t_0, ^\circ\text{C}}{\xi, \text{м}}$	$\frac{t_0, ^\circ\text{C}}{\xi, \text{м}}$	$\frac{t_0, ^\circ\text{C}}{\xi, \text{м}}$	$\frac{t_0, ^\circ\text{C}}{\xi, \text{м}}$
Южная тундра/Southern Taiga				
$\frac{-0,6 \dots -7,3}{0,4 \dots 1,3}$	$\frac{-6,6 \dots -10,3}{0,3 \dots 1,0}$	$\frac{-9,7 \dots -11,7}{0,3 \dots 0,9}$	$\frac{-0,4 \dots -6,5}{0,6 \dots 1,6}$	$\frac{-9,9 \dots -11,6}{0,5 \dots 1,2}$
Лесотундра/Forest Tundra				
$\frac{-0,4 \dots -5,0}{0,7 \dots 1,5}$	$\frac{-6,3 \dots -8,9}{0,7 \dots 1,2}$	$\frac{-8,9 \dots -10,8}{0,7 \dots 1,1}$	$\frac{-0,4 \dots -4,2}{1,0 \dots 1,8}$	$\frac{-8,8 \dots -10,5}{0,9 \dots 1,4}$
Северная тайга/Northern Taiga				
$\frac{-0,1 \dots -0,5}{0,9 \dots 1,6}$	$\frac{-4,9 \dots -6,9}{0,9 \dots 1,4}$	$\frac{-8,5 \dots -9,6}{0,8 \dots 1,0}$	$\frac{-0,1 \dots -0,7}{1,0 \dots 2,3}$	$\frac{-8,2 \dots -8,7}{1,0 \dots 1,8}$

ных ландшафтов от разрушения. Совместно с институтами ВНИИГаз и ВСЕГИНГЕО, а также объединением «Норильскгазпром» были составлены рекомендации и руководство, предназначенные для специалистов по проектированию, строительству и эксплуатации площадных и линейных сооружений в районах Севера [23–25].

В 2020 г. принята государственная программа «Стратегия развития Российской Арктики до 2035 г.». Программа предусматривает разработку проекта системы «Вечная мерзлота АЗРФ». Основной целью этого проекта является создание государственного мониторинга вечной мерз-

лоты для обеспечения экологического пользования криогенных ресурсов и устойчивого развития арктических территорий.

Исследования состояния криолитозоны включают организацию геотемпературного мониторинга – эффективной системы изучения состояния, прогноза и эволюции инженерно-геокриологических условий при изменении климата и антропогенных воздействий.

Основные задачи исследований закономерностей формирования инженерно-геокриологических условий включают: 1) выбор объектов режимных наблюдений на основе ландшафтной

дифференциации; 2) организация наблюдательной сети, охватывающей естественные, нарушенные ландшафты и природно-технические системы; 3) усовершенствование методики, автоматизации экспериментов и обработки информации; 4) прогноз эволюции термического состояния верхних горизонтов криолитозоны; 5) разработка технологических решений по защите ландшафтов при деградации криолитозоны.

Выводы

1. Обобщены результаты региональных инженерно-геокриологических исследований природно-технических систем в подзонах северной тайги, лесотундры и южной тундры.

2. Методом математического моделирования составлен прогноз изменения глубины протаивания и средней годовой температуры грунтов при антропогенных воздействиях.

3. Предложены основные задачи организации геотемпературного мониторинга в осваиваемых территориях региона.

Список литературы / References

1. Пчелинцев А.М. *Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов*. М.: Наука; 1964. 260 с. [Pchelintsev A.M. *Structure, physical and mechanical properties of frozen soils*. Moscow: Nauka; 1964. 260 p. (In Russ.)]
2. Константинова Г.С. Многолетнемерзлые горные породы Енисейско-Пясинского Севера. *Вопросы региональной геокриологии Средней Сибири*. [Сборник статей]. М.: Изд-во АН СССР; 1961:114–139 (Тр. Игарской НИМС, вып. 2). [Konstantinova G.S. Permafrost rocks of the Yenisei-Pyasinsky North. *Issues of regional geocryology of Central Siberia*. [Collected papers]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1961:114–139 (Proceedings of the Igarsk Permafrost Research Station, Issue 2). (In Russ.)]
3. Тыртиков А.П. Мощность сезонно-талого слоя почвы в районе Игарки. *Труды Игарской НИМС*. Вып. 2. М.; 1961:91–96. [Tyrtikov A.P. The thickness of the seasonally thawed soil layer in the Igarka area. *Proceedings of the Igarsk Permafrost Research Station*, Issue 2. Moscow; 1961:91–96. (In Russ.)]
4. Григорьев Н.Ф. О современном промерзании пород в процессе обмеления рек в районах Енисейского Севера. *Гидрогеология Енисейского Севера*. Л.; 1969:106–108. [Grigorev N.F. Modern rocks freezing in the process of shallowing of the rivers in the North Yenisei region. *Hydrogeology of the Yenisei North*. Leningrad; 1969:106–108. (In Russ.)]

5. Карпов Е.Г. О температуре мерзлой зоны Таймырской депрессии. *Гидрогеология Енисейского Севера*. Вып. 1. Л.; 1969:75–77.

[Karpov E.G. The temperature of the frozen zone of the Taimyr depression. *Hydrogeology of the Yenisei North*. Вып. 1. Leningrad; 1969:75–77. (In Russ.)]

6. Тыртиков А.П. Развитие растительности как фактор формирования и динамики многолетнемерзлых пород. *Проблемы Севера*. Вып. 7. М.: Изд-во АН СССР; 1963:227–231.

[Tyrtikov A.P. Vegetation development as a factor in the formation and dynamics of permafrost. *Problems of the North*. Issue 7. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1963:227–231. (In Russ.)]

7. Бакулин Ф.Г., Ермаков В.Ф. Новые данные о температуре многолетнемерзлых пород в Западной Сибири. *Геокриологические исследования*. Якутск: Якутское кн. изд-во; 1971:83–85.

[Bakulin F.G., Ermakov V.F. New data on the temperature of permafrost in Western Siberia. *Permafrost Research*. Yakutsk: Yakutsk Publishing House; 1971:83–85. (In Russ.)]

8. Григорьев Н.Ф. Изменение мерзлотных условий при создании водохранилищ в Заполярье (на примере Хантайского водохранилища). *Вопросы развития и освоения мерзлых толщ*. Якутск: ИМЗ СО АН СССР; 1990:85–90.

[Grigorev N.F. Changes in permafrost conditions during the creation of reservoirs in the Arctic (on the example of the Khantai reservoir). *Issues of evolution and development of the frozen strata*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB, the USSR Academy of Sciences; 1990:85–90. (In Russ.)]

9. Казанский О.А. Влияние мохово-торфяных покровов на температурный режим грунтов (на примере района нижнего течения р. Курейки). *Термика почв и горных пород в холодных регионах*. Якутск: ИМЗ СО АН СССР; 1982:80–89.

[Kazanskiy O.A. Influence of moss-peat covers on the temperature regime of soils (Case study on lower reaches of the Kureika River). *Thermology of soils and rocks in cold regions*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB Academy of Sciences USSR; 1982:80–89. (In Russ.)]

10. Шевелева Н.С., Хомичевская Л.С. *Геокриологические условия Енисейского Севера*. М.: Наука; 1967. 128 с.

[Sheveleva N.S., Khomichevskaya L.S. *Hydrogeology of the Yenisei North*. Moscow: Nauka; 1967. 128 p. (In Russ.)]

11. Карпов Е.Г., Барановский Е.Л. *Состояние криолитозоны Игарского района Енисейского Севера*. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН; 1999. 90 с.

[Karpov E.G., Baranovskiy E.L. *The state of the cryolithozone in the Igarsky region of the Yenisei North*. Yakutsk: Publishing House of the Permafrost Institute SB RAS; 1999. 90 p. (In Russ.)]

12. Гончаров Ю.М., Попович А.П. Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске. *Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы 9th Международного симпозиума*. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2011:516–518.

[Goncharov Yu.M., Popovich A.P. Construction and facility management of an industrial building on a spatial ventilated foundation in Norilsk. *Problems of permafrost engineering: proceedings of the IX International Symposium*. Yakutsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2011:516–518. (In Russ.)]

13. Дроздов Д.Г., Малкова Г.В., Украинцева Н.Г., Коростелев Ю.В. Мониторинг геокриологических условий южнотундровых ландшафтов Европейского Севера и Западной Сибири. *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире*. Том 3. Тюмень: Печатник; 2012:159–164.

[Drozdov D.G., Malkova G.V., Ukraintseva N.G., Korostelev Yu.V. Monitoring of geocryological conditions of southern tundra landscapes of the European North and Western Siberia *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Studies: Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World*. Tom 3. Tyumen: Pechatnik; 2012:159–164. (In Russ.)]

14. Круподеров В.С., Дубровин В.А. Проблемные аспекты изучения и освоения Арктической криолитозоны. *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире*. Том 3. Тюмень: Печатник; 2012:275–279.

[Krupoderov V.S., Dubrovin V.A. Problematic aspects of the study and development of the Arctic permafrost. *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Studies: Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World*. Tom 3. Tyumen: Pechatnik; 2012:275–279. (In Russ.)]

15. Оберман Н.Г. Многолетний режим температуры криолитозоны европейского Северо-Востока в течение современного потепления климата. *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире*. Том 3. Тюмень: Печатник; 2012:359–364.

[Oberman N.G. Long-term temperature regime of the permafrost zone of the European North-East during the current climate warming. *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Studies: Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World*. Tom 3. Tyumen: Pechatnik; 2012:359–364. (In Russ.)]

16. Рыкова В.В., Шевцова Э.Ю. Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера». *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с*

вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том 3. Тюмень: Печатник; 2012:519–523.

[Rykova V.V., Shevtsova E.Yu. Features of the construction of engineering structures in the permafrost zone: analysis of the information array from the database «Problems of the North». *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Studies: Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World*. Tom 3. Tyumen: Pechatnik; 2012:519–523. (In Russ.)]

17. Шполянская Н.А. Особенности плейстоценово-голоценовой истории криолитозоны западного и восточного секторов Российской Арктики и Субарктики. *Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению: Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире*. Том 3. Тюмень: Печатник; 2012:591–596.

[Shpolyanskaya N.A. Peculiarities of the Pleistocene-Holocene History of the Permafrost Zone in the Western and Eastern Sectors of the Russian Arctic and Subarctic. *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost Studies: Resources and Risks of Permafrost Regions in a Changing World*. Tom 3. Tyumen: Pechatnik; 2012:591–596. (In Russ.)]

18. Мельников Н.И., Власов В.П. Инженерно-геологическая изученность Северо-Востока России. *Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения: Тезисы докладов*. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2017:276–277.

[Melnikov N.I., Vlasov V.P. Engineering and geological knowledge of the North-East of Russia. *11th International Symposium on Permafrost Engineering. Conference abstracts*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2017:96.]

19. Сериков С.И., Зелезныак М.Н., Гuly С.А., Скачков Ю.В., Ружанов В.Е., Романовский В.Е., Холодов А.А. Мониторинг динамики температурного режима в восточной Сибири. *Tenth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Volume 4*. Tyumen: Pechatnik; 2012:516–517.

20. Скрыбин П.Н., Сергеев Б.П. *Тепловой режим грунтов Енисейского Севера*. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1989. 176 с.

[Skryabin P.N., Sergeev B.P. *Thermal regime of soils of the Yenisei North*. Yakutsk: Permafrost Institute, the USSR Academy of Sciences; 1989. 176 p. (In Russ.)]

21. Скрыбин П.Н. Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):43–51.

[Skryabin P.N. Thermal state of soils in the Yenisei Arctic. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021; 26(3):43–51. (In Russ.)]

22. *Методы региональных инженерно-геокриологических исследований для равнинных территорий*. М.: Недра; 1986. 207 с.

[*Methods of regional engineering and geocryological studies for lowland territories*. M.: Nedra; 1986. 207 p. (In Russ.)]

23. Сергеев Б.П., Скрябин П.Н. Радиационный режим различных видов деятельной поверхности на севере Красноярского края и Тюменской области. *Геотермофизические исследования в Сибири*. Новосибирск; 1978:73–85.

[Sergeev B.P., Skryabin P.N. Radiation regime of various types of active surface in the north of the Krasnoyarsk Territory and the Tyumen Region. *Geothermophysical research in Siberia*. Novosibirsk; 1978:73–85. (In Russ.)]

24. Рекомендации по выбору и подготовке строительных площадок, инженерной и биологической рекультивации тундровых массивов, нарушенных в результате строительства газопроводов. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1978. 25 с.

[*Recommendations on the selection and preparation of construction sites, engineering and biological reclamation of tundra massifs disrupted as a result of the construction of gas pipelines*. Yakutsk: Permafrost Institute SB the USSR Academy of Sciences; 1978. 25 p. (In Russ.)]

25. Временное руководство по защите ландшафтов при прокладке газопроводов на Крайнем Севере. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР; 1980. 44 с.

[*Interim Guidance on landscape protection when laying gas pipelines in the Far North*. Yakutsk: Permafrost Institute SB the USSR Academy of Sciences; 1980. 44 p. (In Russ.)]

Об авторе

СКРЯБИН Павел Николаевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория геотермии криолитозоны, Researcher ID: V-9373-2018, Author ID: 6508006475, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

Аффилиация

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Российская Федерация

About the author

SKRYABIN, Pavel Nikolayevich, Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Laboratory of Permafrost Geothermics, Researcher ID: V-9373-2018, Author ID: 6508006475, <https://orcid.org/0000-0001-8155-378X>, e-mail: vsp@mpi.ysn.ru

Affiliation

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 18.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 21.09.2022

Принята к публикации / Accepted 11.10.2022

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 631.4:502.56.568(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Изучение техногенно нарушенных почв Якутии

А. А. Данилова^{1,✉}, А. А. Петров²

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉danilova7alb@yandex.ru

Аннотация

Проблема изучения последствий промышленной добычи полезных ископаемых для объектов окружающей среды была поставлена только в середине XX века. За последние десятилетия число публикаций по теме в мире возросло более чем в 10 раз. Можно выделить два основных направления исследований: прикладное – оценка результатов рекультивационных мероприятий и теоретическое – изучение первичного почвообразования. На основе обзора публикаций, индексированных в БД WoS за 1997–2021 гг., выделены основные методические подходы в разработке проблемы. Наиболее широко исследователи используют физико-химические показатели почв; биологические критерии обычно изучают в комплексе с физическими и химическими. Метод хронорядов признан наиболее информативным в изучении динамики техногенных объектов. Однако из 1440 экосистем, описанных в 700 публикациях, 32 % объектов имели возраст менее 5 лет, 75 % – до 20 лет, 3–4 % – старше 40 лет. В последние годы обсуждается проблема создания моделей почвообразования на техногенных объектах. В Якутии к проблеме обратились в 1992 г. с организацией Института прикладной экологии Севера АН РС (Я). В статье на основе обзора публикаций за 1980–2022 гг. проанализированы итоги изучения физико-химических, биологических свойств, особенностей классификации техногенно нарушенных почв (ТНП) на территории Республики Саха (Якутия). В результате наблюдений во всех почвенно-климатических зонах республики к данному моменту составлено представление о степени информативности разных методических подходов для диагностики состояния ТНП в условиях криолитозоны: опробованы экологические индикаторы от ландшафтного до цитокинетического уровня. В заключении обсуждаются перспективы дальнейших исследований по проблеме.

Ключевые слова: криолитозона, почвы техногенных ландшафтов, классификация, биотестирование

Для цитирования: Данилова А.А., Петров А.А. Изучение техногенно нарушенных почв Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):547–560. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia)

A. A. Danilova^{1,✉}, A. A. Petrov²

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Russian Federation

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

✉e-mail@mail.ru

Abstract

The article presents a review of publications from 1980–2022 which deal with the study of post mining soils (PMS) in the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Though mining in Yakutia began in the 1920s and 1930s, the study of PMS in this territory began only in 1992. Over the past decades, the number of publications on the problem has increased more

than 10 times. Still, there are no exact figures on the area of PMS in this territory. The inventory of the latter as a scientific problem has not yet been posed. This study of the properties of the young soils on post mining dumps was carried out in all the climatic zones of Yakutia from tundra to the middle taiga. A classification of biotopes according to the degree of anthropogenic transformation in the permafrost zone has been proposed. We tested a hierarchical scheme of bioindication of disturbed permafrost ecosystems, including coenotic, population, ontogenetic and cytogenetic levels. Three methodological approaches (physicochemical, microbiological, phytotest) for studying the biogenic stage of primary soil formation in cryolithozone was assessed. The information content of the classical genetic soil science positions for the classification of young PMS under the conditions of different climatic zones of Yakutia is shown. We identified the informativeness of various methodological approaches for diagnosing the state of PMS in the permafrost zone.

Keywords: permafrost zone, post mining soils, classification, biotest

For citation: Danilova A.A., Petrov A.A. Studies of post mining soils in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):547–560. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-547-560>

Введение

Республика Саха (Якутия) расположена в северо-восточной части РФ. Протяженность республики с севера на юг – 2500 км, с запада на восток – 2000 км. Более 40 % территории Якутии находится за Северным полярным кругом. Вся территория входит зону сплошного распространения многолетней мерзлоты. Тринадцать улусов (районов) Республики Саха (Якутия) из 34 отнесены к арктической зоне РФ [1]. Согласно карте Арктического Совета, вся территория Якутии относится к арктической зоне мира [2].

Промышленное освоение Якутии началось в 1920–1930-х г. с разработки месторождений золота в Южной Якутии и в бассейне р. Индигирка, добычи олова в бассейне р. Яна. В 1950-е гг. рост добывающей промышленности был связан с открытием месторождений алмазов в Западной Якутии. Республика является важнейшим сырьевым источником РФ. В настоящее время территория переживает новый этап интенсивного техногенного освоения.

Отметим, что разработка большинства месторождений полезных ископаемых производилась открытым способом, соответственно появились обширные территории, лишенные почвенного и растительного покрова. Изучение техногенно нарушенных территорий республики как самостоятельная научная проблема было поставлено только в 1992 г., благодаря созданию Института прикладной экологии Севера Академии наук Республики Саха (Якутия) под руководством профессора Д.Д. Саввинова.

Цель данного обзора – проанализировать результаты исследований техногенно нарушенных почв Якутии и попытаться выделить перспективы дальнейших исследований.

Краткий обзор подходов к изучению состояния техногенно нарушенных почв

В данном обзоре под техногенно нарушенными (ТН) будем иметь в виду почвы, нарушенные в результате добычи полезных ископаемых (ДПИ).

В 2015 г. Генеральная Ассамблея ООН сформулировала 17 целей для обеспечения устойчивого развития мира (Sustainable Development Goals) [3]. Достижение 13 из них напрямую или опосредованно связано с благополучием почвы [4]. На пути решения поставленных задач возникают сложнейшие противоречия. С ростом населения Земли возрастает потребность в минеральных и энергетических ресурсах. Соответственно, возрастает активность ДПИ, в процессе которой неизбежно нарушается вся экосистема территории. В обзорах [5, 6] нарушение почвенно-растительного покрова территории признается ключевой проблемой, вызывающей каскад экологических и социально-культурных проблем. Если влияние ДПИ на экономические параметры территории, как правило, положительное, на социальную сферу – обычно неоднозначное, то последствия для окружающей среды всегда негативны.

В настоящее время основные месторождения в умеренных широтах планеты исчерпаны и активность по разработке ресурсов смещается в ранее труднодоступные районы, в частности, в высокие широты, где хрупкость экосистем известна [2].

В сравнении с длительностью промышленной добычи полезных ископаемых история изучения последствий этого воздействия на объекты окружающей среды чрезвычайно коротка. В мире данный вопрос как научная проблема был поставлен только во второй половине XX века, интенсивность и глубина исследований существенно возросли только к концу века [7, 8].

Количество публикаций, индексируемых в базе WoS (время обращения 26.03.2022), по ключевым словам *post mining area*, *post mining environments*, *post mining landscapes* за 1997–2021 гг. составило 2404 записей, количество публикаций выросло с 20 записей в 1997 г. до 293 в 2021. Из них 23 % относится к странам Европы, доля США – 14,6 %, Китая – 9,4 %. При поиске по ключевому слову *post mining soils* обнаружено 1134 записи. Рост числа публикаций: с 9 в 1998 г. до 131 в 2020. Преобладающую часть из них (около 40 %) составляют статьи из европейских стран (преимущественно Польша, Чехия, Германия), США – 15 %, Китай – 6, РФ – 1,5 %. Наибольшее число публикаций связано с изучением почв на отвалах угольной промышленности, что обусловлено, на наш взгляд, наличием объектов с длительной историей добычи этого сырья и относительно благоприятными условиями почвообразования на подобных отвалах, позволяющими проследить динамику процессов формирования молодых почв в пределах относительно короткого периода времени.

Общее представление о методических подходах, используемых для изучения техногенных ландшафтов, можно получить из анализа 700 публикаций, процитированных в крупнейших базах данных мира за 1990–2018 гг. [9]. В этом обзоре все критерии подразделены на три группы – описывающие состав, структуру и функции экосистемы. В первые две группы включены показатели надземной растительности, в третью – свойства почвы. Критерии для оценки состояния почвы и их соотношение представлено на рис. 1. Наиболее широко исследователи используют физико-химические показатели (66 %). Биологические показатели обычно изучают в комплексе с физическими и химическими (30 %). Именно такой подход, по мнению авторов, является наиболее информативным для изучения процессов начального почвообразования на отвалах [10–12]. Особенно это касается молекулярно-генетических методов, набирающих популярность в почвенных исследованиях [13].

Важнейшим методологическим инструментом при изучении динамики техногенных ландшафтов, а соответственно, и почв является метод хронорядов [14]. Применительно ТН почв научная ценность подхода связана как с оценкой динамики самого объекта, так и с уточнением особенностей почвообразовательного процесса, происходящего в молодых почвах с так называемым

нулевым моментом [15–18]. Как отмечают авторы [19], несмотря на наличие весьма «возрастных» техногенных объектов, документированных длительных хронорядов очень мало. Так в упомянутом выше обзоре Martins et al. [9] отмечено, что из 1440 экосистем, описанных в 700 публикациях, возраст менее 5 лет имели 32 % объектов, до 20 лет – 75 %, старше 40 лет 3–4 %. По свидетельству Gwenzi [20], один из самых старых документированных хронорядов в мире расположен в Зимбабве – отвалы хвостохранилищ после добычи золота и никеля возрастом около 110 лет.

Важной проблемой в данной области знаний является подбор ориентиров для оценки степени восстановления нарушенной экосистемы [8, 20, 21]. Широко распространено сравнение опытного объекта с исходной ненарушенной экосистемой. Для количественных оценок обычно применяют общепринятый для агроэкосистем индекс качества почвы (SQI) [22]. Суть процедуры заключается в измерении большого ряда показателей почвы, оценку их уровня в баллах и вычислении суммы этих баллов [23]. Появились сомнения в корректности данного подхода для оценки ТН экосистем, поскольку сложно найти границы, ограничивающие список возможных показателей почвы [20]. Упомянутые выше авторы считают, что ТН почва является новым объектом,

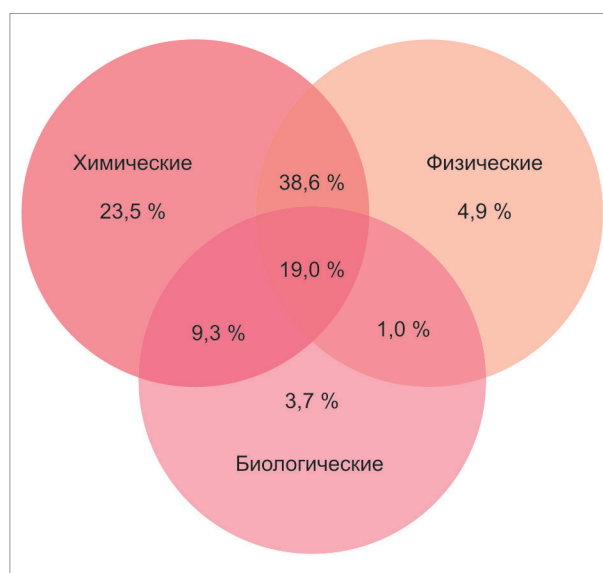


Рис. 1. Соотношение различных методических подходов в изучении почв техногенных ландшафтов мира [9].

Fig. 1. Ratio of different methodical approaches in the study of soils of technogenic landscapes of the world [9].

так как ее свойства невозможно приблизить к показателям исходного ненарушенного аналога. Поэтому оценка состояния такого объекта должна основываться на других принципах.

Как было отмечено выше, изучение почвообразовательных процессов на техногенных ландшафтах при первом приближении преследует две цели. Первая теоретическая – изучение начальных этапов образования почвы с исходного, так называемого ноль-момента, вторая прикладная – разработка схем и оценка результатов рекультивационных мероприятий. Если для достижения первой цели является логичным сравнение получаемых сведений с показателями исходной ненарушенной почвы, то для достижения второй корректность данного подхода вызывает сомнения [20, 24]. Осознавая этот момент, в частности Gwenzi [20], предлагает другой способ, основанный на иерархической оценке состояния экосистемы в целом – функции, статуса, экологических услуг (ecological services). При таком подходе свойства почвы становятся только одним из критериев состояния экосистемы. В этом случае ответ на вопрос – какие свойства экосистемы оценивать, зависит от конечной цели рекультивации – агроиспользование, лесоразведение, рекреация и др. Пример подобной оценки показан в публикации Bennett et al. [24]: через 12 лет после рекультивации (нанесение потенциально плодородного слоя и посев трав) отвалов после открытой добычи угля (Австралия) оценили способность этих территорий функционировать в качестве высокопродуктивного пастбища. После определения химических свойств молодой почвы недостаток NPK был скорректирован при помощи удобрений, что обеспечило стабильную продуктивность пастбища. На основании последнего результат рекультивации был оценен как успешный.

В последние годы обсуждается проблема создания моделей почвообразования на техногенных объектах. Leguédais et al. [25] на основе анализа имеющихся моделей почвообразования сформулировали исходные параметры для создания такой модели. Интересен тот факт, что первой исходной позицией для этих целей является постулат «молодая почва формируется при благоприятных условиях тепла и влаги – среднегодовая температура воздуха выше 0 °C и количество осадков за год – не менее 800 мм». Отсюда следует, что создаваемые в ближайшее

время модели не будут применимы для циркумполярных областей.

Обзор состояния проблемы в Республике Саха (Якутия)

Как было отмечено выше, в международных базах научного цитирования материал по ТН почвам России представлен весьма ограниченно (менее 2 %). В российских БД подобная информация по почвам Якутии также остается слабо освещенной. Так, в РИНЦ по ключевым словам *мерзлотные почвы* обнаружено 7348 публикаций, из них *техногенно нарушенные* – 18 (по Якутии – 6). По ключевым словам *почвы Якутии* обнаружено 10264 записи. Из них по словам *техногенно нарушенные* – 43 записи (время обращения 02.06.2022). Таким образом, в мировой литературе результаты исследований техногенных почв РФ представлены слабо. В пределах РФ доля публикаций, касающихся объектов в Якутии, крайне недостаточна. Все же на основе доступных нам публикаций попытаемся кратко осветить историю и современное состояние вопроса.

На рис. 2 представлена карта-схема наиболее значимых разрабатываемых месторождений полезных ископаемых в Якутии. При этом точных цифр площадей почв, нарушенных при разведке и добыче полезных ископаемых, пока не существует. По официальным данным, на конец 2020 г. общая площадь нарушенных земель составляет 15,5 тыс. га, куда включены территории, задействованные не только в ДПИ, но и в энергетике, транспорте, связи, радиовещании, телевидении, информатике, для обеспечения космической деятельности, обороны, безопасности и земель иного специального назначения [26]. Необходимость инвентаризации ТН почв Якутии как научная проблема обсуждается только в последнее время [27].

Начальный этап исследования техногенных ландшафтов в Якутии, как и других регионах, проводился геоботаниками – рекультиваторами. По динамике растительности на отвалах можно было составить первое представление о свойствах субстратов и молодых почв. Так, на отвалах после разработки коренных месторождений алмазов (кимберлитовые трубки «Мир», «Айхал», «Удачная») было установлено, что получение стабильного травяного покрова возможно только после отсыпки потенциально плодородного слоя мощностью не менее 20–40 см, применения



Рис. 2. Минерально-сырьевая база Республики Саха (Якутия) [28].

Fig. 2. Mineral Resource Base of the Republic of Sakha (Yakutia) [28].

удобрений и высеве семян трав дикороссов или местной селекции [29, 30]. После разработки россыпных месторождений алмазов (бассейн р. Анабар) наблюдали удовлетворительное самозарастание отвалов, которое можно стимулировать посевом трав местной селекции [31, 32]. Также удовлетворительное самозарастание отвалов после добычи угля было установлено на угольных разрезах Кангаласский (Центральная Якутия) и Нерюнгринский (Южная Якутия) [33, 34].

Сходные результаты были получены на дражных отвалах после добычи золота [35, 36].

Первый опыт систематизации антропогенно нарушенных почв Якутии представлен Г.Н. Савиновым [37]. Осознавая роль почвы как основы функционирования экосистемы, автор выделил три эколого-почвенных комплекса: агрогенный, селитебный, техногенный. В работе впервые был приведен обобщенный материал по географии и основным свойствам ТН почв Якутии.

Сложность ТН почв как объектов исследования заключается в чрезвычайной гетерогенности как в пространстве, так и по уровню нарушенности. Е.Г. Шадрина, Я.Л. Вольперт [38] предложили классификацию биотопов в криолитозоне по степени антропогенной трансформации: 1) макроантропогенно трансформированные – полностью удален или уничтожен почвенный и растительный покров, 2) мезоантропогенно трансформированные – удаленный растительный покров, нарушенный или загрязненный почвенный покров, 3) микроантропогенно трансформированные – ненарушенный почвенный и частично нарушенный или загрязненный растительный покров. Согласно этой классификации, все объекты горно-добывающей промышленности относятся к первой группе. Самым известным примером разрушительного влияния на экосистему является разработка коренных месторождений алмазов. Объекты нефтедобывающей и газоконденсатной промышленности в зависимости от специфики условий могут быть отнесены к группе 2 или 3. На примере территории газоконденсатного месторождения (Чаяндинское), угольного (Эльгинское), урановорудного (Эльконское) была установлена специфичность загрязнения почв под влиянием различных отраслей ДПИ. Для нефтедобывающей промышленности характерно загрязнение территории водным путем, угольной – воздушным (пыль при буровзрывных работах), атомной – радиоактивное заражение территории всеми названными путями [39]. Была установлена специфичность динамики нефтяного загрязнения для криогенных почв. А именно, показана способность нефти к длительному сохранению в мерзлотной почве как за счет низкой естественной биodeградации, так и за счет миграции в профиле почвы в процессах замерзания-оттаивания [40].

Техногенно нарушенные почвы Якутии достаточно широко изучают с точки зрения загрязнения тяжелыми металлами [41], радионуклидами [42, 43]. Выявлены естественные и техногенные источники этих загрязнителей, изучены интенсивность и основные факторы их накопления, разработаны некоторые способы снижения фона загрязнения.

Как уже отмечено выше, в изучении ТН почв особенно информативны исследования в хронологиях. Подобных объектов в исследованиях на территории Якутии немного. Это связано прежде всего с активно продолжающейся разработкой

месторождений. Как известно, на таких объектах территория используется очень динамично и часто на старые отвалы наслаивают новые слои пустой породы. В этом плане интересны исследования, проведенные на объектах, возраст которых известен и конфигурация отвалов относительно стабильна. В работе [43] представлен опыт сравнения динамики распределения в профиле почвы радионуклидов ^{238}U , ^{226}Ra в зависимости от срока начала поступления элементов в среду. Оказалось, что в сходных по генезису почвах, куда радионуклиды стали поступать 57 лет назад, профильное распределение их характеризуется как аккумулятивно-иллювиальное, в то время как при длительности 40 лет – как аккумулятивное без проявления процессов иллювиирования.

Высока научная ценность многолетних мониторинговых исследований на ключевых точках. Подобные работы проведены на территории Накынского кимберлитового поля [44]. Полевые исследования были проведены в 2007–2018 гг. с периодичностью 3–4 года на территории северо-таежных ландшафтов Ханья-Накынского междуречья в Западной Якутии (Нюрбинский ГОК). В работе показана динамика увеличения площадей почв, загрязненность которых оценивается как высокая и чрезвычайно опасная (см. таблицу).

В целом, если публикаций по динамике техногенного загрязнения почв относительно много, то данные по динамике почвообразования на отвалах представлены редко. Известны подобные сведения по отвалам ГОК «Мирнинский» [45]. В работе сделан вывод, что спустя 30 лет после отсыпки эти отвалы без рекультивации до сих пор не заняты растительностью, соответственно почвообразовательный процесс не фиксируется. На рекультивированных и самозарастающих отвалах почвообразовательный процесс при помощи традиционных физико-химических анализов не зафиксирован. Это связано с особенностями состава отвальных пород, поднятых на поверхность с глубины до 200 м, и крайней криоаридностью климата.

При относительно более благоприятных исходных условиях признаки первичного почвообразования могут быть зафиксированы за более короткий срок. Так, опубликовано описание молодых почв, обнаруженных через 20 лет после разработки россыпного месторождения золота на территории тундровой части Куларского зо-

**Площадь и уровень загрязнения почвенного покрова
на территории промышленной площадки Нюрбинского ГОКа [44]**

**Area and level of soil contamination
in the territory of the industrial site of Nyurbinsky Mining and Processing Plant [44]**

Категория загрязнения. Level of soil contamination	Уровень суммарного показателя Zc Level of total contamination indicator	Площадь по годам исследований, км ² Soil area by years of research, km ²			
		2007	2011	2014	2018
Допустимая	<16	222,5	171,5	70,0	61,0
Умеренно опасная	16–32	210,0	305,0	267,0	104,9
Высоко опасная	32–128	45,0	1,44	122,0	260,9
Чрезвычайно опасная	>128	–	–	18,2	51,6

лотоносного района [46]. За этот период на отвалах восстановилась растительность, сходная с естественной. Молодые почвы, по классификации [47], отнесены к эмбриоземам дерновым и органо-аккумулятивным. Сделан вывод, что по морфологическим признакам эмбриоземы исследуемых отвалов мало отличаются от зональных почв – аллювиальных дерново-глееватых или тундровых глеевых, это обусловлено тем, что почвы тундр имеют упрощенный профиль, характерный для территории с замедленными темпами почвообразования.

Сходный объект изучен на отвалах после разработки россыпных месторождений алмазов в бассейне р. Анабар. Низкая фитотоксичность переработанных субстратов обуславливает достаточно быстрое самозаращение отвалов. При высеве трав местной селекции на фоне минеральных удобрений через 2 года образовался травяной покров с проективным покрытием до 60–80 %. Формирование при этом весьма активного и разнообразного по функциональному спектру микробного сообщества в субстрате может быть признаком начального этапа почвообразовательного процесса [31, 48, 49].

Описанные выше объекты исследования чрезвычайно сложны в связи с наложением антропогенного фактора на целый ряд неблагоприятных естественных факторов, в частности, климата, геологических особенностей криолитозоны. В этих условиях необходим комплексный подход в оценке состояния среды. Такая оценка возможна при помощи методов биоиндикации – применения в качестве индикаторов живых организмов. Предложена иерархическая схема биоиндикации нарушенных экосистем Севера, включающая ценотический, популяционный, онтогенетический и цитогенетический

уровни [38, 50]. С точки зрения оценки состояния почв наиболее информативны два последних уровня как более чувствительные для регистрации слабых воздействий. В качестве индикатора организменного уровня широко опробован показатель флуктуирующей асимметрии (ФА) листьев деревьев. Представлен опыт соотнесения уровня загрязнения почвы тяжелыми металлами с величиной ФА листьев березы повислой [41]. В пределах Накынского кимберлитового поля показано увеличение ФА листьев березы при повышении в почве концентрации кислоторастворимых форм свинца и кадмия.

В качестве индикатора клеточного уровня опробован показатель частоты встречаемости патологий митоза (показателя мутагенной активности) в корнях проростков лука-батуна (*Allium fistulosum* L.), выращенных на почвенных пробах. На территории Мирнинского промышленного узла (зона воздействия алмазодобывающей промышленности), площадки восьми геологоразведочных скважин Чаяндынского нефтегазоконденсатного и Среднетюнгского газоконденсатного месторождений установлено снижение всхожести семян и повышение частоты мутаций в клетках корня лука, что свидетельствует о техногенном преобразовании состояния почвенной среды до уровня, вызывающего нарушение цитогенетического гомеостаза корней высших растений [51].

Особой группой биоиндикаторов является состояние живой фазы почвы. Изучено распределение дождевых червей на рекультивированных отвалах на территории деятельности Мирнинского ГОК, АК «АЛРОСА» (ЗАО) [52]. Исследование микробного сообщества грунтов и молодых почв на этом же объекте показало следующие отличительные черты биологических свойств

отвалов по сравнению с зональной почвой: нарастание числа КОЕ с глубиной до величин, превышающих величины зональной почвы; преобладание клеток с относительно низкой скоростью роста на агаризованной среде; сочетание высокой численности микробного комплекса эмбриозема с низкими показателями функционального разнообразия и слабой активностью потребления полимеров. На основе биологических критериев установлена низкая экологическая эффективность упрощенной схемы рекультивации отвалов алмазодобывающей промышленности [45].

На основе многолетних исследований на территории Нерюнгринского каменноугольного разреза ПАО «Мечел» разработана шкала для оценки экологической устойчивости микробного сообщества техногенно трансформированных почв. Практическое значение способа заключается, во-первых, в определении стадии почвообразования на угольных отвалах, минуя традиционный анализ содержания органического углерода, что позволяет обойти проблему дифференциации углерода биологического и техногенного происхождения в субстрате, во-вторых в возможности прогноза перспективности рекультивационных мероприятий [49].

Проведена проверка применимости традиционных методов биоиндикации почвенной среды на техногенных ландшафтах криолитозоны. Так, определена заселенность техногенных субстратов клетками бактерий рода *Azotobacter* в зональном ряду объектов от южной до полярной Якутии. Высокое число этих микроорганизмов в изученных объектах заставило задуматься о корректности традиционного подхода к интерпретации результатов данного биотеста [53].

На примере отвалов на территории деятельности Мирнинского ГОК, АК «АЛРОСА» (ЗАО) представлен опыт комплексного подхода к оценке состояния техногенно нарушенных почв. Проведена оценка чувствительности трех методических подходов для определения степени биогенной стадии почвообразования – физико-химического, микробиологического и фитотеста. Сделан вывод, что достоверная дифференциация всех типов молодых почв на данном объекте возможна только по способности почвы поддерживать рост высших растений (фитотест на проростках капустовых) [54, 55].

Остается актуальной задачей совершенствование классификации ТН почв. Существуют два подхода к решению проблемы, соответствующие

двум названным выше целям изучения нарушенных почв – прикладной (рекультивация) и теоретической. По классификации и диагностике почв России 2004 г. техногенно преобразованные образования (ТПО) не являются почвами в докучаевском смысле этого понятия, но выступают объектами почвенного картографирования и группировка ТПО базируется на технологических особенностях формирования субстрата, т. е. данная классификация применима в первую очередь в прикладных целях. На основе данной классификации грунты и почвогрунты ТПО Западной Якутии определены как натурфабрикаты, артифабрикаты, токсифабрикаты, реплантоземы, проведена систематизация, составлены карты их современных ареалов. Эти образования изучаются, прежде всего, как источники негативного воздействия на прилегающий почвенный покров [56].

Другой подход к данным объектам предлагает профильно-генетическая классификация почв техногенных ландшафтов (ТЛ) [47], согласно которой хотя ТЛ представляет собой экотип, внедренный в систему естественных ландшафтов, тем не менее, в посттехногенную фазу развития естественные процессы начинают преобладать над антропогенными и поэтому почвы, формирующиеся в ТЛ, необходимо признать естественно историческими образованиями, и, следовательно, подходить к их классификации необходимо с позиций классического генетического почвоведения.

Показана информативность данного подхода для классификации молодых почв на территории ряда ТЛ в условиях разных природно-климатических зон Якутии от тундры до средней тайги, где выделены три стадии эволюционного ряда эмбриоземов. В тундрово-лесной почвенно-растительной подзоне Якутии исследованы техногенные объекты после разработки россыпных месторождений алмазов в среднем течении р. Анабар в пределах горного отвода АК «АЛРОСА» ПАО и АО «Алмазы Анабара» [57], а также техногенные ландшафты Куларского золотоносного района Усть-Янского района [46]; в северо-таежной почвенно-растительной подзоне – объекты после добычи золота на участках «ЛАЗО» и «Сентачан» и после добычи олова на участках шахты «Эгэ-Хайа» и карьера «Костер» Верхоянского района [58]; в среднетаежной почвенно-растительной подзоне изучены объекты на отвалах вскрышных пород после добычи алмазов Мирнинского ГОК АК «АЛРОСА» ПАО [45, 52,

54]; на отвалах вскрышных пород после добычи каменного угля ГОК «Денисовский» и «Инаглинский» ООО УК «КОЛМАР» в бассейне р. Чульман (Нерюнгринский район) [59], изучены молодые почвы на карьере «Кильдямский» после добычи песка в окрестностях г. Якутск [60].

В результате исследований отмечена необходимость дополнения профилно-генетической классификации почв техногенных ландшафтов [47] новыми таксономическими единицами, для чего нужны дополнительные сведения по морфологии, физико-химическим и микробиологическим свойствам молодых почв, сформированных в условиях различных природно-климатических зон Якутии.

Заключение

Если учесть длительность промышленной добычи полезных ископаемых, то история изучения последствий этого воздействия на объекты окружающей среды чрезвычайно короткая. Данный вопрос как научная проблема был поставлен только во второй половине XX в. Интенсивность и глубина исследований существенно возросли только к концу XX в. История разработки проблемы в Якутии еще короче: целенаправленные исследования почв техногенных ландшафтов Якутии были начаты только в 1992 г., первый опыт систематизации этих знаний был предпринят в 2007 г. В последующие годы исследованиями были охвачены объекты во всех климатических зонах Якутии. Разнообразие природных и геологических условий формирования объектов техногенеза обусловили некоторую пестроту результатов этих исследований. Тем не менее можно считать, что к данному моменту составлено представление о степени информативности разных уровней исследования для диагностики состояния техногенно нарушенных почв в криолитозоне (от изучения профиля до особенностей микробных сообществ).

Перспективы исследований

Необходим переход на мультидисциплинарный уровень исследований, когда изучение почв становится частью комплексных наблюдений. В качестве идеального будущего этих исследований можно бы было представить создание, например, комплексного стационара в полярной Якутии в районе отвалов Куларского золотоносного района для изучения динамики самовосстановления техногенно нарушенных поляр-

ных экосистем на фоне изменения климата. Экологический статус и проблемы этого объекта описаны ранее [61]. По свидетельству автора одного из последних во времени обзоров по проблеме Gwenzi [20], в мире известно только два стационара, где проводится длительное мультидисциплинарное изучение техногенно нарушенных экосистем, – хвостохранилище в Зимбабве (Южная Африка) после добычи золота возрастом 110 лет и объект «Chieken Creek» в Германии, где в 2005 г. на территории после открытой добычи угля был создан искусственный ландшафт, имитирующий все компоненты водосборной территории. Объект был признан междисциплинарной лабораторией по изучению начальных этапов формирования экосистемы после техногенного разрушения [62]. Понятно, что такие программы очень дороги и для обеспечения длительных наблюдений необходимо гарантированное финансирование на многие десятилетия. Но если учесть, сколько полезных ископаемых дают недра Якутии, то цены, видимо, были бы сопоставимыми.

Список литературы / References

1. Федеральный закон «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации» от 13.07.2020 N 193-ФЗ.
[Federal Law «On State Support of Entrepreneurial Activity in the Arctic Zone of the Russian Federation» dt. 13.07.2020 N 193-FZ (In Russ.)]
2. Tolvanen A., Eilu P., Artti Juutinen A., Kangas K., Kivinen M., Markovaara-Koivisto M., Naskali A., Salokannel V., Tuulentie S., Similä J. Mining in the Arctic environment – A review from ecological, socioeconomic and legal perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2019;233:832–844. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.124>.
3. Sustainable Development Goals: The 17 Goals [<https://sdgs.un.org/goals>] Department of Economic and Social Affairs, 2015 [обновлено 14 ноября 2022, процитировано 14 ноября 2022]. Доступно: <http://www.example.ru>.
4. Lal R., Bouma J., Brevik E., Dawson L., Field D.J., Glaser B., Hatano R., Hartemink A.E., Kosaki T., Lascelles B., Monger C., Muggler C., Ndzana G.M., Norra S., Pan X., Paradelo R., Reyes-Sánchez L.B., Sandén T., Singh B.R., Spiegel H., Yanai J., Zhang J. Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*. 2021;25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>.
5. Worlanyo A.S., Li Jiangfeng L. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-

- mined land restoration and land-use: A review. *Journal of Environmental Management*. 2021;279.111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>.
6. Forget M., Rossi M. Mining region value and vulnerabilities: Evolutions over the mine life cycle. *The Extractive Industries and Society*. 2021;8(1). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.010>.
7. Uzarowicz L., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., Kwasowski W., Pędziwiatr A. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020;71(4). <https://doi.org/10.37501/soilsa/131615>.
8. Spasić M., Borůvka L., Vacek O., Drábek O., Tejnecký V. Pedogenesis problems on reclaimed coal mining sites. *Soil and Water Research*, 2021;16. <https://doi.org/10.17221/163/2020-SWR>.
9. Martins W.B.R., Lima M.D.R., Junior U. de O.B., Amorim L.S.V-B., Oliveira F.de A., Schwartz G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. *Ecological Engineering*. 2020;145.105707. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105707>.
10. Uzarowicz L., Wolińska A., Błońska E., Szafranek-Nakonieczna A., Kuźniar A., Ślodeczyk Z., Kwasowski W. Technogenic soils (Technosols) developed from mine spoils containing Fe sulphides: Microbiological activity as an indicator of soil development following landreclamation. *Applied Soil Ecology*. 2020;156.103699. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103699>.
11. Thavamani P., Samkumar R.A., Satheesh V., Subashchandrabose S.R., Ramadass K., Ravi Naidu R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites. *Environmental Pollution*. 2017;230. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.056>.
12. Lemanowicz J., Brzezinska M., Siwik-Ziomek A., Koper J. Activity of selected enzymes and phosphorus content in soils of former sulphur mines. *Science of The Total Environment*. 2020;708.134545 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134545>.
13. Baveye P.C., Berthelin J., Munch J.-C. Too much or not enough: Reflection on two contrasting perspectives on soil biodiversity. *Soil Biology and Biochemistry*. 2016;103. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.008> 0038-0717
14. Huggett R.J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena*. 1998;32.
15. Banning N.C., Lalor B.M., Cookson W.R., Grigg A.H., Murphy D.V. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and post-mining rehabilitation forest: Which substrates discriminate? *Applied Soil Ecology*. 2012;56.
16. Li J., Xin Z., Yan J., Li H., Chen J., Ding G. Physicochemical and microbiological assessment of soil quality on a chronosequence of a mine reclamation site. *European Journal of Soil Science*. 2018;69. <https://doi.org/10.1111/ejss.12714>
17. Schmid C. A.O., Reichel R., Schröder P., Brüggemann N., Schlöter M. 52 years of ecological restoration following a major disturbance by opencast lignite mining does not reassemble microbiome structures of the original arable soils. *Science of the Total Environment* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140955> 0048-9697
18. Moradi J., John K., Vicentini F., Vesela H., Vicens J., Ardestani M.M., Jan Frouz J. Vertical distribution of soil fauna and microbial community under two contrasting post mining chronosequences: Sites reclaimed by alder plantation and unreclaimed regrowth. *Global Ecology and Conservation*. 2020;23.e01165. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01165>
19. Salom A.T., Kivinen S. Closed and abandoned mines in Namibia: a critical review of environmental impacts and constraints to rehabilitation. *South African Geographical Journal*. 2020;102(3). <https://doi.org/10.1080/03736245.2019.1698450>
20. Gwenzi W. Rethinking restoration indicators and end-points for post-mining landscapes in light of novel ecosystems Willis. *Geoderma*. 2021; Vol:387.114944. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114944>
21. Van der Heyde M., Bunce M., Dixon K., Wardell-Johnson G., White N.E., Nevill P. Changes in soil microbial communities in post mine ecological restoration: Implications for monitoring using high throughput DNA sequencing M. *Science of The Total Environment*. 2020;749-20-142262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142262>
22. Muñoz-Rojas M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2018;5. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>
23. Moebius-Clune B.N., Moebius-Clune D.J., Gugino B.K., Idowu O.J., Schindelbeck R.R., Ristow A.J., van Es H.M., Thies J.E., Shayler H.A., McBride M.B., Kurtz K.S.M., Wolfe D.W., Abawi G.S. *Comprehensive Assessment of Soil Health – The Cornell Framework*. Edition 3.2. NY: Cornell University. Geneva; 2016.
24. Bennett J.McL., Melland A.R., Eberhard J., Patton C., Clewett J.F., Newsome T., Baillie C. Rehabilitating open-cut coal mine spoil for a pasture system in south east Queensland, Australia: Abiotic soil properties compared with unmined land through time. *Geoderma Regional*. 2021;25. e00364. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00364>
25. Leguëdois S., Séré G., Auclerc A., Cortet J., Huot H., Ouvrard S., Watteau F., Schwartz C., Morel J.L. Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma*. 2016; 262. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.008>
26. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды. Якутск: Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства Правительства Республики Саха (Якутия); 2021. 677 с.
- [State report on the status and protection of the environment. Yakutsk: Ministry of Ecology, Nature Management and Forestry of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia)]

27. Легостаева Я.Б., Журавлев А.И., Попов В.Ф., Шадрин О.В., Ноев Д.С. Инвентаризация нарушенных геологоразведочными работами земель Западной Якутии по данным дистанционного зондирования. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. 2022;25(1).
[Legostaeva YA.B., Zhuravlev A.I., Popov V.F., Shadrin O.V., Noev D.S. Inventory of the lands of Western Yakutia disturbed by geological exploration according to remote sensing data. *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. (In Russ.). 2022;25(1)]
28. Схема комплексного развития производительных сил, транспорта и энергетики Республики Саха (Якутия) до 2020 года. Сводный том. Якутск: Правительство Республики Саха (Якутия); 2006. 279 с.
[Scheme of integrated development of production forces, transport and energy of the Republic of Sakha (Yakutia) until 2020. Cumulated volume. Yakutsk: Government of the Republic of Sakha (Yakutia); 2006. 2006. (In Russ.)]
29. Лебедева Н.А., Лонкунова А.Я. Биологическая рекультивация земель, нарушенных при добыче алмазов в Якутии. *Растения и промышленная среда*. 1990;13.
[Lebedeva N.A., Lonkunova A.YA. Biological reclamation of lands disturbed during diamond mining in Yakutia. *Rasteniya i promyshlennaya Sreda*. 1990;13. (In Russ.)]
30. Миронова С.И., Кудинова З.А. Заращение растительности на угольных отвалах в Якутии. *Вестник СВФУ*. 2012;9(3).
[Mironova S.I., Kudinova Z.A. Overgrowing of vegetation on coal dumps in Yakutia. *Vestnik SVFU*. 2012;9(3). (In Russ.)]
31. Сивцева Н.Е., Легостаева Я.Б. Биологический этап рекультивации на россыпных месторождениях алмаза (в среднем течении реки Анабар, Республики Саха (Якутия)). *Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием*. Апатиты; 2019.
[Sivceva N.E., Legostaeva YA.B. Biologicheskij etap rekul'tivacii na rossypanyh mestorozhdeniyah almaza (v srednem techenii reki Anabar, Respubliki Saha (Yakutiya)). *Environmental problems of the northern regions and ways to solve them. Abstracts of the 7th All-Russian Scientific Conference with international participation*. Apatity; 2019. (In Russ.)]
32. Миронова С.И., Гаврильева Л.Д., Петров А.А., Никифоров А.А. Биологическая рекультивация промышленных земель Якутии. М.: Издательский дом Академии Естествознания; 2021. 166 с. DOI:10/17513/np.446.
[Mironova S.I., Gavril'eva L.D., Petrov A.A., Nikiforov A.A. Biological recultivation of industrial lands of Yakutia. M.: Publishing House of the Academy of Natural Sciences; 2021. <https://doi.org/10/17513/np.446> (In Russ.)]
33. Петрова А.Н. Выращивание многолетних злаковых трав на дражных полигонах в Южной Якутии. *Освоение Севера и проблема рекультивации*. Сыктывкар; 1994:273–281.
[Petrova A.N. Cultivation of perennial grasses on draining grounds in South Yakutia. *Development of the North and the problem of recultivation*. Syktyvkar; 1994 (In Russ.)]
34. Миронова С.И., Иванов В.В., Кудинова З.А. Антропогенная динамика растительности Севера (в зоне влияния разреза «Нерюнгринский»). *Бюлл. МОИП. Отдел биол.* 2009;114(3).
[Mironova S.I., Ivanov V.V., Kudinova Z.A. Anthropogenic dynamics of the vegetation of the North (in the zone of influence of the Neryungri section). *Byull. MOIP. Otdel biol.* 2009;114(3). (In Russ.)]
35. Кузьмин Ю.И. Биологическая рекультивация техногенных отвалов в условиях Крайнего Севера. *Экология*. 1985;(2):21–24.
[Kuz'min Yu. I. Biological reclamation of technogenic dumps in the conditions of the Far North. *Ecology*. 1985;(2):21–24. (In Russ.)]
36. Миронова С.И., Иванов В.В. Рекультивация нарушенных при добыче золота земель Южной Якутии. *International journal of applied and fundamental research*. 2009;(6):13–15.
[Mironova S.I., Ivanov V.V. Reclamation of lands disturbed during gold mining in South Yakutia. *International journal of applied and fundamental research*. 2009;(6):13–15. (In Russ.)]
37. Саввинов Г.Н. Эколого-почвенные комплексы Якутии. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр»; 2007. 312 с.
[Savvinov G.N. *Ecological and soil complexes in Yakutia*. M.: ООО «Nedra-Biznescentr»; 2007. (In Russ.)]
38. Шадрин Е.Г., Вольперт Я.Л. Биоиндикация воздействия горнодобывающей промышленности на наземные экосистемы Севера: эффективность цено-тического, популяционного и онтогенетического подходов. *Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования. Сб. статей V Всероссийской научно-практической конференции*. Нижний Тагил 1-4 марта. 2017.
[Shadrina E.G., Vol'pert YA.L. Bioindication of the impact of the mining industry on the terrestrial ecosystems of the North: the effectiveness of cost, population and ontogenetic approaches. *Biological systems: stability, principles and mechanisms of functioning. Collection of articles of the 5th All-Russian Scientific and Practical Conference*. Nizhnij Tagil 1-4 marta. 2017. (In Russ.)]
39. Саввинов Г.Н., Пестерев А.П., Дмитриев А.И., Тарабукина В.Г., Данилов П.П. Почвы Южной Якутии в условиях промышленного освоения. *Проблемы региональной экологии*. 2011;(4).
[Savvinov G.N., Pesterev A.P., Dmitriev A.I., Tarabukina V.G., Danilov P.P. Soils of South Yakutia under conditions of industrial development. *Regional environmental issues*. 2011;(4) (In Russ.)]

40. Глязнецова Ю.С., Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Зуева И.Н. Мониторинг состояния нефтезагрязненных почв криолитозоны. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018;(29): 4;111–128. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2018-4-111-128>.
- [Glyaznecova YU.S., SChalaya O.N., Lifshic S.H., Zueva I.N. Monitoring the state of oil-contaminated soils in the permafrost zone. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*. 2018;(29):4. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-4-111–128. (In Russ.)]
41. Легостаева Я.Б., Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Дягилева А.Г. Эколого-геохимическая и биоиндикационная оценка трансформации экосистем при разработках коренных месторождений алмазов в Якутии. *Современные проблемы науки и образования*. 2011;(6).
- [Legostaeva YA.B., SShadrina E.G., Soldatova V.YU., Dyagileva A.G. Ecogeochemical and bioindication assessment of transformation of ecosystem in process drafting of primary deposits of diamonds in Yakutia. *Modern problems of science and education*. 2011;(6) (In Russ.)]
42. Собакин П.И., Молчанова И.В. Миграция тяжелых естественных радионуклидов в почвенно-растительном покрове в условиях техногенного загрязнения. *Экология*. 1998;(2).
- [Sobakin P.I., Molchanova I.V. Migration of Heavy Natural Radionuclides in the Soil and Vegetation Cover under the Conditions of Technogenic Pollution. *Ekologiya*. 1998;(2) (In Russ.)]
43. Чевычелов А.П., Собакин П.И. Содержание, распределение и формы миграции ²³⁸U почва природных и техногенных ландшафтов Южной Якутии. *Почвоведение*. 2020;(1):110–118. <https://doi.org/110-118.10.31857/S0032180X20010062>
- [Chevychelov A.P., Sobakin P.I. Content, distribution, and migration of ²³⁸u in soils of natural and technogenic landscapes of Southern Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2020;(1):110–118. <https://doi.org/110-118.10.31857/S0032180X20010062> (In Russ.)]
44. Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б. Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(12). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2.948.146>.
- [Gololobova A.G., Legostaeva YA.B. Ecogeochemical monitoring of soil cover on diamond mining site in Western Yakutia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12). <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2.948.146>. (In Russ.)]
45. Данилова А.А., Саввинов Г.Н., Петров А.А., Данилов П.П. Биологическая характеристика почвогрунтов многолетних отвалов алмазодобывающей промышленности Якутии. *Сибирский экологический журнал*. 2012;(5):749–756.
- [Danilova A.A., Savvinov G.N., Petrov A.A., Danilov P.P. Biological characterization of soil dumps in diamond-mining industry of Yakutia. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal*. 2012;(5):749–756. (In Russ.)]
46. Иванова А.З., Десяткин Р.В. Техногенные почвы Куларского золотоносного района. *Успехи современного естествознания*. 2018;(6):71–72.
- [Ivanova A.Z., Desyatkin R.V. Technogenic soils of the Kular gold-bearing region. *Advances in current natural sciences*. 2018;(6):71–72. (In Russ.)]
47. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов. *Сибирский экологический журнал*. 2002;9(3):255–261.
- [Kurachev V.M., Androhanov V.A. Classification of soils in technogenic landscapes. *Sibirskiy Ekologicheskij Zhurnal*. 2002;9(3):255–261 (In Russ.)]
48. Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е. Опыт восстановления нарушенных земель прииска “Маят” (среднее течение р. Анабар). *Почвенные ресурсы Сибири: вызовы XXI века. Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию выдающегося организатора науки и первого директора ИПА СО РАН Романа Викторовича Ковалева*. Новосибирск: 2017; 2:180–185.
- [Legostaeva YA.B., Sivceva N.E. The experience of restoration of disturbed land mine «Mayat» (average flow of the Anabar River). *Soil resources of Siberia: challenges of the 21th century. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with international participation dedicated to the 110th anniversary of the outstanding organizer of science and the first director of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS Roman Viktorovich Kovalev*. Novosibirsk: 2017;2:180–185. (In Russ.)]
49. Данилова А.А., Легостаева Я.Б., Сивцева Н.Е., Петров А.А. Способ оценки устойчивости сапротрофного микробного сообщества почв методом мультисубстратного теста. *Патент на изобретение № 2678876. Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 04 февраля 2019 г.*
- [Danilova A.A., Legostaeva YA.B., Sivceva N.E., Petrov A.A. A method for assessing the stability of the saprotrophic microbial community of soils by the multi-substantial test method. *Patent for invention No. 2678876. Date of state registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation dt. 04 February 2019*. (In Russ.)]
50. Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Опыт применения показателей флуктуирующей асимметрии растений и животных для оценки качества среды в наземных экосистемах: результаты 20-летних исследований природных и антропогенно трансформированных территорий. *Онтогенез*. 2018;49(1). <https://doi.org/10.7868/S0475145018010044>.
- [Shadrina E.G., Volpert Ya. L. Experience of applying plant and animal fluctuating asymmetry in assess-

ment of environmental quality in terrestrial ecosystems: results of 20-year studies of wildlife and anthropogenically transformed territories. *Russ J Dev Biol.* 2018;49(1): 23-35. <https://doi.org/10.7868/S0475145018010044>. (In Russ.)]

51. Пудова Т.М., Шадрин Е.Г. Биоиндикационная оценка состояния техногенно нарушенных земель на территории Западной Якутии. *Успехи современного естествознания.* 2012;(11).

[Pudova T.M., Shadrina E.G. Bioindicative assessment of anthropogenic disturbed soils in Western Yakutia. *Advances in current natural sciences.* 2012;(11). (In Russ.)]

52. Саввинов Г.Н., Данилова А.А., Данилов П.П., Петров А.А., Боесков В.С., Алексеев Г.А. Комплексная диагностика почвогрунтов рекультивированных отвалов Западной Якутии по состоянию почвенных беспозвоночных и микробиоты. *Проблемы региональной экологии.* 2009;(3).

[Savvinov G.N., Danilova A.A., Danilov P.P., Petrov A.A., Boeskorov V.S., Alekseev G.A. Complex diagnostic of soil-grounds of recultivated refused heaps in West Yakutia based on condition of soil inhabiting invertebrates and microbiota. *Regional Environmental Issues.* 2009;(3). (In Russ.)]

53. Данилова А.А., Петров А.А. Вопросы интерпретации результатов биотеста с применением бактерий рода *Azotobacter*. *Почвы и окружающая среда.* 2021;4(3). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i3.154>.

[Danilova A.A., Petrov A.A. Soil biotest results using azotobacter bacteria: interpretation problems and possible solutions. *The Journal of Soils and Environment.* 2021;4(3). <https://doi.org/10.31251/pos.v4i3.154> (In Russ.)]

54. Петров А.А. О начальной стадии почвообразования в посттехногенных ландшафтах Западной Якутии. *Успехи современного естествознания.* 2012; 11(1):68–70.

[Petrov A.A. About the initial stage of pedogenesis on technogenic landscapes of the Western Yakutia. *Advances in current Natural Sciences.* 2012;11(1):68–70. (In Russ.)]

55. Петров А.А. Особенности почвенно-восстановительных процессов в посттехногенных ландшафтах Западной Якутии. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск: 2013; 22 с.

[Petrov A.A. Features of soil-restoration processes in post-technological landscapes Western Yakutia.. *Autoref. dis. ... kand. biol. nauk.* Yakutsk: 2013. (In Russ.)]

56. Данилов П.П., Саввинов Г.Н., Дмитриев А.И. О проблемах рекультивации в посттехногенных ландшафтах алмазодобывающего комплекса Западной Якутии. *Проблемы региональной экологии.* 2021;2(5): 70–75. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-5-100-103>

[Danilov P.P., Savvinov G.N., Dmitriev A.I. On the problems of recultivation in post-technogenic landscapes diamond mining complex in Western Yakutia. *Regional Environmental Issues.* 2021;2(5):70–75. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-5-100-103>. (In Russ.)]

57. Петров А.А. Эмбриоземы техногенных ландшафтов алмазодобывающей промышленности в бассейне р. Анабар. *Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых (с международным участием) Биоразнообразие: глобальные и региональные процессы Улан-Удэ (Россия), 23–27 июня 2016 г.* Улан-Удэ: 2016.

[Petrov A.A. Embryos of technogenic landscapes of the diamond mining industry in the basin of the Anabar River. *Materials of the 4th All-Russian Conference of Young Scientists (with international participation) Biodiversity: Global and Regional Processes. Ulan-Ude (Russia), June 23-27, 2016.* Ulan-Ude: 2016. (In Russ.)]

58. Петров А.А. Восстановление почвенного покрова посттехногенных ландшафтов, сформированных при разработке месторождений золота Северо-Востока Якутии. *Проблемы региональной экологии.* 2018;(5): 120–122. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15120>.

[Petrov A.A. Restoration of the soil cover of post-technogenic landscapes formed during the development of gold deposits in the North-East of Yakutia. *Regional Environmental Issues.* 2018;(5):120–122. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-15120>. (In Russ.)]

59. Петров А.А. Почво-восстановительные процессы в посттехногенных ландшафтах Чульманской впадины (Южная Якутия). *Проблемы региональной экологии.* 2020;(5):49–52. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-49-52>.

[Petrov A.A. Soils restoration processes in post-technogenic landscapes of the Chulman depression (South Yakutia). *Regional Environmental Issues.* 2020;(5):49–52. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-49-52>. (In Russ.)]

60. Zverev A., Petrov A., Kimeklis A., Kichko A., Andronov E., Abakumov E. Microbiomes of the initial soils of mining areas of Yakutsk City (Eastern Siberia, Russia). *Czech Polar Reports.* 2020;10(1). <https://doi.org/10.5817/CPR2020-1-7>.

61. Саввинов Г.Н., Данилов П.П., Петров А.А., Макаров В.С., Боесков В.С., Григорьев С.Е. Экологические проблемы Верхоянского района. *Вестник СВФУ.* 2018;68(6). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.68.21798>

[Savvinov G.N., Danilov P.P., Petrov A.A., Makarov V.S., Boeskorov V.S., Grigor'ev S.E. Environmental problems of the Verkhoyansky region. *Vestnik SVFU.* 2018;68(6). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2018.68.21798>. (In Russ.)]

62. Gerwin W., Schaaf W., Biemelt D., Fischer A., Winter S., Hüttl R.F. The artificial catchment «Chicken Creek» (Lusatia, Germany) – A landscape laboratory for interdisciplinary studies of initial ecosystem development. *Ecological Engineering.* 2009; Vol: 35. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.00>

Об авторах

¹ДАНИЛОВА Альбина Афанасьевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>, e-mail: danilova7alb@yandex.ru

²ПЕТРОВ Алексей Анатольевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8536-4078>, Author ID: 57072487900, Researcher ID: A-9853-2014, e-mail: Petrov_Alexey@mail.ru

Аффилиация

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 356, Российская Федерация

²Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера им. профессора Д.Д. Саввинова СВФУ, 677000, Якутск, пр. Ленина, д. 43, Российская Федерация

About the authors

¹DANILOVA, Albina Afanas'evna, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2212-3074>, e-mail: Danilova7alb@yandex.ru

²PETROV, Alexey Anatol'evich, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8536-4078>, e-mail: Petrov_Alexey@mail.ru

Affiliation

¹Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk Region, 633501 Krasnoobsk, Russian Federation

²Research Institute of Applied Ecology of the North-Eastern Federal University, 43 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 11.07.2022

Поступила после рецензирования / Revised 28.08.2022

Принята к публикации / Accepted 15.09.2022

Особенности распределения дендро- и тамнобионтной симфитофауны (Hymenoptera, Symphyta) в среднетаежной подзоне Якутии

А. А. Попов✉

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация
✉ ananpo@mail.ru

Аннотация

Изучено распределение дендро- и тамнобионтной симфитофауны по геоботаническим округам среднетаежной подзоны Якутии, проведены кластерный анализ сходства симфитофаун геоботанических округов, анализ биотопического распределения дендро- и тамнобионтной симфитофауны по основным типам лесных формаций. Пилильщики в Якутии играют важную роль в биоценозах и по плотности популяции и численности видов занимают ведущие места среди насекомых-фитофагов. Многие из них наносят вред деревьям и кустарникам, наиболее опасны из них звездчатый пилильщик-ткач (*Acantholyda posticalis* (Matsumura, 1912)) и сосновый пилильщик (*Diprion pini* (Linnaeus, 1758)). В работе использовались материалы, собранные автором в 2001–2019 гг. в Центральной, Западной и Южной Якутии, также были привлечены материалы коллекции пилильщиков Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. В лесах среднетаежной подзоны Якутии выявлено 176 видов дендро- и тамнобионтных пилильщиков из 34 родов и 6 семейств. Результаты анализа симфитофауны по геоботаническим округам показали, что наиболее богатым в видовом отношении оказался Лено-Амгинский геоботанический округ, самым бедным – Вилюйский. По результатам кластерного анализа сходства наибольшее сходство показали симфитофауны Лено-Амгинского и Среднеленского округов. Наибольшее видовое разнообразие тамно- и дендробионтной симфитофауны по итогам биотопического распределения отмечено в лиственничниках, наименьшее – в сосняках.

Ключевые слова: среднетаежная подзона, Якутия, пилильщики, тамно- и дендробионтная симфитофауна, геоботанические округа, лиственничники, сосняки, ельники, березняки, ивняки

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (код научной темы: FWRS-2021-0044; номер госрегистрации в ЕГИСУ: 121020500194-9; руководитель: к.б.н. Охлопков И.М.).

Для цитирования: Попов А.А. Особенности распределения дендро- и тамнобионтной симфитофауны (Hymenoptera, Symphyta) в среднетаежной подзоне Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):561–571. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-561-571>

Distribution patterns of dendro- and tamnobiont Symphyta fauna (Hymenoptera, Symphyta) in the middle taiga subzone of Yakutia

A. A. Popov✉

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
✉ ananpo@mail.ru

Abstract

We studied the distribution of dendro- and tamnobiont sawflies within geobotanical districts in the middle taiga subzone of Yakutia. The sawflies fauna similarity of geobotanical districts was investigated using cluster analysis, the biotopic distribution of dendro- and tamnobiont sawflies was analysed according to the main types of forest formations. Due to the large number of species and high population density, sawflies play an important role in Yakutian biocenoses and take the leading position among phytophage insects. Many of them are secondary pests of trees and shrubs including such dangerous species as *Acantholyda posticalis* (Matsumura, 1912) and *Diprion pini* (Linnaeus, 1758). The study was based on materials collected by the author during 2001–2019 in Central, Western and Southern Yakutia, as well as on entomological collection of sawflies of the Institute for Biological Problems of Cryolithozone

SB RAS. The forests of the middle taiga subzone of Yakutia were stated to be a habitat for 176 species of dendro- and tamnobiont sawflies from 34 genera and 6 families. The results of Symphyta fauna analysis by geobotanical districts showed that the Lena-Amga District had the richest Symphyta species diversity, while the least number of species was identified in the Vilyuy District. The cluster analysis revealed the most similar sawflies faunas from the Lena-Amga and Middle-Lena Districts. According to the results of biotopic distribution analysis, the largest species diversity of the tamno- and dendrobiont sawflies was recorded in larch forests, while the smallest in pine forests.

Keywords: the middle taiga subzone, sawflies, tamno- and dendrobiont Symphyta fauna, geobotanical districts, larch forests, pine forests, fir forests, birch forests, willow forests

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the project “Populations and communities of animal aquatic and terrestrial ecosystems of cryolithozone of the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and stability under natural and anthropogenic impacts” (scientific topic code: FWRS-2021-0044; state registration number in EGISU: 121020500194-9; supervisor: Cand. Sci. (Biology) Okhlopov I.M.).

For citation: Popov A.A. Distribution patterns of dendro- and tamnobiont Symphyta fauna (Hymenoptera, Symphyta) in the middle taiga subzone of Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):561–571. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-561-571>

Введение

Пилильщики (Hymenoptera, Symphyta) – большая группа растительноядных перепончатокрылых из подотряда сидячебрюхих, в мировой фауне насчитывает 8250 видов из 650 родов и 15 семейств [1–3]. В Якутии пилильщики занимают одно из ведущих мест среди насекомых-фитофагов по числу видов и плотности их популяций. Многие тамно- и дендробионтные виды являются второстепенными вредителями, но среди них есть и опасные, к ним относятся звездчатый пилильщик-ткач (*Acantholyda posticalis* (Matsumura, 1912)) и сосновый пилильщик (*Diprion pini* (Linnaeus, 1758)). Вспышки массовых размножений этих видов часто регистрировались в Сибири и приводили к засыханию лесов на больших площадях [4–6]. Некоторые виды повреждают лиственные деревья и кустарники, в том числе культурные ягодные [7–11].

Первые сведения о четырех видах дендробионтных пилильщиков среднетаежной подзоны Якутии приводились в работе В.В. Гуссаковского [12]: (*Acantholyda posticalis* Mats., *A. laricis* (Giraud, 1861), *Cephalcia abietis* (Linnaeus, 1758), *Microdiprion pallipes* (Fallén, 1808), *Arge ochropus* (Gmelin, 1790)). В Центральной Якутии Е.С. Петренко [13] отметил три вида пилильщиков, обитающих на сосне и лиственнице, – *Anoplonyx lariciphagus* (Zaddach, 1883), *Diprion* sp., *Pristiphora erichsonii* (Hartig, 1837). Наиболее весомые исследования дендро- и тамнобионтной симфитофауны провели якутские ученые Ю.Н. Аммосов и Е.Л. Каймук. В их работах по потребителям хвои лиственницы даурской в Центральной и Южной Якутии [8, 9] приводятся девять видов пилильщиков (*Acantholyda laricis* Gir., *Anoplonyx*

apicalis (Brischke, 1883), *A. lariciphagus* Zadd., *Cephalcia alpina* (Klug, 1808), *Diprion koreanus* Takagi, 1931, *Euura imperfecta* (Zaddach, 1876), *Pristiphora erichsonii* Htg., *P. laricis* (Hartig, 1837), *P. wesmaeli* (Tischbein, 1853)). По работам Е.Л. Каймука в Южной [14–16] и Центральной Якутии [10, 17] приводится 79 видов дендро- и тамнобионтных пилильщиков. Последующие работы якутских ученых [18–23] увеличили число последних до 140 видов.

Материалы и методы

В основу данной статьи легли материалы, собранные автором в 2001–2019 гг. в Центральной, Западной и Южной Якутии, также были использованы материалы из коллекции перепончатокрылых насекомых Института биологических проблем криолитозоны СО РАН, в которой хранится материал из 50 географических пунктов Якутии.

Для установления сходства фаун использовалась программа PAST – Paleontological Statistics, ver. 1.57 [24]. В качестве меры сходства использовался коэффициент Чекановского–Сёренсена [25]. Статистическая достоверность образования кластеров оценена с помощью бутстреп-анализа в 1000 повторностях.

Результаты и обсуждение

По нашим данным, в лесных формациях среднетаежной подзоны Якутии выявлено 176 видов дендро- и тамнобионтных пилильщиков из 34 родов и 6 семейств (Pamphiliidae – 20, Argidae – 11, Cimbicidae – 18, Diprionidae – 10, Tenthredinidae – 116, Cephidae – 1).

В геоморфологическом отношении среднетаежная подзона занимает Приленское плато –

юго-восточную часть Среднесибирского плоскогорья, Центральнаякутскую равнину и Алданское нагорье [26].

Северная граница района исследований идет по левобережью бассейна р. Виллой на широте 64–65° с.ш., далее по южным предгорьям Центрального Верхоянья, восточная граница проходит с севера на юг по 136–137° в.д., на юге и на западе граница совпадает с административной [27] (рис. 1).

По геоботаническому районированию территория входит в среднетаежную подзону таежной зоны бореальной области и делится на две провинции: Центральную и Южнаякутскую. В свою очередь Центральнаякутская провинция включает в себя четыре округа: Западно-Виллойский среднетаежный, Средневиллойский среднетаежный, Среднеленский среднетаежный, Лено-Амгинский среднетаежный [28].

В работе мы объединили Западно-Виллойский и Средневиллойский округа в один Виллойский, так как первый очень слабо изучен в плане симфитофауны. В лесном покрове преобладают брусничные и багульниковые лиственничные леса, развиты сосновые леса. Участие ели сибирской в лесном покрове незначительно, она образует самостоятельные насаждения по речным долинам и опушкам аласов.

Всего в Виллойском округе отмечено 24 вида пилильщиков из 5 семейств: *Acantholyda laricis* Gir., *A. posticalis pinivora* Enslin, *Arge enodis* L., *A. ciliaris* L., *Cimbex femoratus* L., *C. luteus* L., *Trichiosoma hirtellum* Guss., *T. latreillii* Leach, *T. sericeum* Knw, *T. vitellina* L., *T. crassum* Kby, *T. lucorum* L., *T. opacum* Knw, *Pseudoclavellaria amerinae* L., *Diprion koreanus* Tak., *Gilpinia polytoma* Htg, *G. abieticola* D.-T., *G. virens* Kl., *G. fenica* Forsius, *Anoplonyx apicalis* Brischke, *Euura pedunculi* Htg, *E. weiffenbachiella* Liston et Vikberg., *Pristiphora borea* Knw, *P. carinata* Htg. Наиболее богатым в видовом отношении здесь оказалось семейство Cimbicidae, в котором выявлено 10 видов, тогда как семейства Pamphiliidae и Argidae представлены лишь двумя видами в каждом (табл. 1).

Лено-Амгинский среднетаежный округ в природном отношении близок к Средневиллойскому, но характеризуется более засушливым климатом. Леса здесь преимущественно среднетаежного типа из лиственницы, с участием сосны, березы. В округе преобладают разнотравно-брусничные лиственничники. Особенностью раститель-

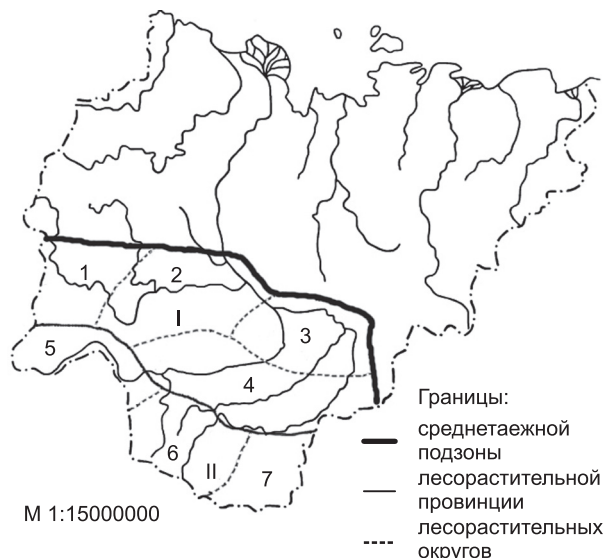


Рис. 1. Схема лесорастительного районирования среднетаежной Якутии (по [27]):

I – Центральнаякутская среднетаежная лесорастительная провинция сосново-лиственничной тайги: 1 – Западно-Виллойский округ, 2 – Средневиллойский округ, 3 – Лено-Амгинский округ, 4 – Среднеленский округ; II – Южнаякутская среднетаежная лесорастительная провинция сосново-лиственничной с участием темнохвойных лесов тайги: 5 – Лено-Витимский предгорный округ, 6 – Алданский горный округ, 7 – Учурский горный округ.

Fig. 1. Forest vegetation zoning scheme of the middle taiga subzone of Yakutia (by [27]):

I – Central Yakutian middle taiga province of pine-larch taiga: 1 – the Western Vilyuy District; 2 – the Middle Vilyuy District; 3 – the Lena-Amga District; 4 – the Middle Lena District; II – South Yakutian middle taiga province of pine-larch taiga with participation of dark coniferous forest: 5 – the Lena-Vitim Piedmont District; 6 – the Aldan Mountain District; 7 – the Uchur Mountain District.

ного покрова округа являются степные и луго-степные ценозы, прерываемые небольшими по площади березовыми колками – чаранами. В этом округе выявлено наибольшее количество видов пилильщиков – 148 видов из 6 семейств, в том числе *Acantholyda* – 2, *Cephalcia* – 4, *Pamphilius* – 5, *Neurotoma* – 1, *Spinarge* – 1, *Arge* – 9, *Cimbex* – 3, *Trichiosoma* – 8, *Praia* – 1, *Pseudoclavellaria* – 1, *Gilpinia* – 3, *Diprion* – 2, *Microdiprion* – 1, *Cladius* – 4, *Anoplonyx* – 4, *Dineura* – 2, *Nematus* – 5, *Nematinus* – 1, *Hemichroa* – 3, *Euura* – 30, *Pristiphora* – 26, *Caliroa* – 1, *Fenusa* – 1, *Birka* – 1, *Empria* – 4, *Taxonus* – 2, *Allantus* – 7, *Pachyprotasis* – 1, *Macrophya* – 1, *Rhogogaster* – 2, *Tenthredo* – 11, *Phylloecus* – 1 вид. Ядром симфитофауны здесь выступает семейство Tenthredinidae, представленное 107 видами из 33 родов.

Таблица 1

Число видов пилильщиков по геоботаническим округам среднетаежной подзоны Якутии

Table 1

Number of sawfly species over geobotanical districts of middle taiga subzone of Yakutia

№	Роды пилильщиков	ЦЯ провинция			ЮЯ провинция		Всего видов
		Вилуйский	Лено-Амгинский	Среднеленский	Лено-Витимский	Алдано-Учурский	
1	<i>Acantholyda</i>	2	2	2	2	—	2
2	<i>Cephalcia</i>	—	4	3	3	1	5
3	<i>Pamphilus</i>	—	5	8	3	—	10
4	<i>Neurotoma</i>	—	1	2	—	—	2
5	<i>Onycholyda</i>	—	—	1	—	—	1
6	<i>Spinarge</i>	—	1	2	—	—	2
7	<i>Arge</i>	2	9	9	2	3	9
8	<i>Cimbex</i>	2	3	3	1	1	3
9	<i>Trichiosoma</i>	7	8	10	—	1	11
10	<i>Praia</i>	—	1	1	—	—	1
11	<i>Pseudoclavellaria</i>	1	1	1	—	1	1
12	<i>Gilpinia</i>	4	3	1	—	3	6
13	<i>Diprion</i>	1	2	1	—	1	3
14	<i>Microdiprion</i>	—	1	—	—	—	1
15	<i>Cladius</i>	—	4	4	1	1	5
16	<i>Anoplonyx</i>	1	4	2	—	—	5
17	<i>Dineura</i>	—	2	2	1	1	2
18	<i>Nematus</i>	—	5	2	—	—	6
19	<i>Nematinus</i>	—	1	1	—	—	1
20	<i>Hemichroa</i>	—	3	1	—	—	3
21	<i>Euura</i>	2	30	21	7	3	33
22	<i>Pristiphora</i>	2	26	21	9	4	29
23	<i>Stauronematus</i>	—	—	1	—	—	1
24	<i>Birka</i>	—	1	1	1	—	1
25	<i>Caliroa</i>	—	1	1	—	—	1
26	<i>Fenusa</i>	—	1	1	—	—	1
27	<i>Empria</i>	—	4	4	1	2	4
28	<i>Allantus</i>	—	7	5	3	1	7
29	<i>Taxonus</i>	—	2	2	—	—	2
30	<i>Pachyprotasis</i>	—	1	1	1	1	1
31	<i>Macrophya</i>	—	1	1	—	—	1
32	<i>Rhogogaster</i>	—	2	1	1	1	2
33	<i>Tenthredo</i>	—	11	13	10	8	13
34	<i>Phyllocus</i>	—	1	—	—	—	1
	Всего	24	148	129	46	33	176

Среднеленский среднетаежный округ находится в северной части Приленского плато. Преобладают средневлажные лиственничники —

брусничные, голубично-брусничные, ольховниково-брусничные. Сосняки представлены более широко, чем в предыдущих округах. Ель произ-

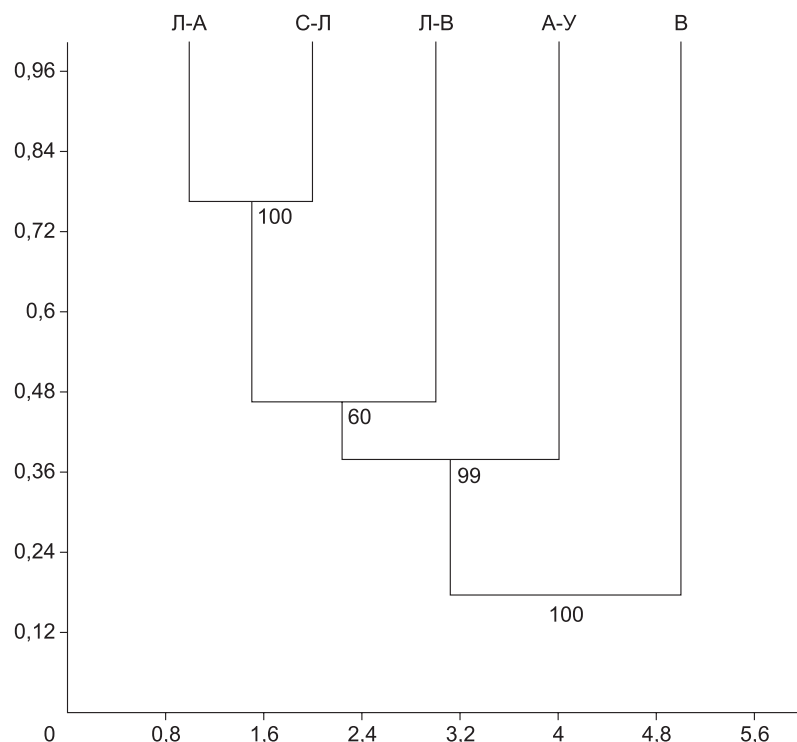


Рис. 2. Дендрограмма сходства симфитофаун геоботанических округов среднетаежной подзоны Якутии (UPGMA, Icz): В – Вилуйский, Л-А – Лено-Амгинский, С-Л – Средлененский, Л-В – Лено-Витимский, А-У – Алданско-Учурский. В основании кластеров указаны бутстреп-значения (%).

Fig. 2. Symphyta fauna similarity dendrogram by geobotanical districts of the middle taiga subzone of Yakutia (UPGMA, Icz): В – the Vilyuy District, Л-А – the Lena-Amga District, С-Л – the Middle Lena District, Л-В – the Lena-Vitim District, А-У – the Aldan-Uchur District. Bootstrap values are indicated at the base of the clusters (%).

растает в основном по долинам рек. Здесь отмечено 129 видов сидячебрюхих из 5 семейств: *Acantholyda* – 2, *Cephalcia* – 3, *Pamphilius* – 8, *Neurotoma* – 2, *Onycholyda* – 1, *Spinarge* – 2, *Arge* – 9, *Cimbex* – 3, *Trichiosoma* – 10, *Praia* – 1, *Pseudoclavellaria* – 1, *Gilpinia* – 1, *Diprion* – 1, *Cladius* – 4, *Anoplonyx* – 2, *Dineura* – 2, *Nematus* – 2, *Nematinus* – 1, *Hemichroa* – 1, *Euura* – 21, *Pristiphora* – 21, *Stauronematus* – 1, *Birka* – 1, *Caliroa* – 1, *Fenusa* – 1, *Empria* – 4, *Taxonus* – 2, *Allantus* – 5, *Pachyprotasis* – 1, *Macrophya* – 1, *Rhogogaster* – 1, *Tenthredo* – 13 видов. Наиболее представительным в этом округе оказалось семейство Tenthredinidae с 85 видами.

Южнокутская провинция включает в себя три округа: Лено-Витимский предгорный среднетаежный, Алданский горный среднетаежный и Учурский горный среднетаежный.

Лено-Витимский предгорный среднетаежный округ близок по лесному покрову к лесам Киренского района Иркутской области. Здесь преобладают лиственничники с елью и кедром и лиственничники с кедром бруснично-зеленомош-

ные. Сосняки преимущественно брусничные, ольховниково-брусничные и рододендроново-брусничные. В Лено-Витимском округе выявлено 46 видов из 4 семейств: *Acantholyda* – 2, *Cephalcia* – 3, *Pamphilius* – 3, *Arge* – 2, *Cimbex* – 1, *Cladius* – 1, *Dineura* – 1, *Euura* – 7, *Pristiphora* – 9, *Birka* – 1, *Empria* – 1, *Allantus* – 3, *Pachyprotasis* – 1, *Rhogogaster* – 1, *Tenthredo* – 10 видов. Из них большая часть относится к семейству Tenthredinidae – 35 видов.

Также в работе мы объединили Алданский и Учурский горный среднетаежный округа в один Алдано-Учурский, поскольку характер произрастающих лесов здесь весьма близок и в Учурском округе исследование симфитофауны практически не проводилось.

Характер произрастающих лесов здесь неоднороден, у верхней границы леса лиственница образует редкостойные малопродуктивные древостои, а в лесной зоне преобладает в предгорьях и низкогорьях, встречаются сосна, кедр и ель сибирская. В Алдано-Учурском округе отмечено 33 вида из 5 семейств: *Cephalcia* – 1,

Arge – 3, *Cimbex* – 1, *Trichiosoma* – 1, *Pseudoclavellaria* – 1, *Gilpinia* – 3, *Diprion* – 1, *Cladius* – 1, *Dineura* – 1, *Euura* – 3, *Pristiphora* – 4, *Empria* – 2, *Allantus* – 1, *Pachyprotasis* – 1, *Rhogogaster* – 1, *Tenthredo* – 8 видов. Ядром симфитофауны здесь является семейство Tenthredinidae, которых выявлено 22 вида.

Для установления сходства симфитофаун геоботанических округов мы использовали программу PAST (Paleontological Statistics, ver. 1.57) с функциями для обработки данных, построения графиков, экологического анализа, морфометрии и стратиграфии. В качестве меры сходства фаун округов применялся коэффициент Чекановского–Сёрнсена, а статистическая достоверность образования кластеров оценена с помощью бутстреп-анализа в 1000 повторностях.

На полученной дендрограмме сходства симфитофаун округов первым отделяется кластер, обозначающий Вилуйский округ (коэффициент сходства 0,14) (рис. 2). Крайне низкий уровень сходства этого округа обусловлен малым числом видов (24 вида) и присутствием видов *Gilpinia abieticola* D.-T., *G. virens* Kl., *Euura weiffenbachii* Liston et Vikberg, выявленных только в Вилуйском округе.

Далее обособляется кластер Алдано-Учурский (коэффициент сходства 0,35). Низкий уровень сходства здесь обусловлен малым числом видов по сравнению с другими округами (всего 33) и наличием видов *Diprion similis* Htg., *Gilpinia frute-torum* F., *Cephalcia pallidula* Guss. не выявленных в других округах.

Фауна Лено-Витимского округа показывает наибольшее сходство со Среднеленским (коэффициент сходства 0,48). По количеству общих видов лидирует род *Tenthredo*, выявлено 10 общих видов, из рода *Pristiphora* – 7 общих видов, *Euura* – 6 видов, *Cephalcia* и *Pamphilus* – по 3 вида, *Arge*, *Acantholyda* и *Allantus* – по 2, *Cimbex*, *Empria*, *Pachyprotasis*, *Birka*, *Cladius*, *Dineura*, *Rhogogaster* – по 1.

Наибольшее сходство симфитофаун наблюдается между Среднеленским и Лено-Амгинским округами (коэффициент сходства 0,76). Здесь наибольшее количество общих видов выявлено у родов *Euura* (по 19 видов) и *Pristiphora* (по 18 видов), род *Tenthredo* имеет по 11 общих видов, *Arge* – 9, *Trichiosoma* – 7, *Allantus* – 5, *Empria* – 4, роды *Cephalcia*, *Pamphilus*, *Cimbex* и *Cladius* – по 3 вида, роды *Acantholyda*, *Taxonus* и *Dineura* – по 2 вида, остальные 16 родов – по 1 виду. Наи-

большее сходство фаун этих округов можно объяснить сходными типами лесных формаций, в которых питаются и развиваются пилильщики, так, в обоих округах преобладают различные вариации разнотравно-брусничных лиственничников, таких как лишайниково-толокнянковые, толокнянковые, бруснично-толокнянковые, брусничные, ольховниково- и голубично-брусничные.

Биотопическое распределение по типам лесов

В лесном покрове рассматриваемой территории преобладают лиственничные леса из лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuze-neva, 1920) (западнее 120–122° в.д.), лиственницы Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) (восточнее 120–122° в.д.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb., 1833) (крайний юго-запад Якутии). Экологический ареал лиственницы очень широк и занимает разнообразные экотопы на многих формах рельефа [29]. Лиственничные леса с разнотравно-кустарничковым покровом занимают 77,6 % лесопокрываемой площади среднетаежной подзоны Якутии. Древесный ярус складывается в основном из лиственницы, с отдельными деревьями высотой до 25 м. Широко распространены сухие травяно-брусничные и сырые багульниковые лиственничники, в древостое которых наблюдается редкая примесь березы (*Betula pendula* Roth, 1788), иногда сосны (*Pinus sylvestris* Linnaeus, 1753). В лесостепных районах и в районах распространения аласов лиственничные леса на границе со степными участками и лугами принимают характер травянистых парковых лесов. Здесь обитают 18 видов пилильщиков, развивающихся на лиственнице, причем виды *Anoplonyx apicalis* Brischke, *Euura imperfecta* Zadd., *Pristiphora wesmaeli* Tischb., *P. laricis* Htg., *P. erichsonii* Htg., *Cephalcia lariciphila* (Wachtl, 1898) и *Diprion koreanus* Takagi являются потенциальными вредителями лиственницы, о чем свидетельствует ущерб, наносимый ими в Прибайкалье и Западной Сибири [30–34].

Подлесок из ольхи (*Alnus*), ивы (*Salix*), шиповника (*Rosa*), спиреи (*Spiraea*) населяют 112 видов пилильщиков, в том числе из родов *Pamphilus* (7 видов), *Arge* (9 видов), *Cimbex* (3 вида), *Trichiosoma* (12), *Pseudoclavellaria* (1), *Allantus* (7), *Dinax* (1), *Empria* (2), *Pachyprotasis* (1), *Fenusa* (1), *Caliroa* (1), *Nematus* (4), *Euura* (43), *Cladius* (4), *Hemichroa* (3), *Nematus* (1), *Pristiphora* (15), *Stauronematus* (1), *Macrophya* (1), *Rhogogaster* (2),

Siobla (1), *Tenthredo* (11), *Phylloecus* (1) (табл. 2). В кустарничковом ярусе, представленном голубикой и брусникой, обитают пилильщики рода *Euura*: *E. schlueteri* (Enslin, 1915), *E. reticulata* (Holmgren, 1883), и рода *Pristiphora*: *P. carinata* (Hartig, 1837), *P. cincta* Newman, 1837, *P. coactula* (Ruthe, 1859), *P. mollis* (Hartig, 1837). Больше всего пилильщики предпочитают опушки леса, редины, вырубки, реже встречаются под пологом леса, где более влажно и затенено. Симфитофауна лиственничников формируется в основном за счет представителей семейства Tenthredinidae (105 видов), среди них наиболее хорошо представлен род *Euura* (43 вида), виды которого развиваются преимущественно на ивах. Пилильщики семейства Cimbicidae насчитывают 17 видов, Argidae – 11 видов, Pamphiliidae – 11 видов, Diprionidae – 2 вида, семейство Cephidae представлено одним видом (см. табл. 2).

Площадь сосновых лесов составляет 10,6 % лесопокрытой площади региона, экологический ареал сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) крайне узок. Сосновые леса занимают хорошо прогреваемые и сухие участки южных склонов и возвышенностей среди лиственничной тайги Лено-Вилуйского и Лено-Алданского междуречий (Центральная Якутская провинция), надпойменные террасы среди лугово-степной растительности в долинах рек Лена, Алдан (Южно-Якутская провинция). Чистые сосняки отличаются ксерофитностью, и фауна пилильщиков в них сильно обеднена, обнаружено 45 видов. Здесь встречаются специфические потребители хвой сосны – пилильщики семейства Diprionidae: *Diprion pini* L., *D. similis* Htg., *Gilpinia frutetorum* F., *G. virens* Kl., *G. pallida* Kl., *G. laricis* Jur., *Microdiprion pallipes* Fall. Кустарниковый подлесок в сосновых лесах редок и состоит из шиповника (*Rosa*) и ольховника (*Duschekia*), с ними трофически связаны 37 видов: *Pamphilius* (7 видов), *Arge* (5 видов), *Cimbex* (2 вида), *Trichiosoma* (1), *Allantus* (4), *Fenusa* (1), *Nematus* (1), *Cladius* (1), *Hemichroa* (3), *Nematinus* (1), *Pristiphora* (1), *Macrophya* (1), *Rhogogaster* (2), *Siobla* (1), *Tenthredo* (5), *Phylloecus* (1).

Ельники из ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb., 1833) занимают еще меньшую площадь, чем сосновые леса, образуют мшистые ельники с кустарниками и травянистым покровом. Здесь обитают 22 вида пилильщиков, питающихся хвоей ели: *Cephalcia* (4 вида), *Gilpinia* (4 вида), *Euura* (3 вида), *Pristiphora* (11 видов). В подлес-

ке ельников растут ольха (*Alnus*) и рябина (*Sorbus*), с которыми трофически связаны 28 видов: *Pamphilius* (7 видов), *Neurotoma* (1), *Arge* (1), *Cimbex* (2), *Trichiosoma* (3), *Fenusa* (1), *Nematus* (1), *Dineura* (1), *Hemichroa* (3), *Nematinus* (1), *Pristiphora* (1), *Rhogogaster* (2), *Tenthredo* (4).

В симфитофауне ельников также доминируют пилильщики семейства Tenthredinidae (28 видов), где превалирует род *Pristiphora* (12 видов). Остальные семейства представлены незначительно, семейство Pamphiliidae насчитывает 12 видов, Cimbicidae – 5 видов, Argidae – 1, Diprionidae – всего 4.

Березовые леса, образованные березой повислой, также известной как плосколистная (*Betula pendula* Roth), играют незначительную роль в формировании лесного покрова среднетаежной подзоны. Среди коренных березняков для Центральной Якутии выделяют разнотравный и травяной остепненный березняки. Здесь выявлено 120 видов пилильщиков, из которых 42 вида развиваются на березе: *Pamphilius* (3 вида), *Spinarge* (2), *Arge* (3), *Cimbex* (1), *Trichiosoma* (6), *Praia* (1), *Allantus* (3), *Empria* (1), *Fenusa* (1), *Caliroa* (1), *Nematus* (3), *Euura* (2), *Cladius* (1), *Dineura* (1), *Hemichroa* (3), *Nematinus* (1), *Pristiphora* (4), *Rhogogaster* (1), *Tenthredo* (4). В подлеске обычны шиповник и ива Бебба, на которых развиваются 98 видов.

Ядро симфитофауны представляет семейство Tenthredinidae (86 видов), представители других семейств немногочисленны: Cimbicidae (17 видов), Argidae (10), Pamphiliidae (3), Cephidae (1).

Ивовые леса из ив росистой (*Salix rorida* Lackschewitz, 1911), прутьевидной (*S. viminalis* Linnaeus, 1753), Бебба (*S. bebbiana* Sargent, 1895) и шерстистопобеговой (*S. dasyclados* Wimmer, 1849) фрагментарно встречаются в пойме р. Лена, на островах. Они могут образовывать чистые древостои, иногда смешанные с чозенией (*Chosenia arbutifolia* (Pall.) A.K. Skvortsov, 1957) и ивой сердцелистной (*S. cardiophylla* Trautv. & C.A. Mey, 1856). Наиболее распространен ивняк разнотравный, где в подлеске растут шиповник (*Rosa*) и смородина (*Ribes*), на которых питаются 26 видов: *Pamphilius* (3), *Arge* (4), *Allantus* (4), *Euura* (3), *Cladius* (1), *Pristiphora* (4), *Macrophya* (1), *Siobla* (1), *Tenthredo* (4), *Phylloecus* (1).

С ивами трофически связаны 82 вида пилильщиков: *Arge* (3 вида), *Cimbex* (3 вида), *Trichiosoma* (11 видов), *Pseudoclavellaria* (1 вид), *Allantus* (2 вида), *Empria* (1 вид), *Pachyprotasis* (1 вид), *Caliroa* (1 вид), *Nematus* (2 вида), *Euura* (36 ви-

Таблица 2

Биотопическое распределение симфитофауны по типам лесов

Table 2

Biotopic distribution of Symphyta fauna by forest types

№	Роды пилильщиков	Хвойные леса			Лиственные леса	
		Лиственничники	Сосняки	Ельники	Березняки	Ивняки
1	<i>Acantholyda</i>	1	1	—	—	—
2	<i>Cephalcia</i>	3	—	4	—	—
3	<i>Pamphilus</i>	7	7	7	6	3
4	<i>Neurotoma</i>	—	2	1	—	—
5	<i>Spinarge</i>	2	—	—	2	—
6	<i>Arge</i>	9	5	1	8	7
7	<i>Cimbex</i>	3	2	2	3	3
8	<i>Trichiosoma</i>	12	1	3	12	11
9	<i>Praia</i>	1	—	—	1	—
10	<i>Pseudoclavellaria</i>	1	—	—	1	1
11	<i>Gilpinia</i>	1	4	4	—	—
12	<i>Diprion</i>	1	2	—	—	—
13	<i>Microdiprion</i>	—	1	—	—	—
14	<i>Cladius</i>	4	1	—	4	4
15	<i>Anoplonyx</i>	5	—	—	—	—
16	<i>Dineura</i>	1	—	1	1	—
17	<i>Nematus</i>	1	1	1	1	—
18	<i>Hemichroa</i>	3	3	3	3	1
19	<i>Nematus</i>	4	1	1	4	2
20	<i>Euura</i>	43	—	3	38	39
21	<i>Stauronematus</i>	1	—	—	1	1
22	<i>Pristiphora</i>	15	1	12	9	9
23	<i>Caliroa</i>	1	—	—	1	1
24	<i>Fenusa</i>	1	1	1	1	—
25	<i>Empria</i>	2	—	—	2	1
26	<i>Allantus</i>	7	4	—	6	6
27	<i>Dinax</i>	1	—	—	—	—
28	<i>Taxonus</i>	—	—	—	—	—
29	<i>Siobla</i>	1	1	—	—	1
30	<i>Pachyprotasis</i>	1	—	—	1	1
31	<i>Macrophya</i>	1	1	—	1	1
32	<i>Rhogogaster</i>	2	2	2	2	2
33	<i>Tenthredo</i>	11	5	4	11	9
34	<i>Phylloecus</i>	1	1	—	1	1
	Всего	147	47	50	120	104

дов), *Cladius* (3 вида), *Hemichroa* (1 вид), *Pristiphora* (5 видов), *Stauronematus* (1 вид), *Rhogogaster* (2 вида), *Tenthredo* (9 видов).

В ивняках всего выявлено 104 вида, из них преобладают представители семейства Tenthredinidae (78 видов), остальные семейства пред-

ставлены намного беднее: Cimbicidae (15), Argidae (7), Pamphiliidae (3), Cephididae (1).

Выводы

Итак, проведен анализ биотопического распределения дендро- и тамнобионтной симфитофауны по основным типам лесных формаций среднетаежной подзоны Якутии, изучено распределение по геоботаническим округам, проведен кластерный анализ сходства симфитофаун геоботанических округов. В ходе исследования установлено, что наиболее богата симфитофауна Центральноякутской провинции, куда входят Вилюйский, Лено-Амгинский и Среднеленский геоботанический округа. Так, Лено-Амгинский округ включает 148 видов, Среднеленский – 129, в слабо изученном Вилюйском округе пока выявлено 24 вида. Симфитофауна Южноякутской провинции оказалась более бедной – в Лено-Витимском округе отмечено 46, а в Алдано-Учурском – 33 вида. Наибольшее видовое разнообразие симфитофауны Центральноякутской провинции можно объяснить лучшей изученностью центральных районов, тогда как изученность Южноякутской провинции гораздо ниже. По кластерному анализу наиболее сходны симфитофауны Среднеленского и Лено-Амгинского округов (коэффициент сходства 0,76), что обусловлено большим количеством общих видов у родов *Euvura* (по 19 видов) и *Pristiphora* (по 18 видов). Наименьшим сходством обладает фауна Вилюйского округа (коэффициент сходства 0,14), что обусловлено малым количеством видов и низкой изученностью симфитофауны этого округа.

По биотопическому распределению наиболее богата симфитофауна лиственничников, где выявлено большое число видов обитающих здесь пилильщиков (147), и гораздо беднее фауна пилильщиков в ельниках (50) и сосняках (47 видов). В лиственных лесах наиболее разнообразны видами березняки (120) и ивняки (104).

В заключение отметим, что исследование фауны дендро- и тамнобионтных пилильщиков достаточно актуально в свете нарастания глобального потепления и антропогенной нагрузки на северные леса и несомненно должно быть продолжено.

Список литературы / References

1. Annotated catalogue of the Hymenoptera of Russia. Volume I. Symphyta and Apocrita: Aculeata. *Pro-*

ceedings of the Zoological Institute RAS. Supplement 6, 2017. 475 p.

2. Сундуков Ю.Н., Лелей А.С. Подотряд Symphyta – Сидячебрюхие. *Аннотированный каталог насекомых Дальнего Востока России. Т. I. Перепончатокрылые*. Владивосток: Дальнаука, 2012. С. 62–120.

[Sundukov Yu.N., Leley A.S. Suborder Symphyta. *Annotated catalogue of the insects of the Russian Far East. Volume I. Hymenoptera*. Vladivostok: Dalnauka, 2012. S. 62–120. (In Russ.)]

3. Taege A., Blank S.M., Liston A.D. *World catalog of Symphyta (Hymenoptera)*. Zootaxa. Auckland, New Zealand: Magnolia Press, 2010. 1064 p.

4. Флоров Д.Н. *Вредители сибирского кедра*. Иркутск, 1951. 123 с.

[Florov D.N. *Pests of Siberian cedar*. Irkutsk, 1951. 123 s. (In Russ.)]

5. Галкин Г.И., Гребенщикова В.П. Обыкновенный сосновый пилильщик (*Diprion pini* L.) в лесных культурах Сибири и меры борьбы с ним. *Труды Сиб. технол. ин-та*. 1964;39:311–321.

[Galkin G.I., Grebenshchikova V.P. Pine sawfly (*Diprion pini* L.) in forest crops in Siberia and measures to control it. *Proceedings of the Siberian Technological Institute*. 1964;39:311–321. (In Russ.)]

6. Эпова В.И., Плешанов А.С. *Зоны вредоносности насекомых – филофагов Азиатской России*. Новосибирск: Наука; 1995. 68 с.

[Epova V.I., Pleshanov A.S. *Zony vredonosnosti nasekomyh – filofagov Aziatskoj Rossii*. Novosibirsk: Nauka; 1995. 68 p. (In Russ.)]

7. Аммосов Ю.Н. Насекомые – вредители хвой и листьев деревьев, кустарников и кустарничков Юго-Западной Якутии. *Вредные насекомые и гельминты Якутии*. Якутск; 1971:117–128.

[Ammosov Yu.N. Insect pests of needles and leaves of trees, shrubs and bushes in Southwest Yakutia. *Harmful insects and helminths in Yakutia*. Yakutsk; 1971. P. 117–128. (In Russ.)]

8. Аммосов Ю.Н., Каймук Е.Л. О насекомых – потребителях хвой лиственницы даурской в Центральной и Южной Якутии. *Фауна и экология насекомых Якутии*. Якутск; 1972. С. 62–70.

[Ammosov Yu.N., Kaymuk E.L. Insect Consumers of Dahurian Larch Needles in Central and Southern Yakutia. *Fauna and ecology of insects in Yakutia*. Yakutsk; 1972. P. 62–70. (In Russ.)]

9. Аммосов Ю.Н., Каймук Е.Л. Особенности повреждения насекомыми хвой лиственницы даурской в среднетаежной зоне Якутии. *Биологические проблемы Севера. VI симпозиум. Вып. 2*. Якутск; 1974. С. 143–147.

[Ammosov Yu.N., Kaymuk E.L. Peculiarities of insect damage to Daurian larch needles in the middle taiga zone of Yakutia. *Biological problems of the North. 6th Symposium. Issue 2*. Yakutsk; 1974. P. 143–147. (In Russ.)]

10. Каймук Е.Л. Хвоегрызущие пилильщики подсемейства Nematiniae Центральной Якутии. *Насеко-*

- мые лугово-таежных биоценозов Якутии. Якутск; 1988. С. 81–87.
- [Kaymuk E.L. Conifer-feeding sawflies of the subfamily Nematinae of Central Yakutia. *Insects of meadow-taiga biocenoses of Yakutia*. Yakutsk; 1988. P. 81–87. (In Russ.)]
11. Багачанова А.К., Евдокарлова Т.Г. Вредители культурных растений Якутии. Якутск; 2012. 64 с.
- [Bagachanova A.K., Evdokarova T.G. *Pests of cultivated plants of Yakutia*. Yakutsk; 2012. 64 p. (In Russ.)]
12. Гуссаковский В.В. Рогохвосты и пилильщики. Фауна СССР. Насекомые перепончатокрылые. Т. II. Вып. I. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1935. 284 с.
- [Gussakovskiy V.V. Wood wasps and sawflies. *Нуменоптера. Том 2, Issue 1*. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1935. 284 p. (In Russ.)]
13. Петренко Е.С. Насекомые – вредители лесов Якутии. М.: Наука; 1965. 167 с.
- [Petrenko E.S. *Insects – pests of forests Yakutia*. М.: Наука; 1965. 167 p. (In Russ.)]
14. Каймук Е.Л. Материалы по фауне пилильщиков (Hymenoptera, Tenthredinoidea) Южной Якутии. Фауна и экология насекомых Якутии. Якутск; 1972: 71–90.
- [Kaymuk E.L. Materials on the fauna of sawflies (Hymenoptera, Tenthredinoidea) of Southern Yakutia. *Fauna and ecology of insects in Yakutia*. Yakutsk; 1972: 71–90. (In Russ.)]
15. Каймук Е.Л. Заметки по ландшафтно-биотопическому распределению пилильщиков Южной Якутии. Фаунистические ресурсы Якутии. Якутск; 1974:120–124.
- [Kaymuk E.L. Notes on the landscape-biotopic distribution of sawflies in southern Yakutia. *Faunal resources of Yakutia*. Yakutsk; 1974:120–124. (In Russ.)]
16. Каймук Е.Л. Хвоегрызущие пилильщики (Hymenoptera, Symphyta) Южной Якутии. Насекомые средней тайги Якутии. Якутск; 1975:24–31.
- [Kaymuk E.L. Conifer-feeding sawflies (Hymenoptera, Symphyta) of Southern Yakutia. *Insects of the middle taiga in Yakutia*. Yakutsk; 1975:24–31. (In Russ.)]
17. Каймук Е.Л. Новый вид пилильщиков рода *Nematus* Panzer (Hymenoptera, Tenthredinidae) из Якутии. *Энтомологический обзор*. 1986;61(1):138–141.
- [Kaymuk E.L. A new species of sawfly of the genus *Nematus* Panzer (Hymenoptera, Tenthredinidae) from Yakutia. *Entomol. Obozr.* 1986;61(1):138–141. (In Russ.)]
18. Аверенский А.И., Багачанова А.К., Бурнашева А.П., Винокуров Н.Н., Ермакова Ю.В., Каймук Е.Л., Новиков Д.А., Ноговицына С.Н., Попов А.А., Попова Л.В., Потапова Н.К. Состав фауны членистоногих Ленского района. Почвы, растительный и животный мир Юго-Западной Якутии. Новосибирск: Наука; 2006:103–155.
- [Averenskiy A.I., Bagachanova A.K., Burnasheva A.P., Vinokurov N.N., Ermakova Yu.V., Kaymuk E.L., Novikov D.A., Nogovitsyna S.N., Popov A.A., Popova L.V., Potapova N.K. The composition of the arthropod fauna of the Lensky District. *Pochvy, rastitelnyy i zhivotnyy mir Yugo-Zapadnoy Yakutii*. Novosibirsk: Nauka; 2006:103–155. (In Russ.)]
19. Винокуров Н.Н., Потапова Н.К., Багачанова А.К., Бурнашева А.П., Попов А.А., Евдокарлова Т.Г. Новые виды насекомых, обнаруженных на территории природного парка «Ленские столбы». Природный парк «Ленские столбы»: прошлое, настоящее и будущее. Якутск; 2007:182–198.
- [Vinokurov N.N., Potapova N.K., Bagachanova A.K., Burnasheva A.P., Popov A.A., Evdokarova T.G. New species of insects found in the «Lena Pillars» Nature Park. *Prirodnyy park «Lenskiye stolby»: proshloye, nastoyashcheye i budushcheye*. Yakutsk; 2007:182–198. (In Russ.)]
20. Попов А.А. Пилильщики семейства Diprionidae (Hymenoptera, Symphyta) Якутии (Восточная Сибирь). Вестник Мордовского университета. 2013; 3-4:125–129.
- [Popov A.A. Sawflies of the family Diprionidae (Hymenoptera, Symphyta) of Yakutia (Eastern Siberia). *Vestnik Mordovskogo universiteta*. 2013; 3-4:125–129. (In Russ.)]
21. Попов А.А. Обзор пилильщиков семейства Pamphiliidae (Hymenoptera, Symphyta) Якутии. Наука и образование. 2015;4 (80):33–137.
- [Popov A.A. Review of sawflies of the family Pamphiliidae (Hymenoptera, Symphyta) of Yakutia. *Nauka i obrazovaniye*. 2015;4 (80):33–137. (In Russ.)]
22. Попов А.А., Каймук Е.Л. Пилильщики семейства Tenthredinidae (Hymenoptera: Symphyta) Якутии. Труды РЭО. 2010в. Т. 82, вып. 2. С. 67–73.
- [Popov A.A., Kaymuk E.L. Sawflies of the family Tenthredinidae of Yakutia. *Trudy REO*. 2010;82(2):67–73. (In Russ.)]
23. Степанов А.Д., Ноговицына С.Н., Попов А.А., Сивцева Л.В. Список насекомых и пауков ООПТ Республики Саха (Якутия). Разнообразие насекомых и пауков особо охраняемых природных территорий Якутии. Якутск; 2007:90–159.
- [Stepanov A.D., Nogovitsyna S.N., Popov A.A., Sivtseva L.V. List of insects and spiders of protected areas of the Republic of Sakha (Yakutia). *Diversity of insects and spiders of specially protected natural territories in Yakutia*. Yakutsk; 2007:90–159. (In Russ.)]
24. Hammer Ø., Harper D. *Paleontological Data Analysis*. Blackwell publishing; Oxford: 2006. 351 p.
25. Песенко Ю.А. Номограмма для распределения видов животных по классам относительного обилия, построенная на основе пятибалльной логарифмической шкалы. Зоол. ж. 1972;52(12):1875–1878.
- [Pesenko Yu.A. Nomogram for the distribution of animal species into relative abundance classes, based on a five-point logarithmic scale. *Zool. zh.* 1972;52(12): 1875–1878. (In Russ.)]

26. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУТК; 1989. 115 с.
[Atlas of agriculture of the Yakut ASSR. M.: GUGK; 1989. 115 p. (In Russ.)]
27. Тимофеев П.А., Исаев А.П., Щербаков И.П., Шурдук И.Ф., Волотовский К.А., Бойченко А.М., Медведева Н.С., Михалева Л.Г., Ситников Н.М. *Леса среднетаежной подзоны Якутии*. Якутск; 1994. 140 с.
[Timofeyev P.A., Isayev A.P., Shcherbakov I.P., Shurduk I.F., Volotovskiy K.A., Boychenko A.M., Medvedeva N.S., Mikhaleva L.G., Sitnikov N.M. *Forests of the Middle Taiga subzone in Yakutia*. Yakutsk; 1994. 140 p. (In Russ.)]
28. Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Перфильева В.И., Щербаков И.П. *Основные особенности растительного покрова Якутской АССР*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1987. 156 с.
[Andreyev V.N., Galaktionova T.F., Perfilieva V.I., Shcherbakov I.P. *The main features of the vegetation cover of the Yakut ASSR*. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1987. 156 p. (In Russ.)]
29. Аверенский А.И., Исаев А.П. *Насекомые – главные вредители лесов Якутии*. Новосибирск: Наука; 2013. 167 с.
[Averenskij A.I., Isaev A.P. *Insects as the main pests of the forests in Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 2013. 167 p. (In Russ.)]
30. Поляков В.Я. Большой лиственничный пилильщик (*Nematus erichsonii* Hrt.). *Труды по лесному опытному делу*. 1928;1(3):1–19.
[Polyakov V.Ya. Large larch sawfly (*Nematus erichsonii* Hrt.). *Proceedings on experimental forestry*. 1928. T. 1. Выр. 3. S. 1–19. (In Russ.)]
31. Галкин Г.И. Хвоегрызущие вредители лиственничных культур в Красноярском крае. *Лиственница*. Т. 2. Красноярск; 1964:311–321.
[Galkin G.I. Conifer-feeding pests of larch crops in Krasnoyarsk Krai. *The larch*. T. 2. Krasnoyarsk; 1964: 311–321. (In Russ.)]
32. Галкин Г.И., Козлов В.И. Зеленый лиственничный пилильщик (*Lygaeonematus wesmaeli* Tischb.) в лесных культурах Сибири и меры борьбы с ним. *Труды СибНИИЛХ*. 1965. Вып. 13. С. 24–40.
[Galkin G.I., Kozlov V.I. Green larch sawfly (*Lygaeonematus wesmaeli* Tischb.) in forest crops in Siberia and measures to control it. *Proceedings of SibNIILKh*, 1965. Выр. 13. S. 24–40. (In Russ.)]
33. Вержущий Б.Н. *Пилильщики Прибайкалья*. М.: Наука; 1966. 162 с.
[Verzhutskiy B.N. *Sawflies of the Baikal region*. M.: Nauka; 1966. 162 p. (In Russ.)]
34. Якутия. С.С. Коржуев. М.: Наука; 1965. 461 с.
[Yakutiya. S.S. Korzhuyev. Moscow: Nauka; 1965. 461 p. (In Russ.)]

Об авторе

ПОПОВ Анатолий Анатольевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2623-7914>, e-mail: ananpo@mail.ru

Аффилиация

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина 41, Российская Федерация

About the author

POPOV, Anatoly Anatolievich, Cand. Sci. (Biology) Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2623-7914>, e-mail: ananpo@mail.ru

Affiliation

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 10.03.2022

Поступила после рецензирования / Revised 20.07.2022

Принята к публикации / Accepted 07.09.2022

Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска

Я. Б. Легостаева¹, А. А. Руфова²✉

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Академия наук РС (Я), г. Якутск, Российская Федерация

✉ alenaruf@inbox.ru

Аннотация

Проведен ретроспективный анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер г. Якутск (Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары) на основе созданной базы данных, охватывающей период с 1985 по 2021 г. Изучаемые озера преимущественно гидрокарбонатно-натриевые с повышенной минерализацией и умеренно-жесткой водой. В суммарный объем катионов основной вклад вносят Na^+ и Ca^{2+} , анионов – HCO_3^- и Cl^- . Прослеживается снижение минерализации с невысокой достоверностью аппроксимации. Вариации значений жесткости воды напрямую зависят от содержания катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и гидрокарбонатов. Среднее содержание взвешенных веществ значительно выше существующих ПДК_{кб}, изменение концентраций в каждом озере носит индивидуальный характер, наиболее высокая обнаружена в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях. Наиболее значимыми факторами в формировании гидрохимического режима являются минерализация и жесткость воды. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер. Микроэлементный состав характеризуется повышением концентраций Zn и Cu .

Ключевые слова: антропогенное воздействие, озерные экосистемы, городские озера, ретроспективный анализ
Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания АН РС (Я) «Анализ экологической обстановки регионов Якутии, выявление неблагоприятных зон и факторов, отрицательно влияющих на экологическую безопасность» и Государственного задания ИГАБМ СО РАН (FUEM-2019-0003).

Благодарности. Авторы благодарны академику АН РС (Я), профессору Саввинову Дмитрию Дмитриевичу, безвременно ушедшему из жизни, за поддержку, советы и ценные замечания на начальной стадии исследований.

Для цитирования: Легостаева Я.Б., Руфова А.А. Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):572–591. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591>

Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk

Y. B. Legostaeva¹, A. A. Rufova²✉

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute ,

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

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

✉ alenaruf@inbox.ru

Abstract

A retrospective analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk (Beloe, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kuel, Sergelyakh, Saysary) was carried out in accordance with a registered database covering the period from 1985 to 2021. The studied lakes are mainly sodium bicarbonate with increased mineralization and moderately hard water. The main contribution to the total volume of cations is made by Na^+ and Ca^{2+} , HCO_3^- and Cl^- anions. They also demonstrate a decrease in mineralization with a low value of approximation reliability. The variation of water hardness values directly depends on the content of Ca^{2+} and Mg^{2+} cations and hydrocarbonates. The average value of suspended materials in the lakes is significantly higher than the existing Maximum Concentration Limit (MCL). The change in their content in each lake is individual, however the highest was found in Beloe, Saysary and Khatyng-Yuryah lakes.

Mineralization and hardness of water are the most significant factors in the formation of the hydrochemical conditions. The established mechanisms are characteristic of the whole sample, which reflects the nature of the formation of the hydrochemical conditions of urban lakes. The trace element composition is characterized by an increase in Zn and Cu concentrations.

Keywords: anthropogenic impact, lake ecosystems, urban lakes, retrospective analysis

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment to the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) on the project “Analysis of the ecological situation in Yakutia, identification of unfavorable zones and factors negatively affecting environmental safety” and the State Assignment to the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (project number FUEM-2019-0003).

Acknowledgements. The authors are grateful to the Full Member of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Professor, Dmitry D. Savvinov, who passed away prematurely, for support, advice and valuable comments when working at the initial stage of the research.

For citation: Legostaeva Y.B., Rufova A.A. Analysis of the hydrochemical conditions of the largest lakes in Yakutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):572–591. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591>

Введение

Понимание процессов, состава, характера поступления и накопления загрязняющих веществ в озерные экосистемы селитебных территорий в любом уголке Земли весьма актуальны с точки зрения экосистемного риска и рационального природопользования [1, 2]. Озера как в природных ландшафтах, так и в пределах селитебных территорий выполняют множество экологических функций, таких как регулирование и хранение воды, улучшение ее качества, обеспечение среды обитания для животных, регулирование местного климата и обеспечение людей питьевой водой и пищей [3]. Во всем мире, особенно в развивающихся странах, из-за урбанизации, роста населения и промышленного развития огромное экологическое давление оказывается на водную среду озер, что приводит к ее загрязнению и ухудшению экологических функций. Эти процессы с развитием техногенного воздействия закономерно ухудшают качество городских озерных экосистем и на территории столицы одного из крупных регионов РФ – г. Якутск, где городские озера подвергаются сильному заилению, зарастанию и обмелению, что вызывает необходимость организации постоянного мониторинга за качеством гидрохимического состава озерных экосистем. Эти работы требуют ретроспективного анализа различных данных – морфометрических, литологических, гидрохимических, гидробиологических и других, составляющих основу различных информационных баз данных (БД). Такие БД являются инструментом для сбора, систематизации, группировки и хранения материалов, в том числе по химическому составу поверхностных вод.

Мировой опыт доказал эффективность использования ГИС и БД для оценки состояния гидрохимии водоемов и содержания гидробионтов в озерах разных регионов мира [4]. Большинство пресноводных озер имеет многоцелевое использование, включая питьевое водоснабжение, промышленное и сельскохозяйственное производство. В мировой практике разработаны общие базы данных по природным озерам, например, в Канаде, Китае, Польше, Монголии, Белоруссии и др. [5–9]. Авторы приходят к единому мнению, что для изучения и рационального использования озерных экосистем требуется выделение общих и индивидуальных признаков, которые позволили бы определить типы водоемов в зависимости от комплекса объединяющих показателей. Для примера предлагается рассматривать показатели гидрохимического режима водоемов, отражающие особенности протекания в них продукционных процессов и осадконакопления. При этом типизация озер на основании химического состава абиотических и биотических компонентов позволяет усовершенствовать систему их использования и охраны.

В России в каждом регионе зарегистрировано не менее десятка баз данных по данному вопросу [10–12]. Тематика предлагаемых БД обширная – от речных и озерных систем [13–16] до грунтовых вод и искусственных водохранилищ [17, 18]. Анализ существующих публикаций выявил оригинальные структурированные материалы по химической, физической и биологической характеристике водных ресурсов разных регионов РФ. В то же время в каждой работе есть свои индивидуальные особенности, например, определение уровня экологической безопас-

ности, связанной со спецификой социально-экономического развития каждого субъекта.

В Республике Саха (Якутия) зарегистрированы комплексные [19, 20] и частные работы по химическому составу вод [21, 22]. По гидрохимическому составу озер г. Якутск Академией наук РС (Я) и Институтом биологических проблем криолитозоны СО РАН создано три базы данных за 1985–2021, 2009–2016 и 2018–2019 гг. [23, 24].

На сегодня накопилось достаточное количество достоверного фактического материала для ретроспективной научной базы данных химического состава озерных экосистем г. Якутск, которая будет основой для разработки региональной политики по охране и рациональному использованию водно-озерных ресурсов. В настоящей работе приведено описание принципов и методов создания систематизированной базы данных гидрохимического состава наиболее крупных озер г. Якутск, позволяющей оценить эколого-геохимическое состояние и «ценность» каждого водоема.

Методика исследования и фактический материал

История аккумуляции материала. Первые научные данные о водоемах г. Якутск получены экспедицией Переселенческого управления, работавшей в 1909–1914 гг. под руководством академика К.Д. Глинки [25]. Более детальное изучение начинается с 80-х гг. XX в. одновременно несколькими организациями города: отделом охраны природы ЯНЦ СО АН СССР [26], Институтом мерзлотоведения СО РАН [27] и лабораторией озероведения Якутского государственного университета им. М.К. Аммосова [28].

В настоящее время исследованиями озер на территории Якутии и г. Якутск, в частности, занимаются Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН [29, 30], Институт мерзлотоведения СО РАН [31–33], Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера [34] и Институт естественных наук Северо-Восточного федерального университета [35, 36]. Постоянный контроль за состоянием водных ресурсов на территории РС (Я) осуществляет ГБУ РС (Я) «Республиканский информационно-аналитический центр экологического мониторинга» (РИАЦЭМ).

Вся доступная опубликованная информация составляет массив данных, который был проанализирован и сгруппирован по ряду признаков,

первостепенные из них: генетическое происхождение озерных котловин, морфометрические и гидрологические показатели, а также уровень антропогенной нагрузки. В результате выделено пять эталонных озерных экосистем, валидированная информация по которым прослеживается с 1985 г. (табл. 1).

Материал фактического опробования. Объектами исследования послужили озера, расположенные в пределах селитебной территории Якутска, – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары, которые имеют природное старичное происхождение, отличаются разной антропогенной нагрузкой в зависимости от местоположения водоема на территории города (рис. 1). В табл. 2 приведена общая морфометрическая характеристика исследуемых озер [35].

С 2009 по 2021 г. проведено гидрохимическое опробование в летний период времени с мая по сентябрь с отбором проб раз в месяц в первую его декаду. Всего отобрано 250 проб поверхностных озерных вод.

Ретроспективный анализ гидрохимического состава озер г. Якутск сделан на основе опубликованных, фондовых и авторских материалов, охватывающих период с 1985 по 2021 г. Осуществлена интеграция данных всех организаций, проводивших исследования городских озерных вод и сопоставимых по методам химического анализа. В общую выборку вошли данные по 786 пробам и 3252 элемент/определения. Из общей выборки 32 % – это непосредственно авторские данные.

Методы химического анализа озерных вод. Химико-аналитические работы проводились в лабораториях НИИПЭС СВФУ им. М.К. Аммосова и ИГАБМ СО РАН. Использованы общепринятые методы исследования поверхностных природных вод на основании утвержденных ГОСТов с определением основных показателей химического состава воды. Анализ контрольных проб проведен в Центральной геологической лаборатории АО «Якутскгеология» (Росгео, АО) (Сертификат соответствия № СДС «УКАРГЕО»RU 0027.21). Оценка состояния водоемов по гидрохимическому составу проведена с использованием классификации О.А. Алекина.

Методы обработки данных. На основе общей выборки из составленных в БД атрибутивных таблиц проведены расчеты фоновых концентраций макро- и микроэлементного состава

Таблица 1

Основные источники данных по гидрохимическому составу озер г. Якутск

Table 1

The main sources of data on the hydrochemical composition of the lakes in Yakutsk

Название / Title	Организация / Institution	Авторы / Authors	Годы исследования / Years of research	Год выпуска / № свидетельства (год регистрации) / Year of issue / No certificate (year of registration)
Фондовые и опубликованные материалы / Archive and published materials				
НИР «Антропогенная динамика природной среды районов городских поселений Центральной Якутии (на примере г. Якутска)»	Отдел охраны природы ЯНЦ СО АН СССР	Анисимова Н.П.	1985–1989	1989
Экогеохимия городских озер Якутска	Институт мерзлотоведения СО РАН	Макаров В.Н., Седельникова А.Л.	1986–2013	2016
НИР «Эколого-лимнологическая паспортизация озер в черте г. Якутска»	Лаборатория озероведения БГФ ЯГУ им. М.К. Аммосова	Жирков И.И., Пестрякова Л.А.	1990–1995	1995
НИР «Трансформация экосистемы в процессе урбанизации территорий распространения многолетнемерзлых пород»	НИИ прикладной экологии Севера СВФУ им. М.К. Аммосова	Ксенофонтова М.И.	2009–2013	2013
НИР «Экологические проблемы северных городов»	Академия наук РС (Я)	Руфова А.А.	2009–2016, 2021	2017
Базы данных / Databases				
Озера Центральной Якутии	Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова	Пестрякова Л.А. и др.	–	2014621709, (2014)
Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в черте г. Якутск	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Габышев В.А., Габышева О.И.	2018–2019	2021622391, (2021)
Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в окрестностях г. Якутск	Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН	Габышев В.А., Габышева О.И.	2018–2019	2021622394 (2021)
Реестр гидрохимического состава озер г. Якутск за 2009–2016 гг.	Академия наук РС (Я)	Руфова А.А.	2009–2016	2022620398 (2021)
Гидрохимический состав озер г. Якутск за 1985–2021 гг.	Академия наук РС (Я)	Легостаева Я.Б., Руфова А.А.	1985–2021	2022622195 (2022)

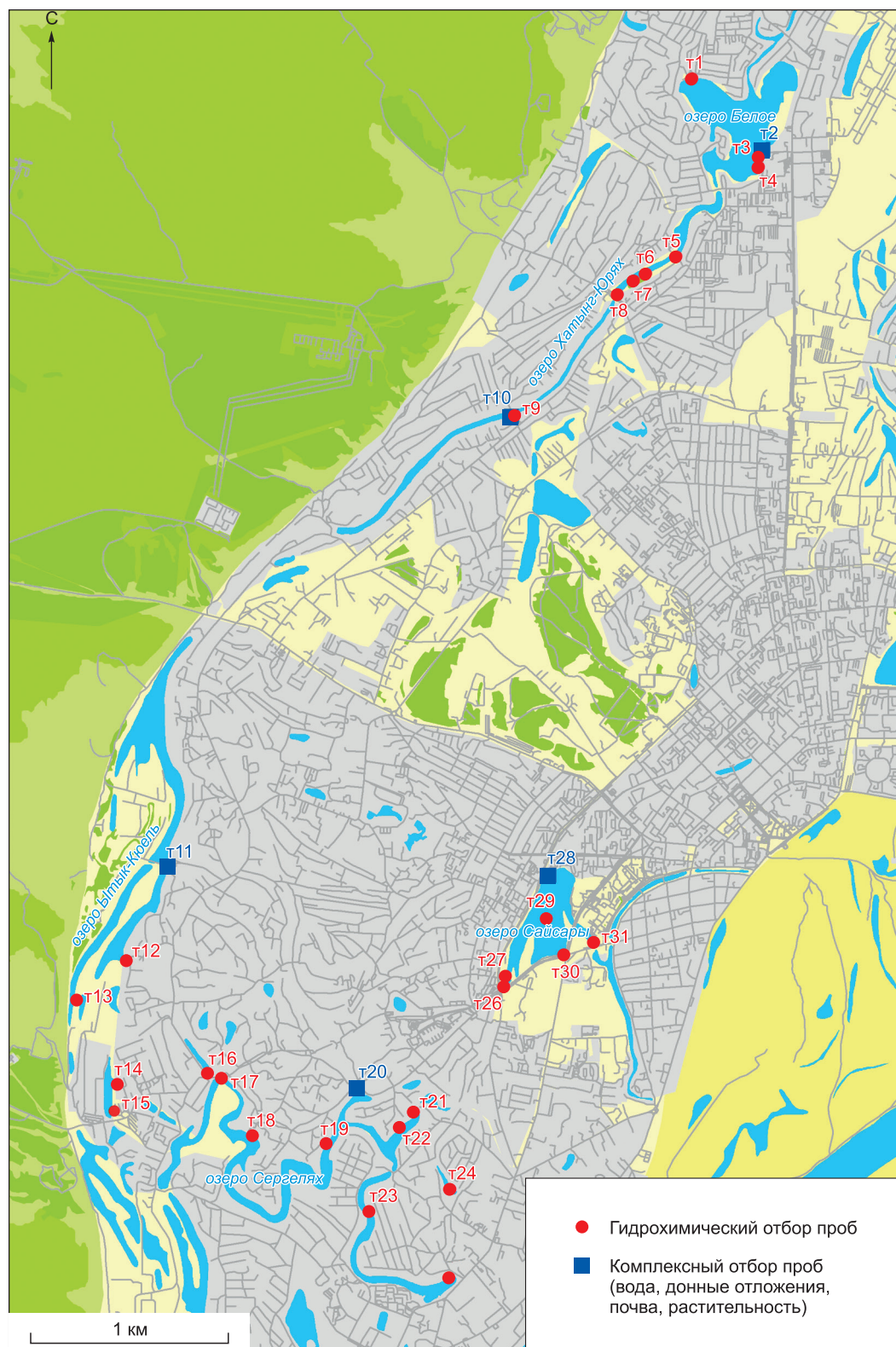


Рис. 1. Карта-схема фактического опробования наиболее крупных озер г. Якутск.

Fig. 1. Map-diagram of the actual sampling of the largest lakes in Yakutsk.

Морфометрическая характеристика озер г. Якутска

Table 2

Morphometric characteristics of the lakes in Yakutsk

Характеристика / Characteristics		Белое / Beloe	Хатынг-Юрях / Khatyng-Yuryakh	Ытык-Кюель / Ytyk-Kyuel	Сергелях / Sergelyakh	Сайсары / Saysary
Площадь зеркала воды, км ²		0,67	0,26	0,89	0,47	0,49
Объем воды, м ²		1,94	0,28	1,34	0,42	1,23
Глубина, м	максимальная	6,5	3,0	2,6	2,0	6,0
	средняя	2,9	1,1	1,5	0,88	2,65
Длина, км	озера	1,3	5,2	5,0	6,0	1,4
	береговой линии	6,7	10,7	6,7	–	5,4
Ширина, км	максимальная	1,28	0,16	0,55	0,15	0,47
	средняя	0,28	0,05	0,17	0,08	0,35

озерных вод методами описательной статистики. Перед статистическим анализом распределение набора данных оценивалось по методу Колмогорова–Смирнова. В случае отклонения распределения от нормального данные перед статистической обработкой подвергались логарифмическому преобразованию [37, 38]. В результате рассчитанные среднегеометрические значения могут быть приняты за фоновые концентрации для озерных вод Якутска и его окрестностей.

Эколого-геохимическая характеристика озерных вод проводилась на основе расчета коэффициентов концентрации относительно нормативов ПДК для водоемов культурно-бытового назначения ($K_{ПДК}$) и фоновых концентраций (K_k). Учитывались $K_{ПДК}$ и K_k каждого компонента со значениями $>1,5$.

Инструменты обработки данных. Карта-схема фактического опробования построена с помощью программы SAS. Планета 2012.12.10106 Stable и MC Paint 3D. Схемы, диаграммы, графики сделаны в программе MC Excel. Описательная статистика выполнена в программе Statistica 10.

Результаты исследований

Обзор и принципы построения БД. С каждым годом накапливается огромное количество материалов и данных, которые сгруппированы и систематизированы в базы данных. Первая зарегистрированная БД по озерам Центральной Якутии, подготовленная сотрудниками Северо-Восточного федерального университета, вышла в 2014 г. БД содержит систематизированные сведения по озерам Центральной Якутии: географические, морфометрические, гидрологические

и гидрохимические показатели [19]. В информационный массив включены данные о 181 озерах, находящихся на территории шести районов Центральной Якутии: Чурапчинского, Мегино-Кангаласского, Намского, Таттинского, Амгинского и Усть-Алданского. В выборку исследованных водоемов были включены озера, наиболее вовлеченные в хозяйственный оборот населения региона. В этой БД отсутствуют сведения о гидрохимическом составе озер, расположенных на территории г. Якутск.

В 2021 г. зарегистрирована база данных по гидрохимическому составу озер в черте г. Якутск, подготовленная сотрудниками Института биологических проблем криолитозоны СО РАН [23]. База данных содержит оригинальные материалы по показателям химического состава вод озер в совокупности с показателями качества воды за 2018–2019 гг. Также выявлены индекс и степень загрязненности воды.

В том же году вышла база данных «Реестр гидрохимического состава озер г. Якутска за 2009–2016 гг.» Академии наук РС (Я) [24], где сгруппированы показатели многолетнего режимного наблюдения за вариациями макро- и микроэлементного состава озерных вод. База включает характеристики пяти озер – Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях и Сайсары. В общую выборку вошли данные по 195 пробам и 5265 элемент/определению.

В 2022 г. зарегистрирована ретроспективная база данных гидрохимического состава озер г. Якутск за 1985–2021 гг. [39], которая разрабатывалась с учетом основных научных прин-

ципов: достоверности, историчности, системности, открытости и верификации [40, 41].

Можно выделить следующие основные положения принципов формирования БД:

1. Принцип фундаментальности и практичности. База данных составлена на основе фундаментальных и прикладных исследований. Может использоваться для информационного обеспечения научных исследований, позволяя анализировать и оценивать динамику изменения химического состава и качества воды озер, прогнозировать возможные изменения их состояния.

2. Принцип достоверности. База данных разработана на фактических данных, основанных на многолетнем исследовании о состоянии химического состава озерных экосистем. Впервые проведен ретроспективный анализ.

3. Принцип развития, историчности и современности. При составлении базы данных использовались фондовые и опубликованные материалы, охватывающие период с 1985 по 2021 г.

4. Принцип системности и комплексности. Озерная экосистема рассматривалась наряду с окружающей природной средой как целостная и развивающаяся система, закономерно связанная с факторами формирования химического состава озер.

5. Принцип открытости. База данных может развиваться и продолжаться. Для получения новых знаний будущие исследования можно будет продолжить в соответствии с той же структурой и содержанием базы данных.

6. Принцип верификации. Информация и материалы, заложенные в БД, проверяемы на истинность и достоверность. При этом в работе учтена сопоставимость методов химического анализа.

Ключевым этапом работы является разработка структуры базы данных, содержащей описательную и ретроспективную характеристику химического состава озер г. Якутск. Структура БД разработана по иерархической схеме соподчинения и включает объект исследования, учреждения (исполнители), период и источник исследования (рис. 2). Во вводной части дается определение объекта исследования, которые представляет собой отдельную единицу, в данном случае – озеро. Следующий блок – учреждения или организация-исполнитель, определяющие тему и задачи научных исследований.

Далее – период проведения исследований, определяющий объем работы. Замыкающее звено – источники научной информации, которые

делятся на фондовые, опубликованные и авторские материалы. Вместе с тем, могут быть использованы материалы, одновременно являющиеся фондовыми и опубликованными.

В БД отражены количественные и качественные характеристики: химические показатели, шифр методики исследования, количество проб и дата исследования. Характеристика гидрохимического состава озерных вод состоит из органолептических, физических и химических показателей, которые описывают содержание катионов, анионов, микроэлементов, а также органических показателей.

База данных гидрохимического состава озер г. Якутск является основой для проведения ретроспективного анализа и рационального использования городских озерных экосистем. БД предполагается расширять и совершенствовать, в частности, трансформировать в открытый для всеобщего доступа формат. Сделать более удобной для анализа и управления данными кадастровой оценки озерных экосистем, определения оптимального направления их рационального использования и контроля над их функционированием в условиях различной степени антропогенной нагрузки.

Ретроспективный анализ гидрохимического состава озерных вод. В последние годы при оценке состояния водных систем, в том числе и озерных, широко изучались обычные индикаторы загрязнения воды, включая эвтрофикацию, тяжелые металлы и органические загрязнители. На основе полученных данных сделан вывод, что озера Якутска характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом, повышенной минерализацией и умеренно-жесткой водой (табл. 3).

В целом для озерных вод суммарный объем катионов $128,41 \text{ мг/дм}^3$, основной вклад вносят Na^+ , Ca^{2+} и Mg^{2+} . Сумма анионов составляет $328,30 \text{ мг/дм}^3$ с доминированием HCO_3^- и Cl^- . Значительные колебания гидрохимических показателей, в том числе содержания HCO_3^- и Cl^- , в значительной степени связаны с проточностью городских озер. Озера подпитывались через малые реки, такие как Шестаковка и Мархинка, от основной водной артерии – р. Лена. Обычно в речной воде содержание HCO_3^- и Cl^- бывает в разы больше, чем в озерной [42]. И в годы, когда осуществлялось зарегулирование большого и малого колец городских озер, их пополнение за счет речного стока вносило существенное изме-

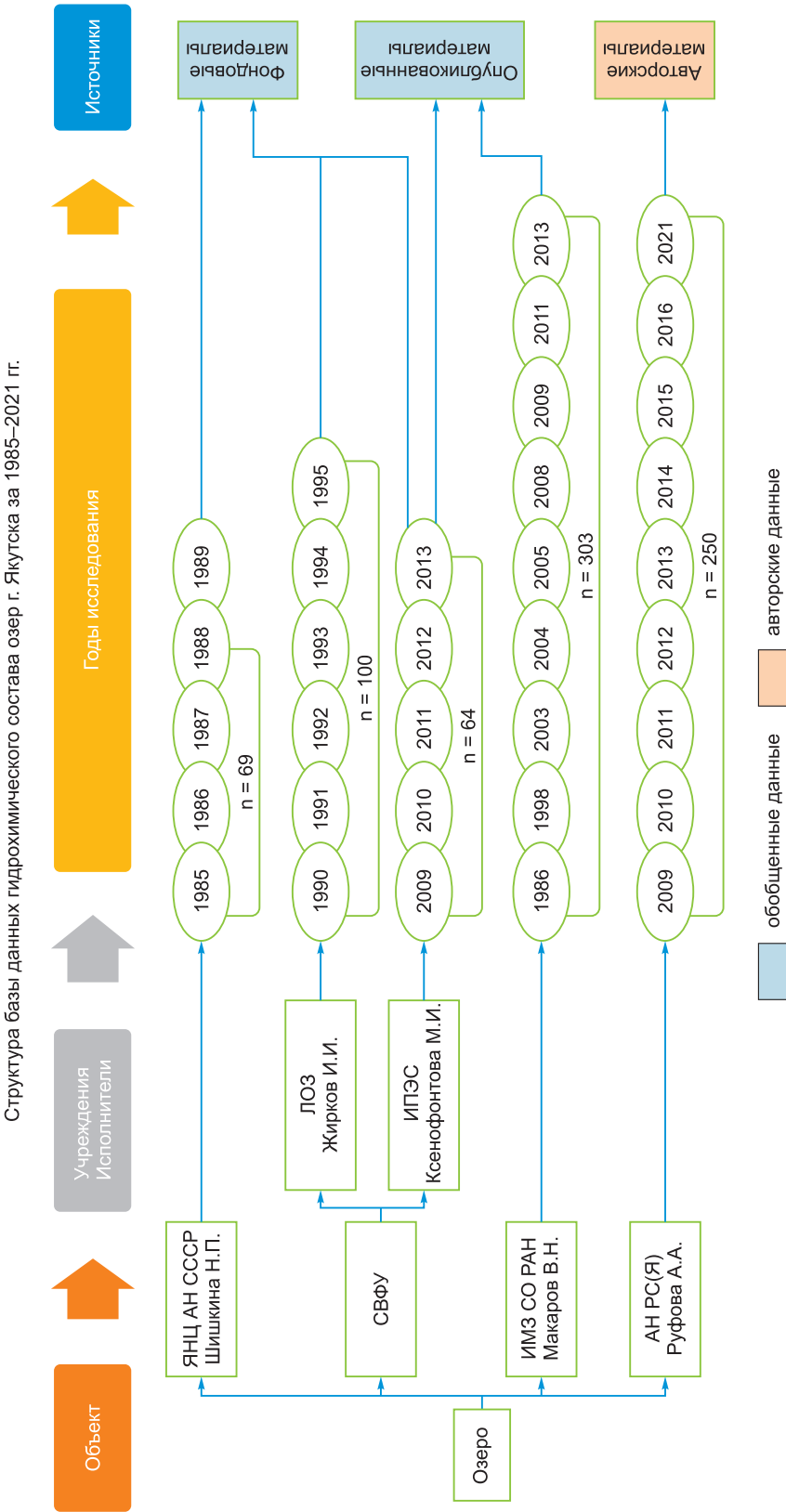


Рис. 2. Структура базы данных
Fig. 2. Database structure

Таблица 3

Усредненная гидрохимическая характеристика озерных вод г. Якутск

Table 3

Averaged hydrochemical characteristics of the lake water in Yakutsk

Показатель, ед. изм. / Indicator, unit of measurement	Количество проб, n / Number of samples, n	Белое, n = 112 / Beloe	Хатынг- Юрях n = 148 / Khatyng- Yuryakh	Ытык- Кюель n = 121 / Ytyk- Kyuel	Сергелях n = 256 / Sergelyakh	Сайсары n = 149 / Saysary	Среднее геометрическое / max-min / Geometric average / max-min	ПДКкб *К _{ПДК} MCL K _{MCL}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
pH	651	8,37	7,93	7,84	8,08	8,34	<u>8,11</u> 9,36–6,9	–
Жесткость, мг-экв/л	786	4,30	4,13	3,58	3,27	4,04	<u>3,84</u> 9,25–1,30	<u>7,00</u> 0,55
Минерализация, мг/дм ³	786	527,10	428,12	368,93	308,95	478,74	<u>415,03</u> 1467,11–153,9	<u>1000</u> 0,415
Взвешенные вещества, мг/ дм ³	69	14,39	7,27	14,65	6,41	6,06	<u>8,23</u> 17,32–4,82	<u>0,75</u> 10,97
Ca ²⁺ , мг/ дм ³	786	26,54	32,58	28,57	25,44	27,43	<u>28,01</u> 106,2–5,2	<u>40</u> 0,7
Mg ²⁺ , мг/ дм ³	786	33,00	25,38	20,84	21,21	30,30	<u>25,70</u> 78,1–5,54	<u>50,0</u> 0,51
Na ⁺ , мг/ дм ³	786	99,56	72,43	49,68	47,42	77,61	<u>66,68</u> 375,0–12,0	<u>200</u> 0,33
K ⁺ , мг/ дм ³	786	11,59	8,55	4,77	5,84	6,51	<u>7,09</u> 68,4–1,32	–
NH ₄ ⁺ , мг/ дм ³	786	0,98	0,76	0,44	0,35	0,63	<u>0,59</u> 30,55–0,05	<u>1,50</u> 0,39
Ba ²⁺ , мг/ дм ³	303	0,02	0,03	0,23	0,02	0,002	<u>0,02</u> 0,51–0,02	<u>0,7</u> 0,03
Si ²⁺ , мг/ дм ³	651	0,17	0,20	0,20	0,15	0,26	<u>0,19</u> 0,3–0,01	<u>7</u> 0,03
Li ⁺ , мг/ дм ³	283	0,03	0,02	0,02	0,02	нпо	<u>0,02</u> 0,24–0,0003	<u>0,03</u> 0,67
HCO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	786	260,37	264,80	272,79	203,33	262,25	<u>251,33</u> 1025,78–37,91	–
Cl ⁻ , мг/ дм ³	786	85,69	76,71	30,62	32,26	83,82	<u>55,87</u> 428,5–1,14	<u>350</u> 0,16
NO ₂ ⁻ , мг/ дм ³	786	0,23	0,04	0,04	0,03	0,13	<u>0,07</u> 3,42–0,001	<u>3,3</u> 0,02
SO ₄ ²⁻ , мг/ дм ³	786	29,49	19,59	16,88	14,07	21,11	<u>19,61</u> 154,2–0,6	<u>500</u> 0,04
NO ₃ ⁻ , мг/ дм ³	786	0,97	0,21	1,56	0,13	1,16	<u>0,54</u> 25,2–0,01	<u>45,0</u> 0,01
PO ₄ ³⁻ , мг/ дм ³	786	0,78	0,49	0,75	0,33	0,44	<u>0,53</u> 3,88–0,08	<u>3,50</u> 0,15
F ⁻ , мг/ дм ³	651	0,40	0,31	0,51	0,25	0,31	<u>0,35</u> 3,89–0,01	<u>1,50</u> 0,23
Fe _{общ} , мг/ дм ³	483	0,34	0,27	0,81	0,27	0,39	<u>0,38</u> 2,55–0,035	<u>0,30</u> 1,27

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pb, мг/ дм ³	283	0,004	нпо	0,02	0,01	0,004	<u>0,007</u> 0,03–0,002	<u>0,01</u> 0,70
Ni, мг/ дм ³	283	нпо	0,003	нпо	нпо	нпо	<u>0,003</u> 0,003–0,003	<u>0,02</u> 0,15
Mn, мг/ дм ³	283	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	<u>0,02</u> 0,12–0,01	<u>0,1</u> 0,2
Co, мг/ дм ³	283	нпо	нпо	нпо	0,0005	0,0008	<u>0,0006</u> 0,0008–0,0005	<u>0,100</u> 0,006
Cr, мг/ дм ³	313	0,001	0,0005	0,0004	0,0003	0,0004	<u>0,0005</u> 0,01–0,0001	<u>0,5</u> 0,001
Cu, мг/ дм ³	313	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	<u>0,001</u> 0,05–0,0001	<u>1,000</u> 0,001
Zn, мг/ дм ³	283	0,08	0,04	0,04	0,02	0,12	<u>0,07</u> 0,42–0,01	<u>1,00</u> 0,07
As, мг/ дм ³	283	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,01
Hg, мг/ дм ³	68	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0,0005
Mo, мг/ дм ³	353	0,0007	0,0005	0,0005	0,0002	0,0004	<u>0,0004</u> 0,002–0,0001	<u>0,250</u> 0,002
Нефтепродукты, мг/ дм ³	548	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	<u>0,02</u> 0,123–0,001	<u>0,30</u> 0,07
Фенолы, мг/ дм ³	518	0,0006	0,0008	нпо	нпо	0,0008	<u>0,0007</u> 0,0008–0,0006	<u>0,001</u> 0,700
АПАВ, мг/ дм ³	518	0,002	0,002	нпо	0,001	0,003	<u>0,002</u> 0,003–0,002	<u>0,500</u> 0,004

Примечание. нпо – ниже предела обнаружения анализа; *K_{ПДК} – рассчитан как отношение среднегеометрического значения к нормативам ПДК культурно-бытового назначения [45, 49, 50].

Note. нпо – below limit of detection; *K_{MCL} – calculated as the ratio of the geometric average value to the MCL standards [45, 49, 50].

нение в гидрохимический состав озерных вод. Ретроспективный анализ показал, что с середины 90-х гг. XX в. в наиболее крупных озерах Якутска отмечается уменьшение содержания основных катионов и анионов в воде и это, соответственно, приводит к снижению суммы минеральных веществ.

За весь период наблюдений прослеживается тенденция снижения минерализации озерных вод с невысокой величиной достоверности аппроксимации, что, на наш взгляд, не вполне закономерно при увеличивающемся антропогенном прессе на озерные экосистемы в пределах селитебной территории (рис. 3, а). В отдельные годы отмечаются пики с максимальным значением – 1987 и 2004 гг. – 820,03 и 770,87 мг/дм³ соответственно. Повышение минерализации в эти годы происходит за счет ее увеличения в водах

озер Сайсары (1467,11 мг/дм³) и Ытык-Кюель (1295,00 мг/дм³).

Реакция водной среды (рН) исследуемых озер в основном слабощелочная (рис. 3, б). Максимальное увеличение щелочности озерных вод наблюдалось в 2002 и 2003 гг., в это время средняя величина рН достигала 8,7 и 8,8. Повышение рН, возможно, связано с небольшим количеством атмосферных осадков в предыдущие годы (180–190 мм в 2001 и 2002 гг.) и, соответственно, с малым поступлением ионов водорода [27].

Выявлена относительно слабая зависимость минерализации от рН, описанная при помощи робастной регрессии (рис. 4). Повышенная минерализация воды в озерах в отдельные периоды исследования могла способствовать большому разбросу данных [43]. Тем не менее, несмотря на существование экстремальных значений ми-

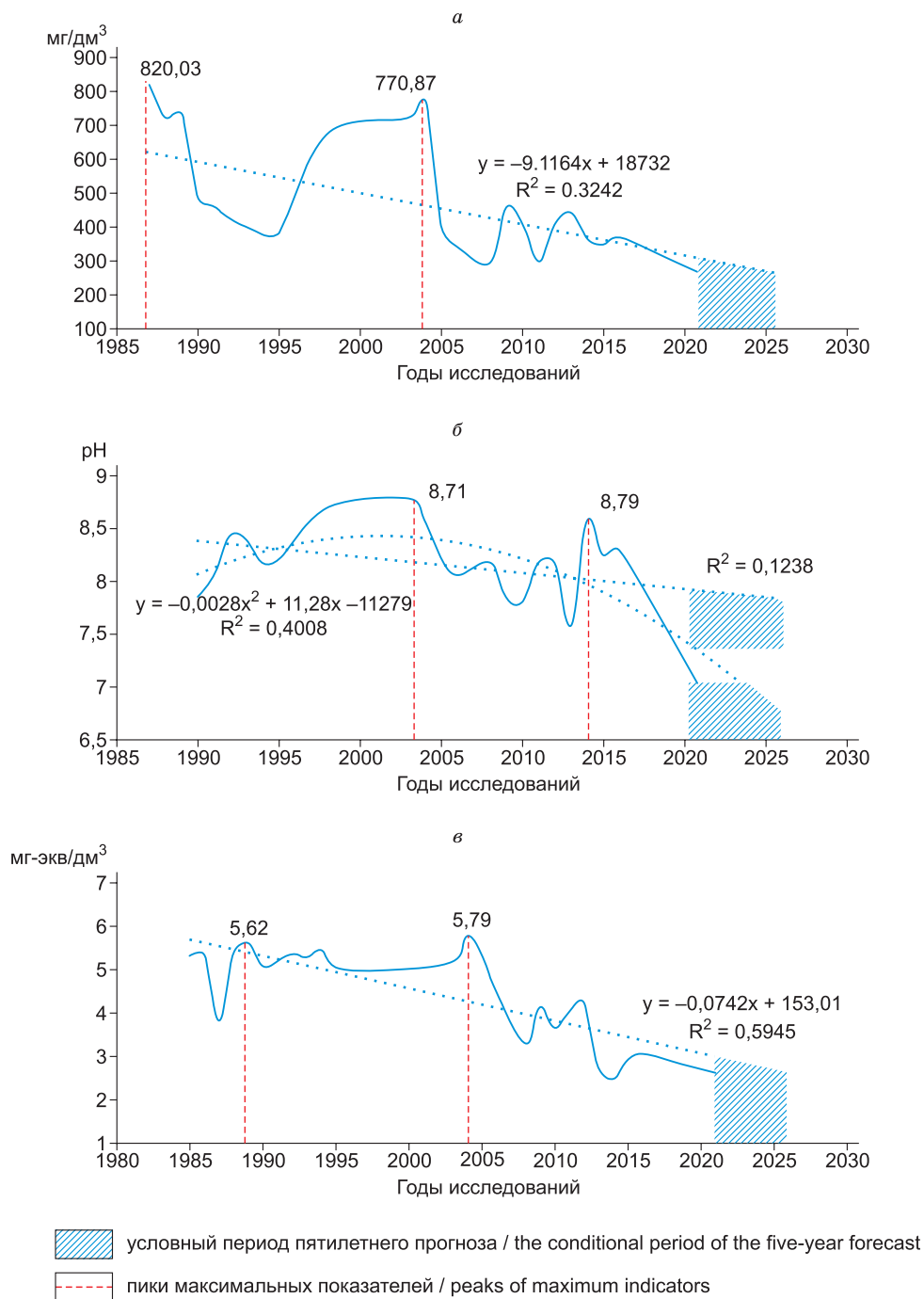


Рис. 3. Многолетняя динамика изменения показателей минерализации (а), pH (б) и жесткости (в) в озерных водах г. Якутск.

Fig. 3. Long-term dynamics of changes in mineralization (а), pH (б) and hardness (в) in lake water in Yakutsk.

нерализации, группируемых по pH ближе к нейтральной (6,9–7,7) и слабощелочной (7,9–8,7), основная выборка подчиняется законам линейного распределения [44] и характеризует озерные воды Якутска как средминерализованные и слабощелочные.

По величине общей жесткости воды озера являются умеренно-жесткими с вариациями значений от 2,48 до 5,79 мг-экв/дм³ (рис. 3, в).

Резкие колебания отмечаются в конце 1980-х гг. и в середине 2000-х гг., в остальное время показатель колеблется в достаточно узком диапа-

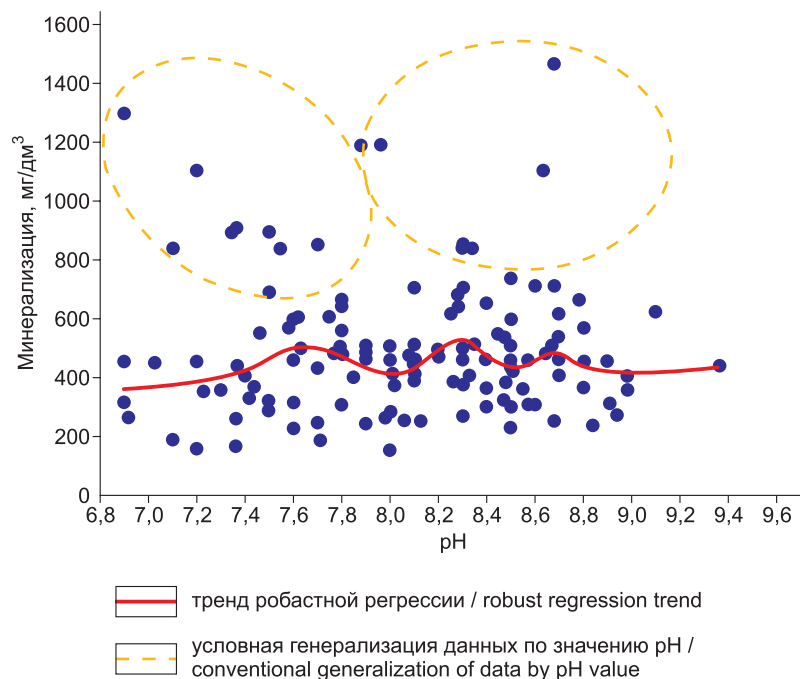


Рис. 4. Зависимость минерализации и pH в озерных водах г. Якутск.

Fig. 4. Dependence of mineralization and pH in lake water in Yakutsk.

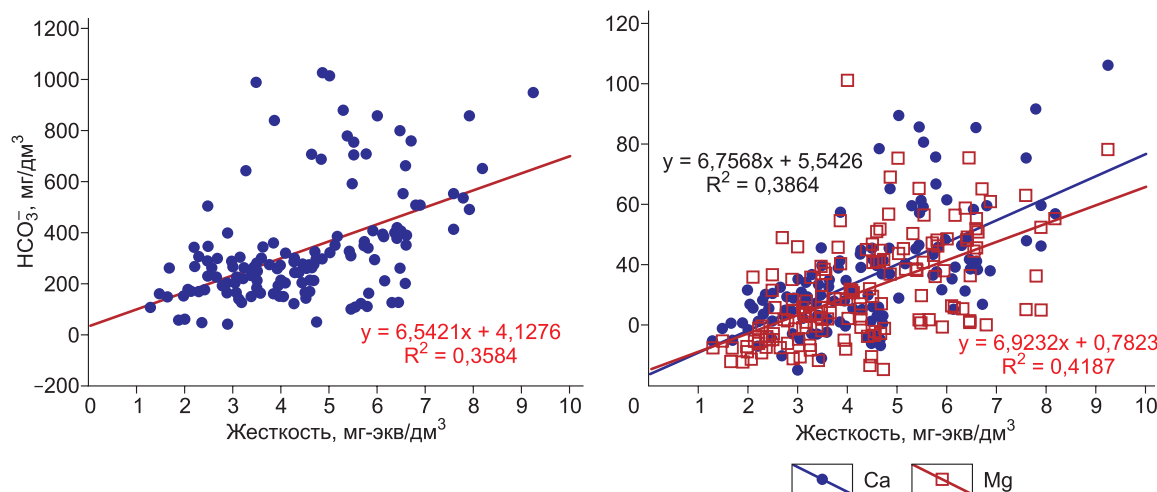


Рис. 5. Зависимость содержания HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} от жесткости воды озер г. Якутск.

Fig. 5. Dependence of HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} content on the water hardness of the lakes in Yakutsk.

зоне, достоверность подтверждается относительно невысокой величиной аппроксимации ($R^2 = 0,6$). Озерная вода обычно имеет меньшую жесткость, чем речная, поскольку она разбавляется в значительной степени атмосферными осадками и талыми водами, которые, как правило, бывают более мягкими [35, 42]. Общеизвестно, что вариация значений жесткости воды напрямую зависит от содержания основных ка-

тионов, в частности Ca^{2+} , Mg^{2+} , а также гидрокарбонатов (рис. 5).

Наибольшее влияние на уровень жесткости озерных вод оказывает количество катионов Ca^{2+} , несколько в меньшей степени – Mg^{2+} . Анионы HCO_3^- также оказывают влияние на жесткость воды, однако их вклад значительно меньше.

Взвешенные вещества – это один из уникальных интегральных показателей состояния по-

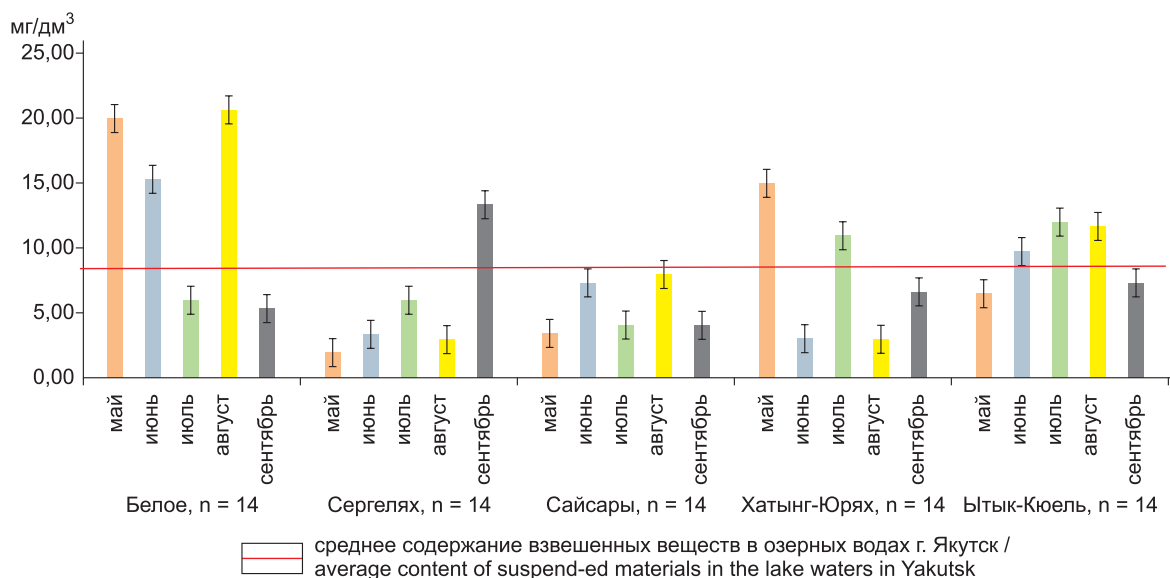


Рис. 6. Динамика изменения содержания взвешенных веществ в воде озер г. Якутск за теплый период времени.

Fig. 6. Dynamics of changes in the content of suspended materials in the water of the lakes in Yakutsk over a warm period of time.

верхностных вод, которые находятся в воде в твердом состоянии и включают в себя глиняные частички, песок, ил, суспендированные частицы, имеющие органическое и неорганическое происхождение. Оценка состояния взвешенных веществ в озерах г. Якутск приведена на основании анализа изменений содержания взвешенных веществ за теплый период времени (рис. 6). На вариации содержания взвешенных веществ влияют различные факторы: смена сезонов года, поступление сточных вод с поверхности, таяние снега, запыленность территории. Среднее геометрическое значение содержания взвешенных веществ, которое можно принять за условно фоновое, равно $8,23 \text{ мг/дм}^3$, что значительно выше существующих ПДК для водных объектов культурно-бытового назначения. Согласно СанПиН, в водных объектах рыбохозяйственного значения при содержании в межень более 30 мг/дм^3 природных взвешенных веществ допускается увеличение содержания их в воде в пределах 5 %. Наиболее высокое содержание взвешенных веществ обнаружено в озерах Белое, Сайсары и Хатынг-Юрях.

Изменения содержания взвешенных веществ в каждом озере носят индивидуальный характер, но ни в одном водоеме колебания значений не носили линейный характер. Это значит, что нарушены природные закономерности, когда, например, относительно высокие содержания взвешенных веществ фиксируются в период весенне-летнего

и осеннего половодья, а далее наблюдается закономерный спад.

В табл. 4 приведена система уравнений, позволяющая описывать вариации содержания взвешенного вещества в исследуемых озерных водах в теплый период времени. Функции основного тренда относятся к полиномиальному типу распределения, который не меняется на всех исследуемых площадках. На основе анализа достоверности аппроксимации выявлены трансформационные изменения гидрохимического режима озерных вод.

Прослеживается зависимость содержания взвешенных веществ от концентрации общего железа, описываемая полиномиальной функцией (рис. 7).

Анализ данных на основе ковариационной матрицы позволил сократить число переменных, описывающих гидрохимический состав озерных вод, с 25 до 13, среди них проведена классификация взаимосвязей на основе величины коэффициентов переменных (табл. 5). Ведущими факторами являются жесткость и минерализация, основные катионы (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+) и анионы (SO_4^{2-} и Cl^-). В качестве подчиненного фактора выступают взвешенные вещества и ион F^- .

Основным результативным признаком при учете вариаций гидрохимического состава озерных вод являются основные ионы в следующей последовательности: Na^+ , NH_4^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Cl^- и K^+ . Значимая доля в факторном анализе при-

Таблица 4

**Критерии состояния озерных вод по характеру содержания взвешенных веществ
на основе метода экспоненциального сглаживания [45]**

Table 4

**Criteria for the state of lake water by the nature of the content of suspended materials
based on the exponential smoothing method [45]**

Название озера, количество проб (n) / Lake, number of samples (n)	Функция основного тренда, величина достоверности аппроксимации (R) / The function of the main trend, the value of the accuracy of the approximation (R)	Состояние водоема по характеру содержания взвешенных веществ / The state of the reservoir by the nature of the content of suspended materials
Ытык-Кюель, n = 14	$y = -1,2619x^2 + 7,9381x - 0,5$ $R^2 = 0,9592$	Слабая трансформация, условия близкие к природным
Сергелях, n = 14	$y = 0,881x^2 - 3,0524x + 5$ $R^2 = 0,7163$	
Хатынг-Юрях, n = 14	$y = 1,0952x^2 - 8,2381x + 20,4$ $R^2 = 0,4073$	Средняя трансформация
Сайсары, n = 14	$y = -0,5952x^2 + 3,7381x + 0,7$ $R^2 = 0,2906$	Сильная трансформация
Белое, n = 14	$y = 0,1905x^2 - 3,5429x + 22$ $R^2 = 0,2642$	

надлежит минерализации и жесткости воды. Установленные закономерности характерны в целом для всей выборки, что отражает специфику формирования гидрохимического режима городских озер. Оставшиеся можно отнести в группу случайных факторов.

Анализ микроэлементного состава озерных вод выявил наличие водорастворимых форм Ni, Mn, Co, Cr, Zn, Cu, Fe_{общ} и Mo. В отдельные годы наблюдается снижение содержания некоторых микроэлементов. За все время наблюдений As и Hg в озерных водах не зафиксировано. При рассмотрении микроэлементов как факторов загрязнения озерных вод фиксируются повышенные концентрации Fe–Cr–Cu–Mo–Zn. Распределение их носит неравномерный характер, подчеркивающий индивидуальность каждого рассматриваемого озера. Но даже по анализу средних значений проявляется отражение природных факторов в формировании микроэлементного состава озерных вод – доминирование элементов группы железа, а также меди и цинка, привносимые в озера с почвенным материалом или пылью (рис. 8).

Обсуждение

Путем обобщения опубликованных, фондовых и авторских материалов разработана база данных гидрохимического состава наиболее круп-

ных озер г. Якутск, которая позволяет представить комплексную оценку и динамику химического состояния озерных вод. Гидрохимический режим городских озер Якутска формируется под влиянием природных факторов, вместе с тем увеличение антропогенного воздействия привносит свои изменения в химический состав поверхностных вод.

Противоречивые результаты отмечаются по многолетней динамике изменения показателей минерализации озерных вод. В целом прослежи-

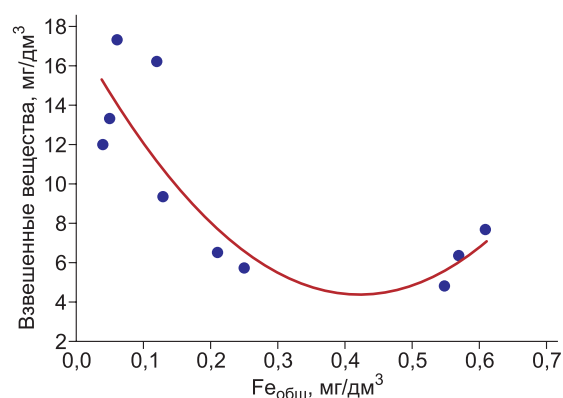


Рис. 7. Зависимость содержания взвешенных веществ и общего железа в озерных водах г. Якутск.

Fig. 7. Dependence of the content of suspended materials and total iron in the lakes in Yakutsk.

Таблица 5

Однофакторный анализ гидрохимического состава наиболее крупных озер г. Якутск

Table 5

One-factor analysis of the hydrochemical composition of the largest lakes in Yakutsk

Показатели / Indicators	Фактор 1 / Factor 1	Фактор 2 / Factor 2	Фактор 3 / Factor 3
Интегральные показатели состояния / Integral state indicators			
pH	0,697	–0,266	–0,659
Жесткость	0,946	0,031	0,265
Минерализация	0,966	0,115	–0,042
Взвешенные вещества	0,227	0,917	–0,026
Фактор ионного состава / Ionic composition factor			
Ca ²⁺	0,099	–0,020	0,966
Mg ²⁺	0,953	–0,086	–0,246
Na ⁺	0,998	–0,020	–0,058
K ⁺	0,903	–0,085	0,080
NH ₄ ⁺	0,973	0,044	0,188
Ba ²⁺	–0,488	0,845	0,209
Sr ²⁺	–0,047	–0,066	0,129
HCO ₃ [–]	0,468	0,590	0,437
Cl [–]	0,919	–0,266	0,099
NO ₂ [–]	0,887	0,164	–0,427
SO ₄ ^{2–}	0,966	0,207	–0,119
NO ₃ [–]	0,115	0,827	–0,265
PO ₄ ^{3–}	0,419	0,888	0,076
F [–]	0,039	0,992	0,107
Фактор загрязнения металлами / Metal pollution factor			
Fe _{общ}	–0,367	0,886	0,010
Mn	0,018	0,385	–0,919
Cr	0,866	0,283	–0,061
Cu	–0,293	0,404	0,862
Zn	–0,258	–0,611	–0,746
Mo	0,780	0,566	0,2442
Фактор органического загрязнения / Organic pollution factor			
Суммарные нефтепродукты	0,069	0,297	0,553
Оценка статистической значимости / Assessment of statistical significance			
Общая дисперсия	10,908	6,574	4,609
Вклад в суммарную дисперсию, %	44,42	28,89	16,95

вается тенденция снижения минерализации, что не вполне закономерно при увеличении антропогенного пресса на озерные экосистемы. К по-

добным выводам пришли и сотрудники ИМЗ СО РАН, отмечающие, что на протяжении последних лет идет понижение величины минерализа-

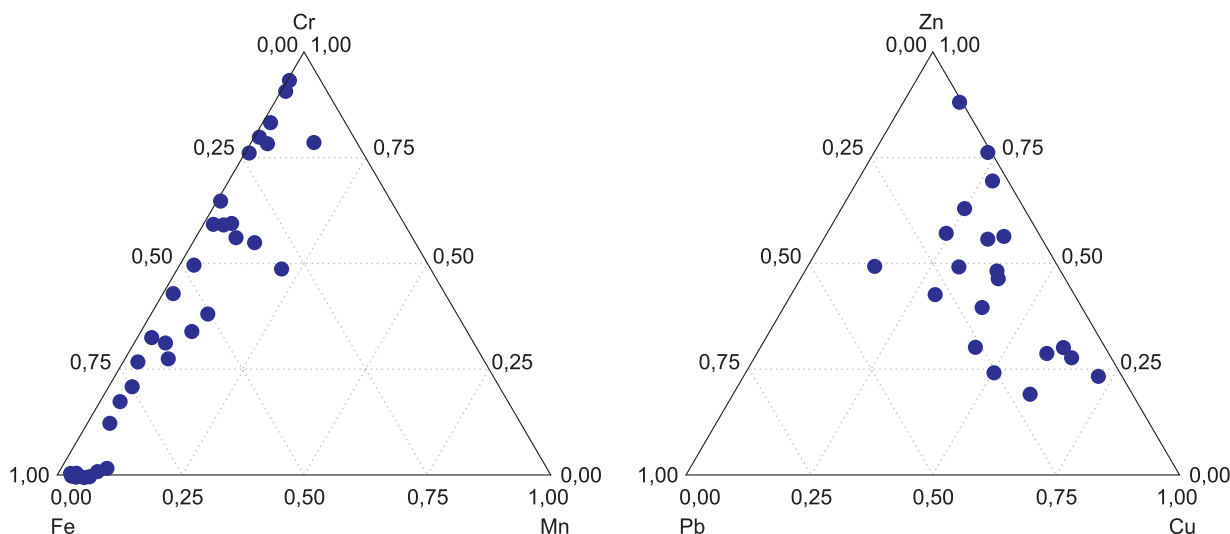


Рис. 8. Характеристика озерных вод г. Якутск по содержанию микроэлементов.

Fig. 8. Characteristics of lake water in Yakutsk by the content of trace elements.

ции вод в озерах Якутска [27]. Для сравнения, например, в Мурманске и Новосибирске установлено увеличение минерализации в водах городских озер, что связывают в том числе и с использованием реагентов противогололедной обработки дорожных покрытий [46, 47]. В Якутске в качестве противогололедного материала используют смесь из крупного песка и мелкого гравия, что, безусловно, более благоприятно для общей экологической обстановки и не приводит, например, к повышению засоления городских грунтов. В то же время, эта смесь увеличивает степень запыленности города в теплый период времени, когда песчано-гравийный материал скапливается по обочинам улиц.

Весомую роль в формировании химического состава озерных экосистем играет степень проточности водоема. В настоящее время проточность городских озер нарушена. С 2015 г. администрацией г. Якутск предпринимаются попытки по восстановлению проточности городской озерной системы. Эта проблема также не уникальна и с ней сталкиваются все коммунальные службы в разных регионах РФ [48].

В целом, микроэлементный состав озерных вод г. Якутск соответствует следующей схеме: $Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Cr > Mo$. Наиболее часто встречающимися и вносящими вклад в загрязнение озерных экосистем являются Fe, Zn, Mn и Cu. Исследованиями сотрудников ИБПК СО РАН выявлено, что повышенная концентрация Zn и

Cu вызывает сокращение общей численности фитопланктона, его видового богатства, а также влияет на изменение в составе доминирующих видов, когда доминанты из цианопрокариот замещаются представителями диатомовых водорослей [29]. Подтверждена перспективность изучения влияния ионов тяжелых металлов на живые компоненты водной экосистемы городских озер Якутска, а также пригодность фитопланктона в качестве тест-объекта для таких исследований.

Основными поллютантами, осложняющими эколого-геохимическое состояние озерных вод Якутска, являются взвешенные вещества, $Fe_{общ}$ и Pb. В наиболее крупных озерах города зафиксировано загрязнение вод, характеризующееся аномально высокими содержаниями взвешенных веществ (превышение ПДК_{кб} от 8 до 20 раз на всех исследуемых площадках), что соответствует сильному загрязнению с высоким риском. Легкое загрязнение с низким риском по $Fe_{общ}$ отмечается на озерах Ытык-Кюель, Белое и Сайсары. Такая же степень загрязнения по Pb наблюдается на оз. Ытык-Кюель. Остальные водоемы – Хатынг-Юрях и Сайсары на данный момент можно отнести к незагрязненным.

Приведенные примеры показывают, что даже предварительный ретроспективный анализ имеющихся результатов наблюдений озерных вод позволяет установить тенденции изменения качества воды. Дальнейший анализ и статистическая

обработка рядов наблюдений гидрологических и гидрохимических характеристик позволят дать более точную оценку тенденций изменения качества воды, роли различных факторов и выполнить прогноз на ближайшую перспективу.

Заключение

Созданная база данных городских озер является удобным инструментом для сбора, систематизации, группировки и хранения материалов, что проиллюстрировано на примере детального изучения гидрохимического состава наиболее крупных водоемов г. Якутск.

Воды изученных озер преимущественно гидрокарбонатно-натриевые с повышенной минерализацией, по величине общей жесткости – умеренно-жесткие. В суммарный объем ионного состава воды основной вклад вносят Na^+ и Ca^{2+} , HCO_3^- и Cl^- . Отмечены повышенные концентрации взвешенных веществ, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ и Pb.

Выводы сделаны на основе многолетних исследований, проводимых ведущими организациями республики. В результате проведенной описательной статистики рассчитаны средние значения основных показателей качества озерных вод городских территорий, которые могут быть основой для дальнейшего гидрогеохимического мониторинга озерных систем г. Якутск.

Список литературы / References

1. Noori R. et al. Hyper-Nutrient Enrichment status in the Sabalan Lake. *Water*. 2021;13:28–44.
2. Mollo V.M. et al. Evaluation of surface water quality using various indices for heavy metals in Sasolburg, South Africa. *Water*. 2022;14:23–75.
3. He S. et al. Occurrence, distribution and ecological risk assessment of contaminants in Baiyangdian Lake. *Water*. 2022;14:33–52.
4. Мэйдмент Д.Р. ГИС для водных ресурсов. М.: Arc Hydro; 2002. 45 с.
[Maidment D.R. GIS for water resources. M.: Arc Hydro; 2002. 45 p.]
5. Lakes. Atlas of Canada. Natural Resources Canada. Archived from the original on. 2. Ottawa: ABC; 2007.
6. Wang S.M., Du S.M. Lakes in China. Beijing: Acad. Sci. Press; 1998.
7. Atlas Jezior Polski Poznan: Bogucki Wydawnictwo Naukowe. Warsaw: Press; 1999.
8. Якушко О.Ф. Озера Белоруссии. Минск: Урожай; 1988. 216 с.
[Yakushko O.F. Lakes of Belarus. Minsk: Uroday, 1988. 216 p. (In Russ.)]

9. Tzerensodnom Zh. Catalogue of Mongolian Lake. Ulan Bator: Mongolian Acad. Sci. Publ., 2000.

10. Гидрохимические показатели водных объектов района Костомукши. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39295580>.

[Hydrochemical indicators of water bodies in the Kostomuksha region. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39295580>. (In Russ.)].

11. Экологический мониторинг гипергалинных водоемов Калмыкии. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39302557>.

[Ecological monitoring of hyperhaline reservoirs in Kalmykia. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39302557>. (In Russ.)].

12. Гидроминеральные ресурсы республики Тыва: химический и геохимический состав. 2021 Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47433710>.

[Hydromineral resources of the Republic of Tyva: chemical and geochemical composition. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47433710>. (In Russ.)].

13. База данных элементного состава вод нижнего течения р. Дон и рек бассейна западного Приазовья. 2020. Доступно: https://elibrary.ru/query_results.asp.

[Database of the composition of the waters of the lower reaches of the river: Don and rivers of the western Azov basin. Available: https://elibrary.ru/query_results.asp. (In Russ.)].

14. База данных: химический состав воды рек арктической зоны России» (архивные данные 1941–1975 гг.). Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42498828>.

[Database: the chemical composition of the rivers of the Arctic zone of Russia» (archival data 1941–1975). 2019. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42498828>. (In Russ.)].

15. База данных значений показателей состава и свойств воды южной и средней части озера Байкал за 2019 год. 2020. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44241866>.

[Database of values of indicators of the composition and properties of water in the southern and middle parts of Lake Baikal for 2019. 2020. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44241866>. (In Russ.)].

16. База данных по соленым озерам юга европейской территории России. 2018. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39314119>.

[Database on salt lakes in the south of the European territory of Russia. 2018. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39314119>. (In Russ.)].

17. Вода и донные отложения Иваньковского водохранилища. 2019. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39309557>.

[Water and bottom sediments of the Ivankovsky reservoir. 2019. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39309557>. (In Russ.)].

18. Химический состав грунтовых вод парковых ландшафтов Ростовской области. 2020. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44758190>.

[Chemical composition of groundwater in park landscapes of the Rostov region. 2020. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44758190>. (In Russ.)].

19. Озера Центральной Якутии. 2014. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324586>.

[Lakes of Central Yakutia. 2014. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39324586>. (In Russ.)].

20. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды разнотипных водоемов левобережья р. Яны в окрестностях пос. Северный. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255121>.

[Hydrochemical indicators and data on water quality in different types of reservoirs on the left bank of the river. Yana in the vicinity of the village. Northern. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255121>. (In Russ.)].

21. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озера Ожогоино. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255138>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of Lake Ozho-gino. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255138>. (In Russ.)].

22. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озера Большое Токо и рек Идюм и Мулам. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255107>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of Lake Bolshoye Toko and the Idyum and Mulam rivers. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255107>. (In Russ.)].

23. Гидрохимические показатели и данные о качестве воды озер в черте г. Якутска. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255136>.

[Hydrochemical indicators and data on the water quality of lakes within the city of Yakutsk. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47255136>. (In Russ.)].

24. Реестр гидрохимического состава озер г. Якутска за 2009–2016 гг. 2021. Доступно: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48137246>.

[Register of the hydrochemical composition of lakes in Yakutsk for 2009–2016. 2021. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48137246>. (In Russ.)].

25. Никифоров К.К. и др. Краткий почвенно-географический очерк Усть-Майского района Якутской области. СПб.: Типография А.Э. Коллинс, 1913; 273 с.

[Nikiforov K.K. et al. A brief soil-geographical sketch of the Ust-Maisky district of the Yakutsk region. Sankt-Peterburg: A.E. Collins Printing House, 1913; 273 p. (In Russ.)]

26. Антропогенная динамика природной среды районов городских поселений Центральной Якутии (на примере г. Якутска) (1985–1989 гг.): отчет НИИР (заключит.). ЯНЦ СО АН СССР; рук. Кириллин А.Д.; исполн. Саввинов Д.Д. Якутск, 1989; 151 с. № ГР 01.86.0104387. Инв. № 02.9.10013384.

[Anthropogenic dynamics of the natural environment of the areas of urban settlements in Central Yakutia (on the example of Yakutsk) (1985–1989): research report (concluding). Yakut Scientific Center SB AS USSR; supervisor A.D. Kirillin; executive D.D. Savvinov Yakutsk, 1989; 151 p. No. GR 01.86.0104387. Inv. No. 02.9.10013384. (In Russ.)]

27. Макаров В.Н., Седельникова А.Л. Экогеохимия городских озер Якутска. Якутск: ИМЗ, 2016; 207 с.

[Makarov V.N., Sedelnikova A.L. Ecogeochemistry of urban lakes in Yakutsk. Yakutsk: Permafrost Institute, 2016; 207 p. (In Russ.)]

28. Эколого-лимнологическая паспортизация озер в черте г. Якутска (1990–1995 гг.): отчет НИИР (заключит.). ЯГУ; рук. Жирков И.И. Якутск, 1995; 131 с. № ГР 01.90.004831.

[Ecological and limnological certification of the lakes within Yakutsk (1990–1995): research report (concluding). Yakut State University; supervisor I.I. Zhirkov. Yakutsk, 1995; 131 p. No. GR 01.90.004831. (In Russ.)]

29. Габышев В.А., Габышева О.И. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020;25(4):81–91. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6>.

[Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. The study of heavy metals influence on the development of phytoplankton in the lakes of Yakutsk and its environs. Natural resources of the Arctic and Subarctic. 2020; 25(4):81–91. (In Russ.)].

30. Кириллов А.Ф., Салова Т.А. Гидробиология. Прикладные экологические проблемы г. Якутска: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука; 2017:130–145.

[Kirillov A.F., Salova T.A. Hydrobiology. Applied environmental problems of Yakutsk: a collection of scientific papers. Novosibirsk: Nauka; 2017:130–145. (In Russ.)].

31. Анисимова Н.П. Техногенные гидрохимические изменения в долине Лены на участке Туймаада. Эколого-геохимические проблемы криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН; 1996:35–44.

[Anisimova N.P. Technogenic hydrochemical changes in the Lena River Valley at the Tuymaada site. Ecological and geochemical problems of permafrost. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS; 1996:35–44. (In Russ.)].

32. Макаров В.Н. Редкоземельные элементы в атмосфере Якутска. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022;(4):54–56. <https://doi.org/10.31857/S0869780922030055>

[Makarov V.N. Rare earth elements in the atmosphere of Yakutsk. Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 2022;(4):54–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869780922030055>]

33. Седельникова А.Л., Макаров В.Н. Стронций в воде городских озер. Геология и минерально-

сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Якутск, 29 марта – 1 апреля 2022 года. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2022:474–478. https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_98

[Sedelnikova A.L., Makarov V.N. Strontium in the water of urban lakes. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia*. Yakutsk, March 29 – April 1, 2022. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2022:474–478. (In Russ.) https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_98]

34. Ксенофонтова М.И. и др. Характеристика химического состава вод и донных отложений крупных водоемов г. Якутска. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2013;(4):493–500.

[Ksenofontova M.I. et al. Characteristics of the chemical composition of waters and bottom sediments of the large reservoirs in Yakutsk. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2013;(4):493–500. (In Russ.)].

35. Реки и озера Якутии. Отв. ред. В.И. Агеев. Якутск: Бичик; 2007. 136 с.

[Rivers and lakes of Yakutia. Ed. V.I. Ageev. Yakutsk: Bichik; 2007. 136 p. (In Russ.)].

36. Пестрякова Л.А. Процесс эвтрофирования озер долины Туймаада (Центральная Якутия). *Наука и образование*. 2010;(4):82–87.

[Pestryakova L.A. The process of eutrophication of the lakes in the Tuymaada valley (Central Yakutia). *Nauka i obrazovaniye*. 2010;(4):82–87. (In Russ.)].

37. Romic M., Romic D. Heavy metals distribution in the agricultural topsoils in urban area. *Environmental Geology*. 2002;(43):795–805.

38. Acosta J.A. et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation. *Journal of Geochemical Exploration*. 2011;109(1-3):8–17.

39. Гидрохимический состав озер г. Якутска за период 1985–2021 гг. 2022.

[Hydrochemical composition of lakes in Yakutsk for the period 1985–2021. 2022. (In Russ.)]

40. Сидоренко Н.И. Принципы и их значение для построения теории. *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. 2016; 2(86):157–166. <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2016-2-157-166>.

[Sidorenko N.I. Principles and their significance for the construction of a theory. *Bulletin of the Russian University of Economics G.V. Plekhanov*. 2016; 2(86):157–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.21686/2413-2829-2016-2-157-166>]

41. Сухачева Е.Ю. и др. Принципы и методы создания цифровой среднемасштабной почвенной карты Ленинградской области. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2019; 64(1):100–113. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.106>

[Sukhacheva E.Yu. et al. Principles and methods of creating a digital medium-scale soil map of the Leningrad region. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2019; 64(1):100–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.106>]

42. Чистяков Г.Е. *Водные ресурсы рек Якутии*. М.: Наука; 1964. 256 с.

[Chistyakov G.E. *Water resources of the rivers in Yakutia*. M.: Nauka; 1964. 256 p. (In Russ.)]

43. Mackin J. W. Robust analysis of linear models. *Statistical Science*. 2004. 9(4):562–570. <https://doi.org/10.1214/088342304000000549>. JSTOR4144426

44. Strutz T. *Data Fitting and Uncertainty A practical introduction to weighted least Squares and Beyond*. 2. Lipsia: Springer; 2016.

45. Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы прогнозирования*. М.: Статистика, 1979; 254 с.

[Lukashin Yu.P. *Adaptive forecasting methods*. M.: Statistics, 1979; 254 p. (In Russ.)]

46. Даувальтер В.А. и др. Особенности химического состава воды городских озер Мурманска. *Вестник СПбГУ. Науки о Земле*. 2020;66(2):252–266. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>.

[Dauwalter V.A. et al. Peculiarities of the chemical composition of water in urban lakes of Murmansk. *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2020;66(2):252–266. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.204>]

47. Бакаев В.А., Савченко Н.В. Зональные особенности гидрохимического состояния малых озер Новосибирской области. *Мир науки, культуры, образования*. 2013;5(42):430–435.

[Bakaev V.A., Savchenko N.V. Novosibirsk region small lakes' zonal features of hydrochemical condition. *Mir Nauki, Kul'tury, Obrazovaniya*. 2013;5(42):430–435. (In Russ.)]

48. Кашина В.А. Осипова С.В. Параметры солевого состава ряда малых водоемов юга Амурской области. *Современные проблемы науки и образования*. 2014; 2:58–64.

[Kashina V.A. Osipova S.V. Parameters of the salt composition in a number of small reservoirs in the south of the Amur region. *Modern problems of science and education*. 2014;2:58–64. (In Russ.)].

Об авторах

¹ЛЕГОСТАЕВА Яна Борисовна, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, e-mail: ylego@mail.ru

²РУФОВА Алена Афанасьевна, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2216-3866>, e-mail: alenaruf@inbox.ru

Аффилиация

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Российская Федерация

²Академия наук РС (Я), 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 33, Российская Федерация

About the authors

¹LEGOSTAEVA, Yana Borisovna, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, e-mail: ylego@mail.ru

²RUFOVA, Alena Afanasievna, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2216-3866>, e-mail: alenaruf@inbox.ru

Affiliation

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), 33 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 06.09.2022

Поступила после рецензирования / Revised 25.10.2022

Принята к публикации / Accepted 10.11.2022

Новые находки волка (*Canis lupus* L. 1758) в позднелайстоценовых отложениях Колымо-Индигирской низменности

А. И. Климовский✉, С. Д. Колесов

Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация
✉ aisen87@mail.ru

Аннотация

Проведены сравнительные исследования морфометрических параметров ископаемых и современных серых волков (*Canis Lupus* L., 1758) с северо-востока Якутии. Ископаемые остатки волка собраны в Абыйском и Колымском районах Республики Саха (Якутия). Возраст ископаемых находок датируется поздним неоплейстоценом. Проведено сравнение пропорций черепа и состояния зубной системы древних и современных волков. Отмечается, что ископаемый волк был в среднем немного меньших размеров, чем современный арктический тундровый волк, в то время как зубная система ископаемых волков имела более мощные премолярные ряды, отвечающие за разрезание мяса и разгрызание костей. Высота затылочных костей у неоплейстоценовых волков также свидетельствует о более мощном развитии шейной и жевательной мускулатуры. Эти признаки могут свидетельствовать о том, что волки в неоплейстоценовых экосистемах могли занимать преимущественно роль падальщиков.

Ключевые слова: волк, неоплейстоцен, Колымо-Индигирская низменность, морфометрические параметры, череп, зубная система, премолярные ряды, экосистемы позднего плейстоцена

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Академии наук РС (Я) по проекту «Палеоэкологические исследования плейстоцена и голоцена Якутии».

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.б.н. Г.Г. Боескову и д.б.н. А.В. Протопопову за ценные советы при проведении исследований

Для цитирования: Климовский А.И., Колесов С.Д. Новые находки волка (*Canis lupus* L. 1758) в позднелайстоценовых отложениях Колымо-Индигирской низменности. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):592–599. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-592-599>

New findings of a wolf (*Canis lupus* L. 1758) in the Late Pleistocene sediments of the Kolyma-Indigirka Lowland

A. I. Klimovsky✉, S. D. Kolesov

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

Abstract

The article presents a comparative study of morphometric parameters of fossil and modern grey wolves (*Canis lupus* L. 1758) from northeastern Yakutia. Wolf fossils were found in Abyysky and Kolymsky regions of Yakutia. The findings have been dated to the late Neopleistocene. We compared the proportions of the skull and the condition of the dental system of the wolf. Fossil wolf was on average slightly smaller than modern arctic tundra wolf, though their dental system has more powerful premolar rows responsible for cutting meat and breaking bones. The height of occipital bones of the wolves in Neopleistocene also indicates a more powerful development of their neck and chewing muscles. These features may indicate a predominantly scavenger role of the wolves in Neopleistocene ecosystems.

Keywords: wolf, Neopleistocene, Kolyma-Indigirka Lowland, morphometric parameters, skull, dental system, premolar series, ecosystems of the late Pleistocene

Funding. This study was carried out within the framework of the State Assignment to the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) on the project “Paleoecologic studies of the Pleistocene and Holocene of Yakutia”.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to Dr. Gennady G. Boeskorov, Dr. Albert V. Protopopov for valuable recommendations.

For citation: Klimovsky A.I., Kolesov S.D. New findings of a wolf (*Canis lupus* L. 1758) in the Late Pleistocene sediments of the Kolyma-Indigirka Lowland. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):592–599. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-592-599>

Введение

Canis lupus появляется в геологической летописи Европы в середине среднего плейстоцена. Его раннего представителя видят в небольшом волке, описанном по коллекции из грота Люнель-Вьель во Франции как подвид *C. lupus lunellensis* Bonifay [1]. Другие авторы придают этому подвиду статус самостоятельного вида *C. lunellensis*, а первой европейской регистрацией *C. lupus* считают находку из грота Кондель Араго во Франции [2].

Со второй половины среднего плейстоцена крупный волк был уже широко распространен в Евразии. Он отмечен в западной Европе, Молдавии, в Северном Казахстане и на северо-востоке Сибири (р. Чукочь). В среднем плейстоцене (поздний ирвингтон) он расселяется в Северную Америку после вымирания там очень крупного *C. armbrusteri* [3]. В позднем неоплейстоцене ареал волка распространился от Британских берегов на западе и до Чукотки и Японии на востоке [4].

На территории Якутии позднеплейстоценовые остатки волка находили на многих местонахождениях, таких как: Мамонтова гора, низовья р. Алдан (Русанов, 1968) [5], Дюктайская пещера (Вангенгейм, 1977) [6], стоянка Ихиме (Мочанов, 1977) [7], Намский обрыв на р. Вилуй (Верхневилуйское) (Лазарев, 1980) [8], р. Берелях (Верещагин, 1977) [9], Хромская губы (Хапташинский Яр), р. Алазея (Лазарев, Томская, 1987) [10], Дуванный Яр, р. Колыма (Шер, 1971, Боескоров, 2004) [11, 12], Новосибирские острова (Черский, 1891, Вангенгейм, 1977) [13].

Эти находки свидетельствуют о том, что на территории Якутии он был, по всей видимости, одним из наиболее многочисленных хищников мамонтового фаунистического комплекса. Наши находки с бассейнов рек Индигирка – р. Огороха, р. Уяндина и р. Колыма – р. Энгэ, р. Муостуур-Юрях добавляют новые точки в реконструируемый ареал волка в позднем неоплейстоцене Якутии (рис. 1).

Материалы и методика

Во время полевых работ в едомных горизонтах наиболее часто скелетные останки волков (*Canis lupus* L.) обнаруживаются рядом с другими типичными представителями мамонтовой фауны. Поиски и сбор костей проводились на средних течениях рек Индигирка и Колыма в об-

рывистых склонах приточных рек Огороха (68°13.892 с. ш., 146°51.188 в. д), Уяндина (68°33.759 с. ш., 144°45.980 в. д.) в Абыйском районе и рек Енге и Муостуур-Юрях (68°26'168" с.ш., 157°26'134" в.д) в Колымском районе (рис. 1). Местности таежные, в поймах рек обилие ивняка и карликовых берез, в лесу преобладают лиственницы с редкими березовыми перелесками.

Осевые черепа волков отмечены полевыми номерами ОГ-1-15 (р. Огороха), ОГ-2-15 (р. Огороха), 7751 (р. Уяндина), СК-17-7 (р. Энгэ), СК-17 (р. Муостуур-Юрях). Промеры черепов отобраны в соответствии с рекомендациями Angela von den Driesch [14]. Морфометрические данные ископаемых волков сравнивались с современными тундровыми волками, занимающими те же ареалы обитания, из работ Г.Г. Боескорова и



Рис. 1. Точки нахождения найденных волков (*Canis lupus*) в бассейнах рек Индигирка и Колыма (красной стрелкой отмечена точка нахождения в Абыйском районе, черной – в Среднеколымском районе).

Fig. 1. The locations of found wolves (*Canis Lupus*) in the basins of the Indigirka and Kolyma rivers (red arrow marks the location in the Abyysky district, the black arrow marks the location in the Srednekolymsky district).

Г.Ф. Барышникова «Позднечетвертичные хищные млекопитающие Якутии» (*C. lupus albus* Kerr 1798) [15], которые представлены в таблице.

Все исследуемые черепа были датированы радиоуглеродным методом в Швейцарской высшей технической школе Цюриха (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich – ETHZ).

Результаты и обсуждение

Найденные черепа имеют цвет от желтоватосерого до темно-коричневого. Зубы сохранились не у всех черепов, сохранившиеся имеют гладкую эмаль. Также стоит отметить, что у изучаемых черепов не наблюдаются скученность и разделение зубов. В данной работе мы ограничились характеристикой черепных остатков волков как наиболее показательных для сравнительного морфологического анализа.

Череп ОГ-1-15 (рис. 2, А, Г) в отличной сохранности, только правый слуховой пузырь обломан. Радиоуглеродный возраст более > 44487 лет (ETH-122784). Череп принадлежал взрослой самке (см. таблицу). В зубном ряду отсутствуют клыки, имеются правые резцы i2,3, левый премоляр P1, правый премоляр P1 обломан и сточен при жизни, правый M2 не сохранился. Зубы сто-

мых черепов не наблюдаются скученность и разделение зубов. В данной работе мы ограничились характеристикой черепных остатков волков как наиболее показательных для сравнительного морфологического анализа.

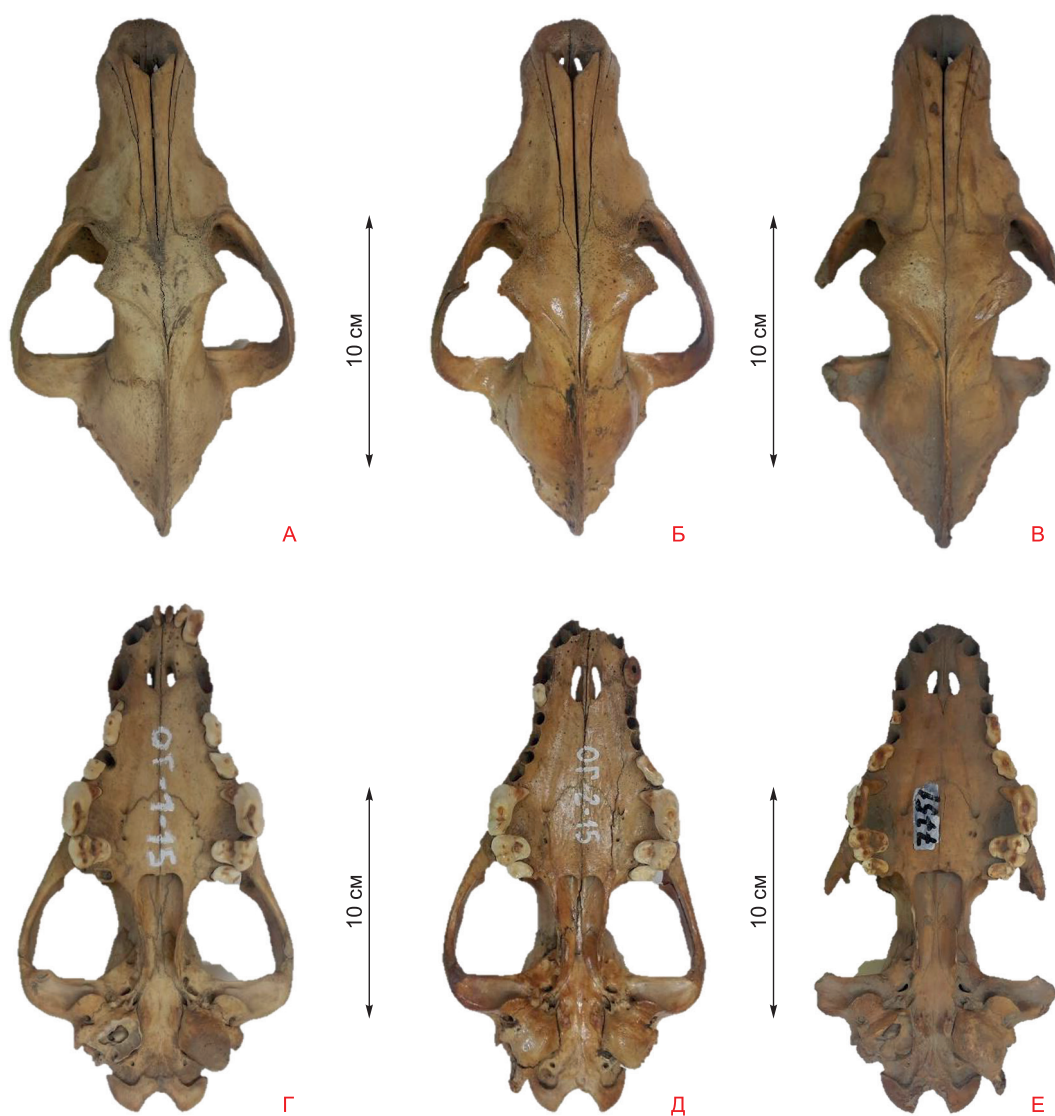


Рис. 2. Осевые черепа позднеплейстоценового волка (*Canis lupus*) вид сверху (А–В), вид снизу (Г–Е) из Абыйского района; А, Г – ОГ-1-15, р. Огороха обнажение 1, Б, Д – ОГ-2-15, р. Огороха обнажение 2, В, Е – 7751, р. Уяндина.

Fig. 2. Axial skulls of the Late Pleistocene wolf (*Canis lupus*) from above (А–В) bottom view (Г–Е) from the Abyi region; А, Г: ОГ-1-15 river Ogorokha nudity 1, Б, Д: ОГ-2-15 river Ogorokha nudity 2, В, Е: 7751 river Uyandina.

Сравнительная таблица размеров черепов *Canis lupus*

Comparative size chart of *Canis lupus* skulls

№ Number	*Поздний неоплейстоцен Late Neopleistocene					**Современные Modern			
	Абыйский район Abyysky district			Колымский р-н Kolymsky district		C.lupus albus, тундровая зона C.lupus albus tundra zone			
						Самцы Males		Самки Females	
	ОГ-1-15	ОГ-2-15	7751	СК-7-17	СК-17	$\frac{limit}{X \pm m}$	σ	$\frac{limit}{X \pm m}$	σ
1	242,7	248,3	261,8	215,8	252,7	$\frac{239 - 272}{257,41 \pm 2,25}$	5,80	$\frac{228 - 266}{245,92 \pm 4,31}$	14,31
2	233,4	222	244,9	198,2	233,1	$\frac{225 - 255}{242,94 \pm 2,28}$	6,09	$\frac{219 - 253}{232,78 \pm 3,98}$	13,22
3	213	220,1	231,1	186,2	218,7	$\frac{215 - 240,4}{228,26 \pm 1,85}$	7,45	$\frac{208 - 232}{219,83 \pm 2,84}$	9,43
4	137,7	138,6	–	115,5	141,5	$\frac{126 - 151}{141,29 \pm 1,65}$	4,43	$\frac{122 - 149,5}{136,96 \pm 2,49}$	4,66
5	83,9	84,9	90,6	74,6	88,9	$\frac{84 - 103}{95,47 \pm 1,38}$	2,89	$\frac{84,5 - 98}{91,50 \pm 1,40}$	5,29
6	117,7	121,7	123,2	104,6	123,5	$\frac{112 - 128}{121,24 \pm 1,24}$	1,21	$\frac{113 - 129}{118,96 \pm 1,59}$	3,00
7	49,9	50,3	48,9	44	48,7	$\frac{41 - 48}{46,07 \pm 0,56}$	3,18	$\frac{40,3 - 49,2}{44,78 \pm 0,90}$	4,40
8	42,1	46,1	51,2	36,9	44,8	$\frac{41,6 - 52,4}{45,77 \pm 0,78}$	1,25	$\frac{40,4 - 51,7}{45,54 \pm 1,32}$	2,51
9	39,4	41,2	45,2	34,7	38,1	$\frac{39,7 - 47}{43,81 \pm 0,52}$	1,48	$\frac{39 - 47,6}{43,15 \pm 0,76}$	1,99
10	65,2	67,7	66,8	61,6	68,4	$\frac{63,4 - 71}{67,38 \pm 0,48}$	1,67	$\frac{63 - 68,3}{66,48 \pm 0,60}$	6,70
11	–	105,2	–	92,1	–	$\frac{98,2 - 116}{109,55 \pm 1,10}$	1,75	$\frac{96,8 - 118}{105,02 \pm 2,02}$	6,61
12	102,4	104,1	108,4	91,1	105,4	$\frac{96 - 112}{107,21 \pm 1,00}$	1,13	$\frac{95 - 115,5}{102,87 \pm 1,99}$	2,81
13	66,5	70,7	72,9	61,5	71,5	$\frac{60,3 - 72,4}{68,27 \pm 0,96}$	1,87	$\frac{59,5 - 69,4}{64,83 \pm 0,85}$	3,19
14	84,9	87,5	98,7	76,5	88,2	$\frac{80,3 - 93}{89,08 \pm 0,93}$	2,75	$\frac{78,5 - 88,8}{83,81 \pm 0,96}$	6,03
15	54,3	55,5	58,7	56,7	56,3	$\frac{55 - 67,2}{59,64 \pm 0,86}$	1,39	$\frac{54,2 - 63,4}{60,73 \pm 0,77}$	2,42
16	40,6	37,4	44,1	37,3	42,7	$\frac{36 - 44}{39,55 \pm 0,56}$	1,57	$\frac{35,5 - 45}{41,39 \pm 0,73}$	1,45

* Академия наук Республики Саха (Якутия), Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia).

** Боесков Г.Г., Барышников Г.Ф., 2013 [14], Boeskorov G.G., Baryshnikov G.F. [14].

Примечание. 1 – общая длина, 2 – кондильобазальная длина, 3 – основная длина, 4 – скуловая ширина, 5 – длина носовых костей, 6 – длина твёрдого неба, 7 – ширина в клыках, 8 – межглазничная ширина, 9 – заглазничная ширина, 10 – ширина мозговой капсулы, 11 – длина C1-M2 коронарная, 12 – длина C1-M2 альвеоляр-

ная, 13 – длина P1-P4 альвеолярная, 14 – длина P1-M2 альвеолярная, 15 – высота затылка от нижнего края затылочного отверстия, 16 – высота затылка от верхнего края затылочного отверстия.

Note. 1 – overall length, 2 – condylobasal length, 3 – main length, 4 – zygomatic width, 5 – nasal bone length, 6 – hard palate length, 7 – canine width, 8 – interocular width, 9 – postocular width, 10 – brain capsule width, 11 – C1-M2 coronary length, 12 – C1-M2 alveolar length, 13 – P1-P4 alveolar length, 14 – P1-M2 alveolar length, 15 – the height of the nape from the lower edge of the occipital foramen, 16 – the height of the nape from the upper edge of the occipital foramen.



Рис. 3. Осевые черепа позднеплейстоценового волка (*Canis lupus*) вид сверху (А, Б) вид снизу (В, Г) из Колымского района. А, В: СК-17, речка Муостуурурэх, Б, Г: СК-17-7, ручей Энгэ.

Fig. 3. Axial skulls of the Late Pleistocene wolf (*Canis lupus*) from above (A, B) bottom view (B, Г) from the Kolyma region.; A, B: SK-17, Muostuur river, Б, Г: SK-17-7, Eng creek.

чены средне, сильнее всего повреждены Р4. Данный череп по многим параметрам близок к минимальным значениям черепа самки современного тундрового волка. Но по ширине нёба на уровне клыков (49,9 мм) превосходит даже современных крупных самцов (48 мм), в скуловой ширине, ширине мозговой капсулы и высоте черепа превосходит средние значения последних.

Череп ОГ-2-15 (рис. 2, Б, Д) имеет отличную сохранность, немного обломаны альвеолы резцов. В зубном ряду левый клык обломан при жизни и стерт до основания. В премолярных рядах сохранились правый Р1, левый Р3 и оба Р4. Молярные ряды сохранились все. Радиоуглеродный возраст 36500 ± 2000 л.н. (ETH-122763) Зубы стерты средне, череп принадлежал молодому самцу. Ширина в клыках (50,3 мм) является максимальной в данной выборке, у современных самцов наибольший показатель 49,2 мм (см. таблицу).

Крупный и широкий череп 7751 (рис. 2, В, Е) имеет сохранность ниже среднего, отсутствуют скуловые дуги, в зубной системе отсутствуют резцы, клыки и первые премоляры Р1. Правый Р2 обломан после смерти, так же как и правый Р4. Зубы радикально сточены, сильнее всего премолярные ряды. Радиоуглеродный возраст 40800 ± 2000 л.н. (ETH-122761). Череп принадлежал взрослому самцу. По значениям основной длины, кондильобазальной и носовых костей выделяется среди сравниваемых нами ископаемых черепов и близок к максимальным показателям современных самцов. Длина зубного ряда с Р1-M2 составляет 98,7 мм, что является максимальным значением в данной выборке. У сравниваемых современных самцов длина зубного ряда с Р1-M2 составляет 80,3-93 мм (см. таблицу).

Череп СК-17 (рис. 3, А, В) в отличной сохранности, отличается от всех большей минерализацией. В зубной системе сохранились основание резцов I3-3, клыки отсутствуют, левые Р1 и Р3 не сохранились. Правые Р4 и М1 сильно повре-

ждены и сточены при жизни. Радиоуглеродный возраст 41300 ± 2200 л.н. (ETH-122754) По параметрам череп принадлежал зрелому самцу. Отмечаем закономерность, что при относительно небольших длинах описанный череп отличается большой шириной в клыках 48,7 мм, у современного крупного тундрового волка достигает 48 мм (см. таблицу).

Череп СК-7-17 (рис. 3, Б, Г) имеет отличную сохранность без видимых повреждений, в зубной системе сохранились правый клык (C1), в премолярном ряду P3, P4, моляры M1, M2. Зубы не стерты, черепные швы и носовые кости не облитерировались. Судя по небольшой величине, относительно слабо развитому хищному гребню и нестертости зубной системы, можно сделать вывод, что череп принадлежал молодой самке. Радиоуглеродная датировка выявила возраст 36500 ± 2000 л.н. (ETH-122773). Большинство значений промеров длины и ширины черепа не близки даже к минимальным значениям параметров современных самок. Но некоторые пропорции черепа у ископаемого волка выделяются: например, в ширине клыков и в высоте затылка (см. таблицу). В зубной системе, несмотря на небольшую длину черепа, премолярный ряд составляет 61,5 мм, для сравнения: у современных взрослых самок он колеблется от 59,5 до 69,4 мм (см. таблицу).

Заключение

Считается, что в позднем неоплейстоцене волки не достигали максимальных для вида размеров и примерно соответствовали минимальным и средним размерам современных тундровых волков [15]. Но по нашим наблюдениям, некоторые ключевые морфометрические показатели у ископаемых волков не уступают, а иногда и значительно выигрывают у современных волков. Отмеченная в зубном ряду большая длина P1–P4 в альвеолярной части черепа дает нам основание предполагать лучшее развитие зубочелюстного аппарата у древних волков по сравнению с современными. Как писали некоторые авторы, размеры хищных зубов и их расположение в зубном ряду зависят от рода употребляемой пищи [16]. У всех хищных величина клыка указывает на то, с какой силой удерживается добыча [17], а в данной работе наблюдается то, что у ископаемых волков более развиты премолярные ряды, отвечающие за разрезание мяса и разгрызание костей. Это дает основание предположить, что позднелайстоценовые волки меньше вели ак-

тивную охоту на крупных животных и в их рационе преобладали мелкие млекопитающие. При этом следует отметить, что у почти всех обследованных черепов наблюдается сильное стирание (уплощение) коронок конуса предкоренных зубов. Также имеются сильные сношенности молярных и премолярных рядов (см. рис. 2, 3) и радикально повреждены (обломаны) и стерты до корня зубы P4 (см. рис. 2, В, 3, А). У современных волков в ходе съедания добычи сильному стиранию и повреждениям зубной системы способствуют разгрызаемые кости и сопутствующий грунт (песок, супесь). Исследования показывают, что аналогичный процесс у неоплейстоценовых волков происходил более интенсивно. Данный феномен говорит о том, что позднелайстоценовый волк грыз больше костей крупных животных, например, таких как мамонты и бизоны. Об этом же могут свидетельствовать особенности пропорции черепов, выражающиеся в большей ширине неба на уровне клыков и высоте затылочных костей, указывающие на более развитые шейные и жевательные мускулатуры. Следует учесть то, что эти гигантские животные вряд ли были жертвами охоты на них волков, возможно, за исключением бизонов. Все описываемые находки относятся к каргинскому межледниковью, когда на территории происходило потепление и расширение лесной растительности. Казалось бы, при благоприятных для существования вида условиях и изобилии добычи, наоборот, должны были сформироваться крупные животные, ведь у современных волков рацион гораздо скуднее. Пока трудно объяснить причины небольших размеров ископаемых волков. Возможно, одна из причин в том, что в случае ведения активной охоты на гигантских травоядных волки оказывались в одной конкурентной нише с такими крупными хищниками, как пещерные львы *Panthera spelaea*. И позднелайстоценовые волки, находясь под прессом более крупного и специализированного хищника, не достигали максимальных для своего вида размеров и вынужденно могли занимать нишу падальщиков.

Список литературы / References

1. Brugal J.-Ph., Boudadi-Maligne M. Quaternary small to large canids in Europe: Taxonomic status and biochronological contribution. *Quaternary International*. 2011;243(1):171–182. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.01.046>

2. Palombo M.R., Valli A.M.F., Remarks on the bio-chronology of mammalian faunal complexes from the Pliocene to the Middle Pleistocene in France. *Geologica Romana*. 2004;37(2003-2004):145–163.
3. Kurten B., Anderson E.A. *Pleistocene mammals of North America*. New York: Columbia University Press; 1980. 442 p.
4. Верещагин Н.К. *Происхождение и история волка*. М.: Наука; 1985:1120.
[Vereshchagin N.K. *The origin and history of the wolf*. Moscow: Nauka; 1985:1120. (In Russ.)]
5. Русанов Б.С. *Биостратиграфия кайнозойских отложений Южной Якутии*; М.: Наука. 1968:459.
[Rusanov B. S. *Biostratigraphy of the Cenozoic deposits of Southern Yakutia*. M.: Nauka; 1968:459. (In Russ.)]
6. Вангенгейм Э.А. *Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогена Северной Азии (по млекопитающим)*. М.: Наука; 1977:172.
[Wangenheim E.A. *Paleontological substantiation of the anthropogenic stratigraphy of Northern Asia (mammals)*. M.: Nauka; 1977:172. (In Russ.)]
7. Мочанов Ю.А. *Древнейшие этапы заселения человеком Северо-Восточной Азии*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд.; 1977:264.
[Mochanov Yu.A. *The oldest stages of human settlement in Northeast Asia*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch; 1977:264. (In Russ.)]
8. Лазарев П.А. *Кадастр местонахождений фауны млекопитающих позднего кайнозоя Якутии*. Новосибирск: Наука, Сиб. отд.; 2002:54.
[Lazarev P. A. *Inventory of the locations of the mammalian fauna of the Late Cenozoic of Yakutia*. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch; 2002:54. (In Russ.)]
9. Верещагин Н.К. *Берелехское «кладбище» мамонтов. Мамонтовая фауна Русской равнины и Восточной Сибири*. Л.: Изд-во ЗИН АН СССР; 1977.
[Vereshchagin N.K. *Berelekhskoe «cemetery» of mammoths. Mammoth fauna of the Russian plain and Eastern Siberia*. L.: Publisher: Zoological institute, the USSR Academy of Sciences; 1977. (In Russ.)]
10. Лазарев П.А., Томская А.И. *Млекопитающие и биостратиграфия позднего кайнозоя Северной Якутии*. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР; 1987:169.
[Lazarev P.A., Tomskaya A.I. *Mammals and biostratigraphy of the Late Cenozoic of Northern Yakutia*. Yakutsk: Publishing House of the Yakut Subdivision, Siberian Branch, the USSR Academy of Sciences; 1987:169. (In Russ.)]
11. Шер А.В. *Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена Крайнего Северо-Востока СССР и Северной Америки*. М.: Наука; 1971:310.
[Sher A.V. *Mammals and stratigraphy of the Pleistocene of the Extreme North-East of the USSR and North America*. M: Nauka; 1971:310. (In Russ.)]
12. Боесков Г.Г. Морфологическая характеристика современного и ископаемого волка Якутии. *Сибирская зоол. конф. Тез. докл.* Новосибирск; 2004:109.
[Boeskorov G.G. Morphological characteristics of the modern and fossil wolf of Yakutia. *Siberian Zoological Conference. Abstracts*. Novosibirsk; 2004:109. (In Russ.)]
13. Черский И.Д. Описание коллекции послетретичных млекопитающих животных, собранных Новосибирской экспедицией 1885–1886 гг. *Зап. АН*. 1891; 65:VI+706 с.
[Chersky I.D., Description of the post-tertiary mammals collection assembled by Novosibirsk expedition in 1885-1886. *Зап. АН*. 1891; 65:VI+706 (In Russ.)]
14. von den Driesch A. *A Guide to the Measurement of an Animal Bones from Archaeologic Sites*. Cambridge: Harvard university; 1976:136.
15. Боесков Г.Г., Барышников Г.Ф. *Позднечетвертичные хищные млекопитающие Якутии*. М.: Наука; 2013:199.
[Boeskorov G.G., Baryshnikov G.F. *Late Quaternary carnivorous mammals of Yakutia*. Moscow Nauka; 2013: 199. (In Russ.)]
16. Иванов Н.С. Морфометрические показатели зубной системы волка. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2009;1(21): 231–233.
[Ivanov N.S. Morphometric parameters of the wolf dental system. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2009;1(21):231-233. (In Russ.)]
17. Юдин В.Г. Зубная система волка. *Зоол. журнал*. 1989;68(8):115–123.
[Yudin V.G. The wolf's dental system. *Zool. zhurnal*. 1989;68(8):115–123. (In Russ.)]

Об авторах

КЛИМОВСКИЙ Айсен Иванович, научный сотрудник, Author ID: 791714, <https://orcid.org/0000-0002-2258-9173>, e-mail: aisen87@mail.ru

КОЛЕСОВ Станислав Дмитриевич, научный сотрудник, Author ID: 791719, <https://orcid.org/0000-0003-4632-8813>, e-mail: kolesov.stanislav@mail.ru

Аффилиация

Академия наук Республики Саха (Якутия), отдел изучения мамонтовой фауны, 677000, г. Якутск, пр. Ленина, 33, Российская Федерация

About the authors

KLIMOVSKY, Aisen Ivanovich, Researcher, Author ID: 791714, <https://orcid.org/0000-0002-2258-9173>, e-mail: aisen87@mail.ru

KOLESOV, Stanislav Dmitrievich, Researcher, Author ID: 791719, <https://orcid.org/0000-0003-4632-8813>, e-mail: kolesov.stanislav@mail.ru

Affiliation

Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mammoth Fauna Research Department, 33 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 17.05.2022

Поступила после рецензирования / Revised 28.09.2022

Принята к публикации / Accepted 11.10.2022

Микроэлементный статус жителей Вилюйского региона

П. Г. Петрова✉, Н. В. Борисова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация
✉mira_44@mail.ru

Аннотация

Вся территория Республики Саха (Якутия) находится в зоне экстремальных климатических факторов, климат суровый и континентальный. На Севере процессы самовосстановления и самоочищения природных ландшафтов протекают очень медленно. В водных и наземных экосистемах снижены скорости биологических и химических преобразований, что приводит к значительному накоплению в них химических компонентов антропогенного происхождения [11]. Неблагоприятные воздействия среды обитания до конца 20 в. были мало изучены. В научных трудах В.В. Ковальского, Н.А. Агаджаняна, А.В. Скального и других авторов имеются многочисленные подтверждения взаимосвязи между химической гетерогенностью биосферы и возникновением в организме различных изменений и даже болезней. Биогеохимические факторы (микроэлементы почвы, воды, воздуха, продукты биотического и абиотического происхождения, промышленные и сельскохозяйственные отходы) оказывают существенное влияние на жизнедеятельность и функциональные резервы организма человека. По трактовке ВОЗ здоровье населения на 50 % определяется образом жизни, на 20 – наследственностью, на 20 – неблагоприятным воздействием среды обитания и на 10 % – качеством медико-санитарной помощи. Отсюда возник наш научный интерес к исследованиям микроэлементного статуса в биосредах (волосы, кровь) жителей Республики Саха (Якутия), проживающих в бассейнах рек Вилюй и Марха.

Ключевые слова: микроэлементы, дисбаланс, здоровье, человек, окружающая среда

Финансирование. Работа выполнена в рамках НИР «Научно-обоснованная оценка состояния здоровья населения, проживающего в бассейне р. Вилюй и р. Марха, с разработкой комплекса медико-социальных мероприятий по его оздоровлению».

Для цитирования: Петрова П.Г., Борисова Н.В. Микроэлементный статус жителей Вилюйского региона. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):600–609. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-600-609>

The microelement status of residents of the Vilyui region

P. G. Petrova✉, N. V. Borisova

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
✉mira_44@mail.ru

Abstract

The entire territory of the Republic of Sakha (Yakutia) is located in the zone of extreme climate. Harsh and continental climatic factors of the North slow the processes of self-healing and self-purification of the natural landscapes. The decrease in the rates of biological and chemical transformations in the aquatic and terrestrial ecosystems leads to a significant accumulation of chemical components of anthropogenic origin in them. The adverse effects of the habitat were little studied until the end of the 20th century. The relationships between chemical heterogeneity of the biosphere and the occurrence of various changes in the human body and even diseases have been found. Biogeochemical factors (microelements of soil, water, air, products of biotic and abiotic origin, industrial and agricultural waste) have a significant impact on the normal functioning and functional reserves of the human body. Recent estimates of the WHO attributes 50 % of health outcomes of the population to behaviour, 20 % to genetics, 20 % to social and physical environment, 10 % to the quality of medical care. In this regard, the aim of the work was to study the microelement status in the biological media (hair, blood) of residents of the Republic of Sakha (Yakutia) living in the basins of the Vilyu and Markha rivers.

Keywords: microelements, imbalance, health, human, environment

Funding. The study was carried out within the framework of the Research Project “Scientifically based assessment of the health status of the population living in the basin of the Vilyu River and the Markha river, with the development of a complex of medical and social measures for its improvement”.

For citation: Petrova P.G., Borisova N.V. The microelement status of residents of the Vilyui region. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):600–609. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-600-609>

Введение

Геологическая разведка и разработка месторождений полезных ископаемых нередко сопровождаются техногенным загрязнением окружающей среды и приводят к серьезным негативным последствиям. В результате водного и воздушного переноса поллютантов могут загрязняться территории, находящиеся на значительном удалении от источника загрязнения [1, 3, 7, 11]. Экстремальные условия Севера и неблагоприятная экологическая ситуация на фоне хронических стрессовых воздействий и другие сопутствующие факторы могут привести к соматическим заболеваниям [1, 2, 9].

Проблемы обеспечения здоровья и качества жизни населения, проживающего на северных территориях, определяются целым рядом факторов, в число которых входят гипокомфортные условия проживания, неблагоприятная экологическая обстановка и неполноценное питание. Одним из отражений воздействия этого комплекса факторов является нарушение элементного статуса организма. Жизненно необходимые микроэлементы играют важнейшую роль в функционировании организма, в связи с чем их дефицит сопровождается снижением адаптивных способностей организма и развитием заболеваний даже в комфортных климатогеографических условиях, а в неблагоприятных условиях среды – еще более выраженными проявлениями [13, 14, 17].

Многие проблемы, связанные со здоровьем популяции, имеют глубокие социально-экономические корни, включая региональные аспекты условий жизни, изменение традиционного уклада жизни и питания коренных народностей республики, предопределяющие значительное напряжение популяционно-демографических процессов среди этнических групп, стремительное нарастание острых экологических и социальных проблем [1, 9]. Не вызывает сомнения то, что факторы, оказывающие влияние на состояние здоровья, могут быть связаны с образом жизни, состоянием окружающей среды.

Бассейны рек Вилюй и Марха на территории Республики Саха (Якутия) являются зонами по-

тенциального риска по промышленному загрязнению окружающей среды отходами добывающих и горно-обогатительных предприятий, что может оказать дополнительное влияние на состояние здоровья населения.

В этой связи целью работы явилось исследование элементного статуса жителей Республики Саха (Якутия), проживающих в бассейнах рек Вилюй и Марха.

Материалы и методы

Материалом для исследования элементного статуса служили биологические образцы волос и цельной крови. Всего для исследования было предоставлено 501 образец волос и 305 образцов цельной крови (табл. 1).

В предоставленных образцах проводилось определение содержания следующих химических элементов: Al, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, I, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, U, Zn, Zr. Определение проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргонной плазмой.

Образцы подвергались пробоподготовке согласно методическим рекомендациям «Методика определения микроэлементов в диагностируемых биосубстратах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС)», утвержденным ФЦГСЭН 26.03.2003, а также МУК 4.1.1482-03, МУК 4.1.1483-03 «Определение химических элементов в биологических средах и препаратах методами атомно-эмиссионной спек-

Таблица 1
Количество и распределение
по категориям биологических образцов

Table 1
Quantity and categorization of biological samples

Место отбора (населенный пункт)	Тип образца	
	Волосы	Цельная кровь
Кюндядя	85	58
Вилючан	113	49
Малыкай	150	100
Сюльдюкар	55	33
Хоро	98	65

Таблица 2

**Результаты контрольного определения микроэлементного состава
стандартного образца GBW09101b human hair (SINP, KHP)**

Table 2

**The results of the microelement composition test
of the standard sample GBW09101b human hair (SINP, China)**

Элемент	Аттестованное значение	Допустимый интервал		Полученное значение	
		от	до	Стандартное отклонение	Среднее значение
Ag	0,037	0,035	0,039	0,0071	0,0338
Al	23,2	21,2	25,2	3,23	13,7
As	0,198	0,175	0,221	0,023	0,192
Ba	11,1	9,8	12,4	2,66	11,08
Br	0,59	0,59	0,59	2,25	1,54
Ca	1537	1469	1605	112	1517
Cd	0,072	0,062	0,082	0,0092	0,0571
Co	0,153	0,138	0,168	0,022	0,126
Cr	8,74	7,77	9,71	1,41	6,08
Cu	33,6	31,3	35,9	4,46	33,72
Fe	160	144	176	21	140
Hg	1,06	0,78	1,34	0,19	1,24
I	0,96	0,76	1,16	1,23	1,7
K	14,4	14,4	14,4	10,07	28,54
La	0,029	0,029	0,029	0,0048	0,0212
Mg	248	234	262	23	231
Mn	3,83	3,44	4,22	0,34	3,09
Mo	1,06	0,94	1,18	0,176	0,737
Na	445	405	485	48	461
Ni	5,77	5,77	5,77	0,98	4,36
P	174	131	217	24	182
Pb	3,83	3,65	4,01	0,51	4,08
S	46200	46200	46200	5642	47254
Sb	0,12	0,1	0,14	0,017	0,102
Se	0,59	0,55	0,63	0,064	0,553
Sr	8,17	7,48	8,86	0,94	7,76
V	0,089	0,089	0,089	0,0111	0,0768
Zn	191	175	207	17	193

трометрии с индуктивно связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой», утвержденным МЗ РФ в 2003 г [6].

Аналитические исследования выполнены на приборе NexION 300D+NWR213 (Perkin Elmer, США) с автодозатором ESI SC-2 DX4 (Elemental Scientific Inc., США).

Калибровка системы осуществлялась в соответствии с рекомендациями и спецификациями

производителя. В частности, стандартные растворы с концентрациями 0,5, 5, 10 и 50 мкг/л металлов изготавливались на основе коммерческих наборов Universal Data Acquisition Standards Kit (PerkinElmer Inc., США) путем разведения дистиллированной и деионизированной водой и подкислением 1%-й азотной кислотой.

Внутренняя онлайн-стандартизация проводилась с помощью изотопа иттрия 89 (89Y). Внут-

ренный стандарт, содержащий 10 мкг/л иттрия, приготавливался из набора Yttrium (Y) Pure Single-Element Standard (PerkinElmer Inc., США) на основании комплексной матрицы, содержащей 8%-й 1-бутанол (Merck KGaA, Германия), детергент 0,8 % Тритон X-100 (Sigma-Aldrich Co., США), 0,02 % гидроксид тетраметиламмония (Alfa-Aesar, США) и 0,02 % этилендиаминтетрауксусной кислоты (Sigma-Aldrich Co, США). Чистота всех используемых в ходе анализа реагентов соответствовала категории не ниже HPLC-grade.

Для контроля качества за точностью и воспроизводимостью химического анализа использовались стандартные образцы биообразцов волос и цельной крови GBW09101 (Shanghai Institute of Nuclear Research, КНР) (табл. 2), ClinCheck Whole Blood Control, lot 227 (Recipe Chemicals + Instruments GmbH, Германия), level I (табл. 3) и level III (табл. 4).

Результаты определения химических элементов в волосах и цельной крови сравнивались с нормативами, разработанными в АНО «Центр биотической медицины» и сопоставимыми с другими источниками [12, 15].

В работе использовано нормирование содержания химических элементов в биосубстратах, основанное на определении биологически допустимого уровня (БДУ) согласно методическим рекомендациям «Скрининговые методы для выявления групп повышенного риска среди рабочих, контактирующих с токсичными химическими элементами», а также условного биологически допустимого уровня (УБДУ) в соответствии с медицинской технологией «Выявление и коррекция нарушений минерального обмена организма человека» (зарегистрирована в Росздравнадзоре 09.07.2007, рег. уд. №ФС-2007/128). УБДУ представляют собой эмпирически установленные на основании многолетних клинических наблюдений уровни содержания химических элементов в волосах, при которых отмечаются специфические изменения в состоянии здоровья, заболеваемости людей. Практически условный биологически допустимый уровень (УБДУ) соответствует верхнему или нижнему нормативу физиологического содержания элемента.

Математическая обработка полученных данных проводилась с применением пакета программных приложений Microsoft Excel 2007 (Microsoft Corp., США) и интегрированного пакета статистических программ STATISTICA 8.0

(StatSoft Inc., США). Ввиду того, что распределение значений изучаемых признаков в выборке оказалось отличным от нормального, в работе при математической обработке результатов исследования использовали методы непараметрической описательной статистики и сравнения групп. Сравнение выборок проводили с использованием U-критерия Манна–Уитни.

Результаты и обсуждение

Проведенный биоинформационный анализ результатов определения химических элементов в образцах волос и крови жителей Якутии показал, что элементный профиль населения обследованных населенных пунктов дисбалансирован по целому ряду химических элементов.

Встречаемость отклонений в элементном статусе (выхода полученных значений содержания химических элементов за пределы БДУ/УБДУ) представлена в таблицах 5 и 6.

Установлен ряд дисбалансов (дефицитов или избытков) содержания химических элементов в волосах, характерных для всех обследованных населенных пунктов. Так, для жителей, независимо от места проживания, свойственно относительно сниженное содержание в волосах Cu, I, Se, Zn (более 20 %) и относительно повышенное содержание Mn (особенно с. Слюдякар, где встречаемость избытка данного элемента в волосах превышала 40 %), Ni, Cr, Fe.

В отличие от волос, существенных различий в концентрациях химических элементов в плазме крови не обнаружено. Это является отражением выраженного гомеостатического контроля за химическим составом внутренней среды организма и подтверждает представление о том, что элементный анализ плазмы крови является клиническим показателем, а анализ волос – предпочтителен в гигиенической донозологической диагностике [14]. Полученные многочисленными авторами результаты позволяют предположить, что разность эта является следствием различий по отношению к пулу химических элементов в организме человека, которые отражают данные биосубстраты (плазма крови – динамический индикатор, отражает кратковременные и недавние по времени поступления химических элементов; волосы – индикатор долговременных, хронических изменений элементного статуса, вызываемых систематическими изменениями в поступлении химических элементов извне или нарушением их обмена внутри организма человека) [4, 10].

Таблица 3

**Результаты определения элементного состава
стандартного образца ClinCheck Whole Blood Control,
lot 227, level I (Recipe Chemicals + Instruments GmbH, Германия)**

Table 3

**The results of the elemental composition test
of the ClinCheck Whole Blood Control standard sample,
lot 227, level I (Recipe Chemicals + Instruments GmbH, Germany)**

Элемент	Аттестованное значение	Допустимый интервал		Полученное значение	
		от	до	Стандартное отклонение	Среднее значение
As	0,00552	0,00442	0,00662	0,0007	0,0067
Cd	0,00132	0,00106	0,00156	0,0002	0,0015
Co	0,0019	0,00152	0,00228	0,0002	0,0017
Cr	0,00169	0,00135	0,00203	0,0005	0,0024
Cu	0,689	0,551	0,827	0,045	0,675
Hg	0,00149	0,000969	0,00201	0,0004	0,002
K	1230	1110	1350	74	1170
Mg	26,7	24	29,4	1,8	28,92
Mn	0,00787	0,0063	0,00944	0,001	0,0095
Ni	0,0019	0,00152	0,00228	0,0003	0,0035
Pb	0,0584	0,0467	0,0701	0,0041	0,0582
Se	0,0743	0,0594	0,0892	0,0083	0,0692
Zn	4,63	3,94	5,32	0,12	4,82

Таблица 4

**Результаты определения элементного состава
стандартного образца ClinCheck Whole Blood Control,
lot 227, level III (Recipe Chemicals + Instruments GmbH, Германия)**

Table 4

**The results of the elemental composition test
of the ClinCheck Whole Blood Control standard sample,
lot 227, level III (Recipe Chemicals + Instruments GmbH, Germany)**

Элемент	Аттестованное значение	Допустимый интервал		Полученное значение	
		от	до	Стандартное отклонение	Среднее значение
As	0,0196	0,0157	0,0235	0,0023	0,0226
Cd	0,00654	0,00523	0,00785	0,0005	0,0067
Co	0,0136	0,0109	0,0163	0,001	0,0123
Cr	0,0119	0,00952	0,0143	0,003	0,0133
Cu	1,61	1,37	1,85	0,11	1,6
Hg	0,00798	0,00638	0,00958	0,001	0,0095
K	1990	1790	2190	81	1972
Mg	42,5	38,3	46,8	2,08	45,57
Mn	0,0199	0,0159	0,0239	0,0038	0,023
Ni	0,0138	0,011	0,0166	0,0017	0,0155
Pb	0,427	0,363	0,491	0,028	0,426
Se	0,162	0,13	0,194	0,007	0,169
Zn	8,02	6,82	9,22	0,28	8,3

Таблица 5

**Встречаемость повышенного содержания химических элементов
в волосах жителей Якутии, % от количества обследованных**

Table 5

**Encounter rates of an increased content of chemical elements
in the hair of residents of Yakutia (% of the number of examined)**

Элемент	Населенные пункты					
	Все обследованные	Вилючан	Кюндядя	Малыкай	Сюльдюкар	Хоро
Al	1,0	0	2,4	1,3	0	1,0
Cd	1,8	2,7	4,7	1,3	0	0
Co	0,2	0	0	0	0	1,0
Cr	7,4	7,1	3,5	8,7	7,3	9,2
Cs	—	—	—	—	—	—
Cu	0,6	0	1,2	0,7	0	1,0
Fe	8,2	2,7	10,6	8	0	17,3
I	0,6	0	1,2	0	1,8	1,0
Mn	21,4	17,7	8,2	27,3	45,5	14,3
Ni	7,4	10,6	3,5	0	0	22,4
Pb	4,0	6,2	2,4	2,7	0	7,1
Se	0,8	0	1,2	0,7	1,8	1,0
Sr	—	—	—	—	—	—
U	—	—	—	—	—	—
Zn	1,8	2,7	0	0,7	7,3	1,0
Zr	—	—	—	—	—	—

Таблица 6

**Встречаемость пониженного содержания химических элементов
в волосах жителей Якутии, % от количества обследованных**

Table 6

**Encounter rates of a low content of chemical elements
in the hair of residents of Yakutia (% of the number of examined)**

Элемент	Населенные пункты					
	Все обследованные	Вилючан	Кюндядя	Малыкай	Сюльдюкар	Хоро
Al	—	—	—	—	—	—
Cd	—	—	—	—	—	—
Co	0,2	0	0	0,7	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0
Cs	—	—	—	—	—	—
Cu	60,1	69,0	47,1	72,7	70,9	35,7
Fe	0,8	1,8	0	0,7	1,8	0
I	27,1	23,0	34,1	42,7	10,9	11,2
Mn	0	0	0	0	0	0
Ni	—	—	—	—	—	—
Pb	—	—	—	—	—	—
Se	33,3	47,8	2,4	43,3	32,7	28,6
Sr	—	—	—	—	—	—
U	—	—	—	—	—	—
Zn	41,7	46,0	29,4	45,3	40,0	42,9
Zr	—	—	—	—	—	—

Таким образом, результаты анализа волос выявили высокую встречаемость у населения избыточного уровня Mn и в отдельных населенных пунктах – Ni. Кроме того, следует обратить внимание на распространенность избыточного содержания Pb и Cd в отдельных населенных пунктах. Хотя встречаемость отклонений в данном случае не превышает 10 %, тем не менее, учитывая высокую токсичность этих тяжелых металлов, превышение у населения в 4–7 % случаев может рассматриваться как уровень обеспокоенности. Но не следует исключать вероятность попадания этих элементов во внутреннюю среду с бытовыми аэрозолями и пищевыми продуктами, курением.

В то же время, у обследованных жителей регистрируется высокая встречаемость пониженного содержания в волосах целого ряда эссенциальных элементов, прежде всего Cu, Se и Zn. Дисбаланс Zn обычно ассоциируется с повышенной частотой инфекционных заболеваний, новообразований, болезней эндокринной и нервной систем, кожи и ее придатков, расстройств поведения и психики, пороков развития [19–25]. Недостаток селена (при содержании 0,05 мкг/г и ниже) в волосах респондентов проявлял ассоциативную связь с частотой заболеваемости, что отражалось в росте частоты инфекционных заболеваний. Это согласуется с современными представлениями о биологической роли селена [16, 18, 24].

Республика Саха (Якутия) является по своим биогеохимическим характеристикам уникальным регионом Российской Федерации [5, 7]. Сезонное протаивание почвогрунтов изменяется от десятка сантиметров на севере до 2–3 м на юге. Почвы Якутии характеризуются недостатком кальция, фосфора, калия, кобальта, меди, йода, молибдена, бора, цинка, достаточным количеством марганца и относительным избытком стронция, особенно по речным поймам [7]. Почвы и донные отложения Лено-Вилюйского водораздела дефицитны содержанием меди, бора и молибдена и обогащены марганцем, железом и кобальтом [11]. Донные отложения вследствие своих высоких сорбционных свойств могут рассматриваться как интегральный индикатор техногенной нагрузки на гидросферу, и их изучению следует отводить важное место в общей системе наблюдений за состоянием водной среды. Состав озерной и речной воды в целом характери-

зуется низкой минерализацией и малым содержанием фтора, меди и молибдена, снижением интенсивности водной миграции цинка, марганца и меди, повышением миграционной активности олова, ванадия и калия. Соответственно, в таких условиях существенно снижается содержание кальция, фосфора, хлора и магния в местных кормовых растениях [11].

Заключение

Оценка обнаруженных нами изменений содержания микроэлементов может быть двоякой. С одной стороны, уменьшение или увеличение содержания химических элементов может быть обусловлено изменениями в окружающей среде региона. С другой стороны, те или иные заболевания, вызывающие нарушение усвоения химических элементов или их выведения, могут сопровождаться изменениями элементного статуса организма. Для элементов, содержание которых в организме коррелирует с их содержанием в окружающей среде, предположение о патогенетическом значении дисэлементозов является наиболее вероятным. Дисбаланс элементов, независимо от его причин, может быть самостоятельным патогенетическим фактором, поскольку известна важнейшая роль макро- и микроэлементов в процессах жизнедеятельности организма.

Результаты исследования показывают, что микроэлементный профиль жителей Вилюйского региона имеет свои характерные черты, которые могут быть связаны с особенностями химического состава почв и речного бассейна на территории проживания.

Таким образом, результаты эколого-физиологических исследований свидетельствуют о необходимости комплексного подхода при оценке состояния здоровья и уровня функциональных резервов организма человека, их связи с факторами окружающей среды, социально-экономическими условиями и образом жизни, наличием вредных привычек, культурой и традициями коренного населения, его отношением к своему здоровью.

Список литературы / References

1. Агаджанян Н.А., Гомбоева Н.Г. *Адаптация, экология и здоровье населения различных этнических групп Восточного Забайкалья*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Чита: ЗабГПУ; 2005. 152 с.

- [Agadzhanyan N.A., Gomboeva N.G. *Adaptation, ecology and health of the population of various ethnic groups of Eastern Transbaikalia*. Novosibirsk: Publishing House of the SB RAS, Chita: Transbaikalian State University; 2005. 152 p. (In Russ.)]
2. Алексеев В.П., Кривошапкин В.Г., Макаров В.Н. *Атлас: география Вилуйского энцефаломиелимита*. Якутск; 2000. 107 с.
- [Aleksseev V.P., Krivoschapkin V.G., Makarov V.N. *Atlas: geography of Vilyuisk encephalomyelitis*. Yakutsk; 2000. 107 p. (In Russ.)]
3. Баранов А.А., Альбицкий В.Ю., Намазова-Баранова, Терлецкая Р.Н. *Состояние здоровья детей в современной России*. М.: ООО Издательство «Педиатр»; 2018. 120 с.
- [Baranov A.A., Albitskiy V.Yu., Namazova-Baranova, Terletskaia R.N. *The state of children's health in modern Russia*. M.: Publishing House «Pediatri»; 2018. 120 p. (In Russ.)]
4. Бекетова Г.В., Горячева И.П. Цинк и его влияние на здоровье человека в условиях пандемии COVID-19: что нового? *Педиатрия. Восточная Европа*. 2021;9(1):8–20.
5. [Beketova G.V., Goryacheva I.P. Zinc and its impact on human health in the context of the COVID-19 pandemic: what's new? *Pediatrics. Eastern Europe*. 2021;9(1):8–20. (In Russ.)]
6. Григорьева А.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды в условиях криолитозоны. *Проблемы региональной экологии*. 2018; (6):51–58.
- [Grigorieva A.A. Heavy metals as a factor of environmental pollution in cryolithozone conditions. *Regional Environmental Issues*. 2018;(6):51–58. (In Russ.)]
7. Иванов С.И., Подунова Л.Г., Скачков В.Б., Тутьян В.А., Скальный А.В., Демидов В.А., Скальная М.Г., Серебрянский Е.П., Грабеклис А.Р., Кузнецов В.В. *Определение химических элементов в биологических средах и препаратах методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и масс-спектрометрией: Методические указания (МУК 4.1.1482-03, МУК 4.1.1483-03)*. М.: ФЦГСН России; 2003. 56 с.
- [Ivanov S.I., Podunova L.G., Skachkov V.B., Tutelyan V.A., Skalnyy A.V., Demidov V.A., Skalnaya M.G., Serebryanskiy Ye.P., Grabeklis A.R., Kuznetsov V.V. *Determination of chemical elements in biological media and preparations by atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma and mass spectrometry: Guidelines (MUK 4.1.1482-03, MUK 4.1.1483-03)*. M.: FTSGSN Rossii; 2003. 56 p. (In Russ.)]
8. Ковальский В.В. *Геохимическая экология*. М.: Наука; 1974. 300 с.
- [Kovalskiy V.V. *Geochemical ecology*. M.: Nauka; 1974. 300 p. (In Russ.)]
9. Копач А.Е., Федорив О.Е., Мельник Н.А. Эффекты влияния меди и цинка на живые организмы (обзор литературы). *Гигиена и санитария*. 2021;100(2): 172–177. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-172-177>
- [Kopach A.Y., Fedoriv O.Y., Melnyk N.A. Effects of the influence of copper and zinc on living organisms (literature review). *Hygiene and Sanitation*. 2021;100(2): 172–177]. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-2-172-177>
10. Кривошапкин, В.Г., Мордовская В.И. Изменение традиционного питания как фактор риска формирования хронических неинфекционных заболеваний у коренного населения Республики Саха (Якутия). *Материалы 13 международного конгресса по приполярной медицине*. г. Новосибирск: СО РАМН; 2006: 151–152.
- [Krivoschapkin, V.G., Mordovskaya V.I. Changing the traditional diet as a risk factor for the formation of chronic non-communicable diseases in the indigenous population of the Republic of Sakha (Yakutia). *Proceedings of the 13th International Congress on Circumpolar Medicine*. Novosibirsk: SO RAMN; 2006:151–152. (In Russ.)]
11. Музыко Е.А., Лашенова Л.И., Ткачева Г.А., Перфилова В.Н. Дисбаланс микроэлементов во время беременности как фактор развития патологий у детей. *Микроэлементы в медицине*. 2021;22(3):15–26. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-15-26>
- [Muzyko E.A., Laschenova L.I., Tkacheva G.A., Perfilova V.N. Imbalance of trace elements during pregnancy as a factor of the development of pathologies in children. *Trace elements in medicine*. 2021;22(3):15–26. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2021-22-3-15-26>
12. Саввинов Д.Д., Сазонов Н.Н. *Микроэлементы в северных экосистемах*. Новосибирск: Наука; 2006. 208 с.
- [Savvinov D.D., Sazonov N.N. *Trace elements in northern ecosystems*. Novosibirsk: Nauka; 2006. 208 p. (In Russ.)]
13. СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». <https://base.garant.ru/400289764/>
- [SanPiN 2.1.3684-21 «Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures». (In Russ.)] <https://base.garant.ru/400289764/>

14. Скальный А.В. *Медицинская элементология*. Учебное пособие / А.В. Скальный, М.Г. Скальная, А.А. Киричук, А.А. Тиньков. М.: РУДН; 2018. 222 с.
[Skalnyu A.V. *Medical elementology*. Study guide / A.V. Skalnyu, M.G. Skalnaya, A.A. Kirichuk, A.A. Tinkov. M.: Izd-vo RUDN; 2018. 222 p. (In Russ.)]
15. Скальная М.Г. *Гигиеническая оценка влияния минеральных компонентов рациона питания и среды обитания на здоровье населения мегаполиса*: Автореферат дис. доктора мед. наук. Москва; 2005. 42 с.
[Skalnaya M.G. *Hygienic assessment of the influence of mineral components of the diet and habitat on the health of the population of the metropolis*: Abstr. ... Diss. Doct. Sci., Moscow; 2005. 42 p. (In Russ.)]
16. Скальный А.В., Скальная М.Г., Дубовой Р.М., Демидов В.А., Нотов О.С. *Выявление и амбулаторная коррекция нарушений минерального обмена. Методические рекомендации*. РОСМЭМ. Москва: ООО «Петрораш»; 2009. 41 с.
[Skalnyu A.V., Skalnaya M.G., Dubovoy R.M., Demidov V.A., Notov O.S. *Detection and outpatient correction of mineral metabolism disorders*. Methodological recommendations. ROSMAN. Moscow: ООО «Petro-rush»; 2009. 41 p. (In Russ.)]
17. Тутельян В.А., Княжев В.А., Хотимченко С.А., Голубкина Н.А., Кушлинский Н.Е., Соколов Я.А. *Селен в организме человека: метаболизм, антиоксидантные свойства, роль в канцерогенезе*. М.: Изд. РАМН; 2002. 224 с.
[Tutelyan V.A., Knyazhev V.A., Khotimchenko S.A., Golubkina N.A., Kushlinskiy N.Ye., Sokolov Ya.A. *Selenium in the body human: metabolism, antioxidant properties, role in carcinogenesis*. M.: RAMN; 2002. 224 p. (In Russ.)]
18. *Физическое развитие детей и подростков Российской Федерации: учебное пособие*. В.Р. Кучма, Н.А. Скоблина, О.Ю. Милушкина [и др.]. Выпуск VII. М.: Изд-во «Литтерра», 2019. 176 с.
[Physical development of children and adolescents of the Russian Federation: textbook. V.R. Kuchma, N.A. Skobolina, O.Yu. Milushkina [et. al.]. Issue VII. M.: Izd-vo «Litterra», 2019. 176 p. (In Russ.)]
19. D'Oria L., Apicella M., De Luca C., Licameli A., Neri C., Pellegrino M., Simeone D., De Santis M. Chronic exposure to high doses of selenium in the first trimester of pregnancy: Case report and brief literature review. *Birth Defects Res.* 2018; 110(4):372–375. <https://doi.org/10.1002/bdr2.1148>
20. Duydu Y., Başaran N., Üstündağ A., Aydın S., Yalçın C.Ö., Anlar H.G., Bacanlı M., Aydos K., Atabekoğlu C.S., Golka K., Ickstadt K., Schwerdtle T., Werner M., Meyer S., Bolt H.M. Birth weights of newborns and pregnancy outcomes of environmentally boron-exposed females in Turkey. *Arch. Toxicol.* 2018;92(8):2475–2485. <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2238-4>
21. Fedoriv O.E., Kopach O.E., Melnyk N.A., Lototska O.V., Lototskyy V.V. Influence of nanoparticles of lead on the organism of suspicious animals when using water with content of sodium and sunpate stearates. *World Med. Biol.* 2019; 68(2):199–204. <http://dx.doi.org/10.26724/2079-8334-2019-2-68-199-204>
22. Herlin M., Broberg K., Igra A.M., Li H., Harari F., Vahter M. Exploring telomere length in mother-newborn pairs in relation to exposure to multiple toxic metals and potential modifying effects by nutritional factors. *BMC Medicine.* 2019;17(1):77. <https://doi.org/10.1186/s12916-019-1309-6>
23. Hjelm C., Harari F., Vahter M. Pre- and postnatal environmental boron exposure and infant growth: Results from a motherchild cohort in northern Argentina. *Environmental Research.* 2019;171:60–68. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.012>
24. Owayolu A., Owayolu G., Karaman E., Yuce T., Ozek M.A., Turksoy V.A. Amniotic fluid levels of selected trace elements and heavy metals in pregnancies complicated with neural tube defects. *Congenital Anomalies (Kyoto).* 2019;60(5):136–141. <https://doi.org/10.1111/cga.12363>
25. Shu Y., Wu M., Yang S., Wang Y., Li H. Association of dietary selenium intake with telomere length in middle-aged and older adults. *Clinical Nutrition.* 2020; 39(10):3086–3091. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2020.01.014>
26. Vahter M., Broberg K., Harari F. Placental and Cord Blood Telomere Length in Relation to Maternal Nutritional Status. *The Journal of Nutrition.* 2020; 150(10):2646–2655. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa198>

Об авторах

ПЕТРОВА Пальмира Георгиевна, доктор медицинских наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-3108-9530>, e-mail: mira44@mail.ru

БОРИСОВА Наталья Владимировна, доктор медицинских наук, зав. кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-9583-3424>, e-mail: Borinat@yandex.ru

Аффилиация

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, медицинский институт, 677016, г. Якутск, ул. Ойунского, 27, Российская Федерация

About the authors

PETROVA, Palmira Georgievna, Dr. Sci. (Medicine), Professor, [https://orcid.org/ 0000-0003-3108-9530](https://orcid.org/0000-0003-3108-9530), e-mail: mira44@mail.ru

BORISOVA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Medicine), Head of the Department, <https://orcid.org/0000-0001-9583-3424>, e-mail: Borinat@yandex.ru

Affiliation

Ammosov North-Eastern Federal University, Medical Institute, 27 Ojanskogo st., Yakutsk 677016, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 08.00.2022

Поступила после рецензирования / Revised 05.10.2022

Принята к публикации / Accepted 25.10.2022

Биологические ресурсы

УДК 613.26:543.544.3

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-610-617>

Перспективность рационального использования биологически активных веществ из хвои *Pinus sylvestris* для создания биопрепаратов

В. В. Михайлов✉, И. В. Слепцов, С. М. Рожина, Б. М. Кершенгольц

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ nethrezim@mail.ru

Аннотация

Проведено исследование годовой динамики накопления метаболитов в хвое обыкновенной сосны (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории Центральной Якутии. Установлено, что в хвое сосны содержатся ценные биоактивные вещества, эффективные при профилактике и купировании нарушений обмена веществ, возникающих при сахарном диабете 2-го типа и при формировании других метаболических нарушений, связанных с гиперхолестеринемией, а также вещества криопротекторного действия. Показано, что наибольшие содержания антиоксидантов, таких как галловая, бензойная, аминотрихлоруксусная кислота, наблюдаются осенью, также в этот период возрастает содержание полиолов, аминокислот и углеводов. На основании полученных данных выдвинуто предположение о том, что в целях создания биопрепаратов, нормализующих углеводный обмен, а также защищающих кожные покровы от действия низких температур, рационально использовать в качестве сырья хвою *P. sylvestris*, отобранную осенью.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris*, биопрепараты, противодиабетическое действие, холодозащита

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ России по проекту «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья, повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (тема № 0297-2021-0025, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190035-9), НИР «Разработка и внедрение в практическое здравоохранение биогенных методов повышения уровня здоровья и адаптивного потенциала организма человека, его умственной и физической работоспособности в экстремальных условиях природной и социальной среды путем создания биопрепаратов из тканей северных эоформ растений и аборигенных видов животных. 2 этап» (Государственный контракт № 535) и с применением оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНИЦ СО РАН» (грант № 13.ЦКП.21.0016).

Для цитирования: Михайлов В.В., Слепцов И.В., Рожина С.М., Кершенгольц Б.М. Перспективность рационального использования биологически активных веществ из хвои *Pinus sylvestris* для создания биопрепаратов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):610–617. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-610-617>

The prospects for the rational use of biologically active substances from *Pinus sylvestris* needles in the creation of biopreparations

V. V. Mikhailov✉, I. V. Sleptsov, S. M. Rozhina, B. M. Kershengolts

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,

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

✉ nethrezim@mail.ru

Abstract

In this article we present the research results of a year-round accumulation dynamics of the metabolites in the needles of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growing in Central Yakutia. Pine needles contain valuable bioactive substances effective for preventing and curing metabolic disorders in diabetes mellitus type 2 and the formation of other metabolic disorders associated with hypercholesterolemia. They also contain substances with cryoprotective properties. The

highest content of antioxidants in the *Pinus sylvestris* L. (gallic acid, benzoic acid, aminobutyric acid) were observed in autumn. Moreover, the content of polyols, amino acids and carbohydrates increased in them during this period. Thus, we suppose it is rational to the use *P. sylvestris* needles gathered in autumn to produce biopreparations for normalizing carbohydrate metabolism or protecting skin from the effects of low temperatures.

Keywords: *Pinus sylvestris*, biopreparations, antidiabetic effect, frostbite protection

Funding. This study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme number 0297-2021-0025, reg. number AAAA-A21-121012190035-9); the Research project “Development and implementation in practical health care of biogenic methods to improve health and adaptive capacity of the human body, its mental and physical performance in extreme conditions of natural and social environment by creating biopreparations from tissues of the northern ecoforms of plants and indigenous animal species. Stage 2” (State contract number 535). We used the equipment provided by Shared core facilities (SCF) of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Centre” (grant number 13.SCF.21.0016).

For citation: Mikhailov V.V., Sleptsov I.V., Rozhina S.M., Kershengolts B.M. The prospects for the rational use of biologically active substances from *Pinus sylvestris* needles in the creation of biopreparations. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):610–617. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-610-617>

Введение

В последнее время возрастает интерес к производству биопрепаратов на основе растительного сырья. Во-первых, создание новых синтетических лекарственных веществ все более усложняется на всех стадиях процесса: от этапа разработки до введения в производство [1]. Из-за этого рынок новейших синтетических лекарственных препаратов контролируется крупными фармакологическими компаниями, что обуславливает высокую цену и сниженную доступность таких продуктов [2]. Природные соединения, в сравнении с синтетическими веществами, производство которых – весьма технологически сложный процесс, лишены этого недостатка, особенно если их выделение осуществляется из воспроизводимого, экологически чистого растительного сырья с достаточной сырьевой базой.

Во-вторых, препараты, произведенные из природного растительного сырья, обладают широким изосубстратным сбалансированным спектром биоактивных веществ. Это существенно повышает их биоактивность, в первую очередь в отношении влияния на адаптивный потенциал организма человека [3], причем такие комплексы принципиально не могут быть получены синтетическим путем.

В-третьих, препараты, произведенные из растительного сырья, могут обладать физиологическим эффектом на организм и здоровье при более низких в сравнении с синтетическими препаратами рисках развития нежелательных побочных эффектов [4]. Следует, тем не менее, с осторожностью относиться к этому, поскольку известны случаи, когда из-за естественной многокомпонентности биохимического состава растений, помимо целебного эффекта, проявлялись

негативные последствия. Так, *Ginkgo biloba* L., используемое в традиционной медицине на протяжении тысячелетий с целью улучшения мозгового кровообращения, повышает вероятность кровоизлияний, в том числе внутримозговых, что приводит к особенно тяжелым последствиям [5]. *Aloe vera* L. ex Webb является примером другого, широко представленного в традиционной медицине растения, проявляющего при этом цито- и генотоксичный, карциногенный эффекты, связанные с антрахинонами и фенольными соединениями растения [6]. Таким образом, привлекательной выглядит идея биотехнологического выделения целевых компонентов из сырья, а не использования всего комплекса разнообразнейших веществ, содержащихся в нем.

Наконец, в-четвертых, человечество в процессе своего исторического развития уже накопило определенный опыт применения различных растительных субстанций с использованием природного сырья. Совмещая данный опыт с применением современных методов анализа и биотехнологической переработки, представляется возможным выделять ключевые для достижения того или иного эффекта дешевые, эффективные и безопасные в применении вещества для создания биопрепаратов.

В связи со сложной, динамической природой таких систем, как живые растительные организмы, при выделении из них биологически активных веществ необходимо изучать закономерности, по которым эти вещества синтезируются и накапливаются в растениях, а также претерпевают распад. Биологически активные вещества растительного происхождения, как правило, являются их вторичными метаболитами.

Вторичные метаболиты – это синтезируемые в растениях вещества, не участвующие напря-

мую в основном обмене при их обычном росте, развитии или репродукции. Для многих вторичных метаболитов были описаны защитные свойства при воздействии на растения различных заболеваний, ультрафиолетового излучения, паразитов и растительноядных животных, окислительного стресса, а также сигнальные свойства (например, яркая окраска или сильный запах), и, наконец, было описано их участие при межвидовой конкуренции [7, 8].

Род Сосны (*Pinus* L.) – широко распространенная группа хвойных деревьев семейства Сосновых (*Pinaceae* Lindl), представленная главным образом в Северном полушарии [9]. Этот род является перспективным с точки зрения применения биоактивных веществ, выделяемых из различных тканей деревьев, в медицине и в функциональной пищевой промышленности [10]. Наиболее распространенным видом является обыкновенная сосна (*Pinus sylvestris* L.), произрастающая на территории Евразии и имеющая важное экономическое и экологическое значение [11]. На территории Якутии *P. sylvestris* предпочитает произрастать в достаточно сухих лесах с супесчаной почвой [12] и занимает около 8–9 % территории тайги [13].

В 40–50-е годы XX в. работами профессора А.Д. Егорова было показано высокое содержание в хвое сосны целого ряда биоактивных веществ, в первую очередь витамина С и каротина [14]. На основе этих результатов А.Д. Егоров с сотрудниками разработали биотехнологии и создали биопрепараты из хвои сосны ветеринарного и пищевого назначения, благодаря организации производства которых в Якутии в эти годы были спасены тысячи человеческих жизней, поголовье КРС, лошадей и других сельскохозяйственных видов животных.

В ряде исследований некоторые вещества, получаемые из тканей *P. sylvestris*, проявляют следующие свойства: противоопухолевое воздействие при раке молочных желез [15], антиоксидантное [16], антибактериальное и противовирусное действие [17]. Также исследователями предложены различные методы использования биоактивных веществ, содержащихся в сосне: использование водно-спиртовых экстрактов хвои в качестве добавки в различные напитки [18], рассматриваются новые способы извлечения и гидрофобных компонентов [19].

Цель исследования – изучить годовую динамику накопления первичных и вторичных мета-

болитов хвои *Pinus sylvestris* и выявить на основе полученных данных перспективный период сбора с максимальным содержанием биологически активных веществ для создания биопрепаратов на их основе.

Материалы и методы

Место исследования и отбор образцов. Объектом исследования являлась хвоя *Pinus sylvestris* L., относящаяся к семейству *Pinaceae* Lindl. Хвоя отбиралась с деревьев высотой 2–4 м на участках соснового леса на территории Центральной Якутии в окрестностях г. Якутск ежемесячно в течение года в период с октября 2018 по сентябрь 2019 г. (включительно).

Подготовка проб. Образцы хвои *P. sylvestris* высушивали в лабораторной лиофильной сушилке Jouan LP 3 (Франция) и затем сохраняли в вакууме в герметичной упаковке.

Определение первичных и вторичных метаболитов методом ГХ-МС. Для определения состава первичных и вторичных метаболитов 10 мг навески образцов хвои *P. sylvestris* экстрагировали в 1 мл метанола. Полученный экстракт выпаривали при 40 °С на ротационном испарителе, сухой остаток растворяли в 50 мкл пиридина. Для получения летучих триметилсилил-производных (ТМС) проводили дериватизацию с использованием 50 мкл N,O-бис-(триметилсилил)-трифторацетида (BSTFA) в течение 15 мин при 100 °С. Анализ проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на хроматографе «Маэстро» (Россия) с квадрупольным масс-спектрометром Agilent 5975C (США), колонка HP-5MS, 30 м × 0,25 мм. Для хроматографии использовали линейный градиент температуры от 70 до 320 °С со скоростью нагрева 4 °С/мин при потоке газа (гелий) 1 мл/мин. Сбор данных осуществляли с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation [20]. Количественную интерпретацию хроматограмм проводили методом внутренней стандартизации по углеводороду C₂₃ [21]. Обработка и интерпретация масс-спектрометрической информации проводилась с использованием стандартной библиотеки NIST 2011.

Статистическая обработка. Статистическая обработка метаболомных профилей была выполнена методом мультивариантной статистики с использованием общедоступного набора программных инструментов MetaboAnalyst (www.metaboanalyst.ca). Полученные результаты под-

вергались обработке для создания статистической матрицы, представленной в виде тепловой карты метаболитов, где цветом показаны средние концентрации исследуемых компонентов в различные времена года.

Результаты и обсуждение

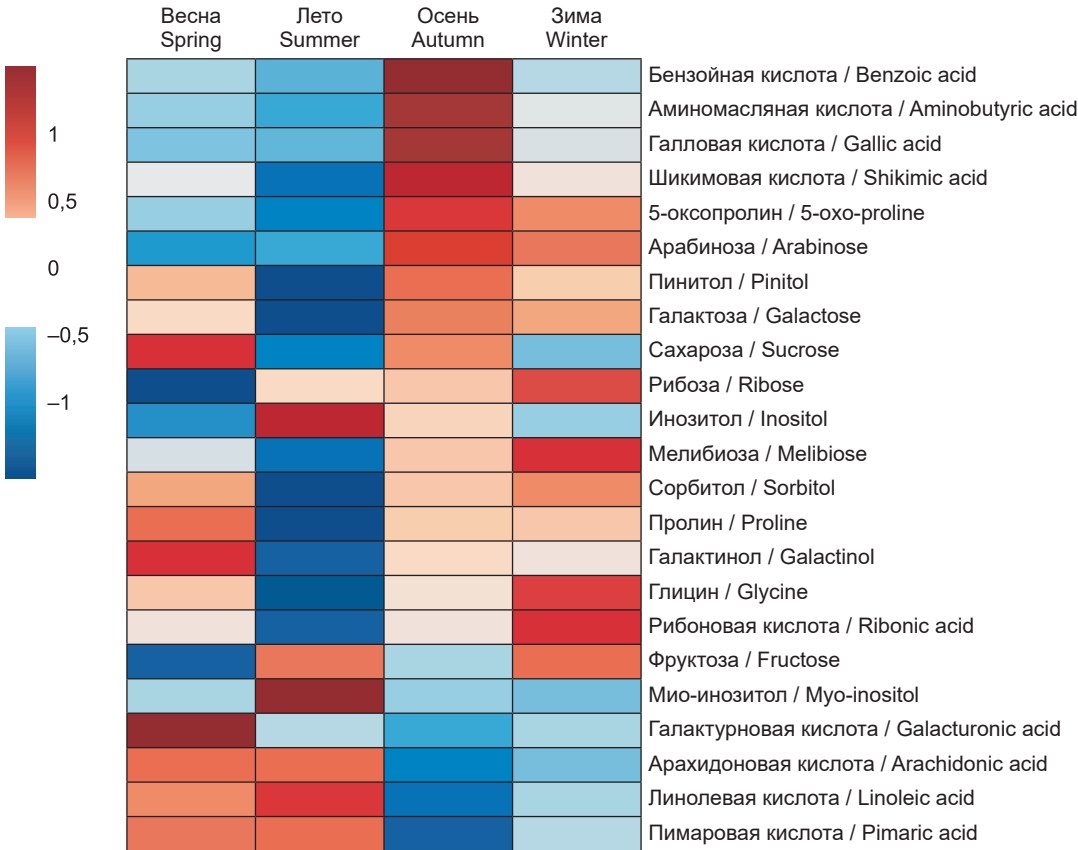
Проведенное нами исследование динамики содержания различных метаболитов в хвое *P. sylvestris* (см. рисунок) показало, что наибольшие содержания антиоксидантов, таких как галловая, бензойная, шикимовая, аминomásляная кислота и другие, ряд из которых обладает также способностью купировать метаболические нарушения при сахарном диабете 2-го типа и при гиперхолестеринемии (пинитол и др.), наблюдаются осенью.

Известно, что пинитол обладает multifunctionalными свойствами: включая антидиабетические [22], антиоксидантные [23], противо-

воспалительные [24] и противоопухолевые [25]. Исследования показали, что пинитол оказывает гипогликемический эффект у пациентов с сахарным диабетом II типа [26]. Инозитол и мио-инозитол, стереоизомеры пинитола, также оказывают инсулиноподобное действие и могут применяться в качестве эффективного препарата при терапии сахарного диабета 2-го типа [27], а также в качестве препарата, снижающего уровни липидов и холестерина [28].

Галловая кислота способна подавлять эффекты окислительного стресса, связанного с диабетом 2-го типа и способствующего воспалению, общей гипергликемии и развитию инсулинрезистентности клеток организма [29]. Помимо этого, она также является перспективным веществом при лечении гепатоцеллюлярной карциномы [30].

Исследование динамики содержания различных метаболитов в хвое *P. sylvestris* (см. рисунок) показало, что в этот период возрастает также



Тепловая карта содержания метаболитов в хвое *Pinus sylvestris* в условиях Центральной Якутии в различные сезоны года. Максимальное содержание принято за 1, минимальное содержание за -1.

Heatmap of the metabolites content in *Pinus sylvestris* needles in Central Yakutia at different seasons of year. Maximum content is considered as 1, minimum content as -1.

содержание полиолов, аминокислот и углеводов, выполняющих в растении роль криопротекторов [31, 32]. Накопление веществ, проявляющих криопротекторные свойства, в осенний период времени, скорее всего, способствует устойчивости *P. sylvestris* к низким температурам в зимний период.

Проблема криопротекции особенно остра в климатических условиях Якутии: при экстремально низких зимних температурах холодовые поражения у человека могут развиваться и приводить к тяжелым последствиям (серьезные ожоги, прижизненное оледенение тканей, некроз, инвалидизация, летальный исход) чрезвычайно быстро [33]. При этом лечение холодовых ожогов – весьма трудоемкая задача, которая не всегда завершается полным восстановлением пораженных тканей и органов, и предотвращение их образования представляется первостепенной задачей в условиях Крайнего Севера [34]. В продаже обычно предлагаются различные согревающие и теплоизолирующие эмульсии на основе жирных веществ, но было показано, что их действие ограничивается личным восприятием пользователя, и это приводит к ложному ощущению защищенности, повышающему действительный риск получения холодового ожога [35]. Изучается иной подход защиты человека (прежде всего кожи как органа, непосредственно и в первую очередь контактирующего с поражающим действием низких температур), основанный на использовании различных природных субстанций, полученных из организмов, демонстрирующих холодовую устойчивость. Так, трансгенные мыши, синтезирующие антифризный гликопротеин черноногого клеща (*Ixodes scapularis*), проявляют повышенную устойчивость к длительному воздействию низких температур [36]. Для экзополисахаридов, выделяемых арктическими морскими бактериями *Polaribacter* sp. SM1127, были показаны высокие антиоксидантные и влагоудерживающие эффекты, чем были объяснены снижение тяжести холодового ожога и ускорение его заживления (снижение содержания активных форм кислорода, образующихся после холодового ожога) [37]. Некоторые авторы в своей работе предлагают использование гемолимфы морозоустойчивых арктических насекомых для предотвращения образования холодовых ожогов [38]. Следует отметить, что предполагаемый механизм криозащиты во всех случаях схож по своей природе и основан на том, что

использованные вещества, во-первых, снижают температуру замерзания водного раствора, во-вторых, демонстрируют влагоудерживающие свойства, в-третьих, изменяют форму кристаллов образующегося льда – аналогичные эффекты производит комплекс криопротектантов в *P. sylvestris* (пинитол, инозитол, мелибиоза), что является многообещающим с точки зрения создания биопрепарата, предназначенного для профилактики и лечения холодовых ожогов.

Заключение

Исследование годовой динамики накопления данных метаболитов в хвое *P. sylvestris* показало, что эти вещества служат в растении в качестве антиоксидантов и криопротекторов, соответственно, осенний пик их содержания – стратегия адаптации растения к экстремальным климатическим условиям произрастания.

Таким образом, сбор растительного сырья в виде хвои *P. sylvestris* для получения биопрепаратов на его основе рационально осуществлять в осенний период, когда происходят биохимические перестройки организма для адаптации к низкотемпературному стрессу.

С точки зрения выделения компонентов хвои *P. sylvestris*, перспективных при терапии таких серьезных нарушений метаболизма человека, как сахарный диабет 2-го типа или гиперхолестеринемии, способствующей развитию атеросклероза, можно предположить, что наиболее подходящим является конец лета и ранняя осень, когда в хвое *P. sylvestris* наблюдаются наивысшие содержания веществ, проявляющих активность при их терапии, главным образом: галловой кислоты, пинитола, инозитола. Доля населения Якутии с такими тяжелыми заболеваниями, как диабет, неуклонно растет [39], в связи с чем идея разработка биопрепарата на основе местного экологически чистого растительного сырья выглядит весьма актуальной.

Также в осенний период в хвое *P. sylvestris* возрастает содержание полиолов, аминокислот и углеводов, выполняющих в растении роль криопротекторов, что, по-видимому, способствует повышению устойчивости хвоинок к действию низких температур в предстоящий зимний период [31, 32]. В связи с этим биотехнологический интерес может представлять выделение данного криопротекторного комплекса из хвои *P. Sylvestris* и создание на его основе биопрепаратов, которые могли бы стать активным веще-

ством косметологических средств (кремов, гелей и др.) криозащитного действия.

Список литературы / References

- Schultz D., Campeau L.-C. Harder, better, faster. *Nat. Chem.* 2020; 12(8):661–664. <https://doi.org/10.1038/s41557-020-0510-8>
- Hughes R.C. Pricing Medicine Fairly. *Philosophy of Management.* 2020;19(4):369–385. <https://doi.org/10.1007/s40926-020-00135-z>
- Khlebnyy E.S., Kerschengoltz B.M. Structural and functional variety of physiologically active agents – A molecular basis of high adaptive potential and a specific variety of a biota in the Arctic, prospects for biopharmaceutics. *J. Ecosys. Ecograph.* 2013;03(04):50. <https://doi.org/10.4172/2157-7625.S1.012>
- Gromek K., Drumond N., Simas P. Pharmacovigilance of herbal medicines. *JRS.* 2015;27(2):55–65. <https://doi.org/10.3233/JRS-150643>
- Rowin J., Lewis S.L. Spontaneous bilateral subdural hematomas associated with chronic *Ginkgo biloba* ingestion. *Neurology.* 1996;46(6):1775–1776. <https://doi.org/10.1212/WNL.46.6.1775>
- Guo X., Mei N. *Aloe vera*: A review of toxicity and adverse clinical effects. *Journal of Environmental Science and Health, Part C.* 2016;34(2):77–96. <https://doi.org/10.1080/10590501.2016.1166826>
- Kaur S., Das M. Functional foods: An overview. *Food Science and Biotechnology. Springer,* 2011;20(4): 861–875. <https://doi.org/10.1007/s10068-011-0121-7>
- Kato-Noguchi H., Fushimi Y., Shigemori H. An allelopathic substance in red pine needles (*Pinus densiflora*). *Journal of Plant Physiology.* 2009;166(4): 442–446. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.06.012>
- Farjon A. *World checklist and bibliography of conifers.* Royal Botanic Gardens, 2001. 309 p.
- Dziedziński M., Kobus-Cisowska J., Stachowiak B. *Pinus* species as prospective reserves of bioactive compounds with potential use in functional food – Current state of knowledge. *Plants.* 2021;10(7):1306. <https://doi.org/10.3390/plants10071306>
- Durrant T.H., De Rigo D., Caudullo G. *Pinus sylvestris* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European atlas of forest tree species.* Publ. Off. EU Luxembourg, 2016:132–133.
- Nikolaev A.N., Fedorov P.P., Desyatkin A.R. Effect of hydrothermal conditions of permafrost soil on radial growth of larch and pine in Central Yakutia. *Contemp. Probl. Ecol.* 2011;4(2):140–149. <https://doi.org/10.1134/S1995425511020044>
- Судачкова Н. Е. и др. *Физиология сосны обыкновенной.* Новосибирск: Наука; 1990. 244 с.
[Sudachkova N. Ye. et al. *Physiology of the common pine.* Novosibirsk: Nauka; 1990. 244p. (In Russ.)]
- Егоров А. Д. *Витамин С и каротин в растительности Якутии.* М.: Изд-во АН СССР; 1954. 246 с.
[Egorov A.D. *Vitamin C and carotene in the vegetation of Yakutia.* М.: Izd-vo AN SSSR; 1954. 246 p. (In Russ.)]
- Hoai N. et al. Selectivity of *Pinus sylvestris* extract and essential oil to estrogen-insensitive breast cancer cells *Pinus sylvestris* against cancer cells. *Phcog Mag.* 2015;11(44):290. <https://doi.org/10.4103/0973-1296.166052>
- Nikonova N.N. et al. “Green technology” processing of pine (*Pinus sylvestris* L.) and larch (*Larix sibirica* Ledeb.) wood greenery to produce bioactive extracts. *Holzforschung.* 2022;76(3):276–284. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0122>
- Strizincova P., Jablonsky M., Lelovsky M. Bioactive compounds of softwood bark as potential agents against human diseases include the SARS-CoV-2 virus. *Biointerface Res. Appl. Chem.* 2021;12(5):5860–5869. <https://doi.org/10.33263/BRIAC125.58605869>
- Бибик И.В., Глинёва Ю.А. Перспективы использования экстракта из хвои сосны обыкновенной в производстве функциональных напитков. *Техника и технология пищевых производств.* 2012;1(24):9–13.
[Bibik I.V., Glineva Yu.A. Prospects of using pine needles extract in the production of functional drinks. *Food processing: techniques and technology.* 2012;1(24): 9–13. (In Russ.)]
- Журавлева Л.Н., Девятловская А.Н., Рубчевская Л.П. Древесная зелень сосны обыкновенной – перспективный источник биологически активных веществ. *Вестник КрасГАУ.* 2008;(3):166–169.
[Zhuravleva L.N., Devyatlovskaya A.N., Rubchevskaya L.P. The woody greens of scots pine as a promising source for biologically active substances. *Bulliten KrasSAU.* 2008;(3):166–169. (In Russ.)]
- Слепцов И.В., Рожина С.М. Эколого-географические особенности накопления метаболитов в хвое *Larix cajanderi* на территории Якутии. *Химия растительного сырья.* 2021;(2):275–280. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021028322>
- Konoreva L. et al. Metabolite profiling of the *Cladonia* lichens using gas chromatography-mass spectrometry. *Biochemical Systematics and Ecology.* 2019;85: 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2019.04.004>
- Gao Y. et al. Effects of D-pinitol on insulin resistance through the PI3K/Akt signaling pathway in Type 2 diabetes mellitus rats. *J. Agric. Food Chem.* 2015;63(26): 6019–6026. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b01238>
- Lee E. et al. Pinitol consumption improves liver health status by reducing oxidative stress and fatty acid accumulation in subjects with non-alcoholic fatty liver disease: A randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *The Journal of Nutritional Biochemistry.* 2019; 68:33–41. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2019.03.006>
- Zheng K. et al. Protective effect of pinitol against inflammatory mediators of rheumatoid arthritis via inhibition of protein tyrosine phosphatase non-receptor

- Type 22 (PTPN22). *Med. Sci. Monit.* 2017;23:1923–1932. <https://doi.org/10.12659/MSM.903357>
25. Lin T.-H. et al. D-pinitol inhibits prostate cancer metastasis through inhibition of $\alpha V\beta 3$ integrin by modulating FAK, c-Src and NF- κB pathways. *IJMS*. 2013; 14(5):9790–9802. <https://doi.org/10.3390/ijms14059790>
26. Kim J.-I. et al. Effects of pinitol isolated from soybeans on glycaemic control and cardiovascular risk factors in Korean patients with type II diabetes mellitus: a randomized controlled study. *Eur. J. Clin. Nutr.* 2005; 59(3):456–458. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602081>
27. Pintaudi B., Di Vieste G., Bonomo M. The effectiveness of myo-inositol and D-chiro-inositol treatment in Type 2 diabetes. *International Journal of Endocrinology*. 2016;2016:1–5. <https://doi.org/10.1155/2016/9132052>
28. Jariwalla R.J. Inositol hexaphosphate (IP6) as an anti-neoplastic and lipid-lowering agent. *Anticancer Res.* 1999;19(5A):3699–3702.
29. Xu Y. et al. Gallic Acid and Diabetes Mellitus: Its association with oxidative stress. *Molecules*. 2021.26(23): 7115. <https://doi.org/10.3390/molecules26237115>
30. Aglan H.A. et al. Gallic acid against hepatocellular carcinoma: An integrated scheme of the potential mechanisms of action from *in vivo* study. *Tumour Biol.* 2017;39(6):101042831769912. <https://doi.org/10.1177/1010428317699127>
31. Orthen B., Popp M. Cyclitols as cryoprotectants for spinach and chickpea thylakoids. *Environmental and Experimental Botany*. 2000;44(2):125–132. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(00\)00061-7](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(00)00061-7)
32. Fischer C., Höll W. Food reserves of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*. 1991;5(4):187–195.
33. Алексеев Р.З. и др. Предупреждение развития некроза при отморожениях с оледенением тканей. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015;8(1):35–41.
- [Alekseev R.Z., Tomsk M.I., Golderova A.S., Popov A.F., Alekseev Y.R., Semenova S.V. Preventing the development of necrosis in the frostbite with tissue glaciation. *International journal of applied and fundamental research*. 2015;8(1):35–41. (In Russ.)]
34. Gupta A., Soni R., Ganguli M. Frostbite – manifestation and mitigation. *Burns Open*. 2021;5(3):96–103. <https://doi.org/10.1016/j.burnso.2021.04.002>
35. Lehmuskallio E. Emollients in the prevention of frostbite. *International Journal of Circumpolar Health*. 2000.59(2):122–130.
36. Heisig M. et al. Frostbite Protection in mice expressing an antifreeze glycoprotein. *PLoS ONE* / ed. Bergmann A. 2015;10(2):e0116562. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116562>
37. Sun M.-L. et al. Promotion of wound healing and prevention of frostbite injury in rat skin by exopolysaccharide from the arctic marine bacterium *Polaribacter* sp. SM1127. *Marine Drugs*. 2020;18(1):48. <https://doi.org/10.3390/md18010048>
38. Патент 2678188 С1 Российская Федерация, МПК А61К 9/10, А61К 35/64, А61К 31/045. *Средство защиты кожи от холодового повреждения* / Ли Н.Г., Осаковский В.Л., Осаковский А.В. Заявитель ООО «Криопротект», заявл. 31.08.2018; опубл. 24.01.2019.
- [Patent 2678188 C1 Russian Federation, IPC A61K 9/10, A61K 35/64, A61K 31/045. *Product for protecting skin from cold damage* / Li N.G., Osakovsky V.L., Osakovsky A.V. Applicant LLC «Cryoproject», application 31.08.2018; publ. 24.01.2019.]
39. Vinokurov M., Tikhonov D. Is the increase in the incidence of Type 2 diabetes in Yakutia due to a decrease in cold exposure or dietary changes? *Siberian Research*. 2022;7(1):33–37. <https://doi.org/10.33384/26587270.2022.07.01.06e>

Об авторах

МИХАЙЛОВ Владислав Васильевич, инженер-исследователь, Author ID: 57290621700, Researcher ID: AAC-2800-2022, <https://orcid.org/0000-0003-4498-7743>, e-mail: nethrezim@mail.ru

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Author ID: 57200540770, Researcher ID: J-7736-2018, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, e-mail: neroxasg@mail.ru

РОЖИНА Сахаяна Михайловна, младший научный сотрудник, Author ID: 57208332809, Researcher ID: AAO-3383-2020, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

КЕРШЕНГОЛЫЦ Борис Моисеевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, профессор, Author ID: 55604639100, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kershen@mail.ru

Аффилиация

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 41, Российская Федерация

About the authors

MIKHAILOV, Vladislav Vasilevich, Research Engineer, Author ID: 57290621700, Researcher ID: AAC-2800-2022, <https://orcid.org/0000-0003-4498-7743>, e-mail: nethrezim@mail.ru

SLEPTSOV, Igor Vitalevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Biology), Author ID: 57200540770, Researcher ID: J-7736-2018, <https://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, e-mail: neroxasg@mail.ru

ROZHINA, Sakhayana Mikhaylovna, Junior Researcher, Author ID: 57208332809, Researcher ID: AAO-3383-2020, <https://orcid.org/0000-0001-7223-9297>, e-mail: sahayana-rozhina@mail.ru

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Chief Researcher, Dr. Sci. (Biology), Professor, Author ID: 55604639100, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kershen@mail.ru

Affiliation

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 41 Lenin pr., Yakutsk 677980, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 25.08.2022

Поступила после рецензирования / Revised 28.09.2022

Принята к публикации / Accepted 20.10.2022

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.073

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-618-630>

Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена

А. П. Васильев[✉], Т. С. Стручкова, Н. Н. Лазарева, А. В. Никитина, А. Г. Алексеев

*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
г. Якутск, Российская Федерация
[✉]gtvap@mail.ru*

Аннотация

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) представляют большой интерес из-за термической стабильности, высокой химической, коррозионной стойкости и отличных антифрикционных свойств. В работе приведены результаты исследования влияния углеродных волокон (УВ) совместно с дисульфидом молибдена (MoS_2) с ультразвуковой обработкой на физико-механические и трибо-технические свойства, а также на структуру ПТФЭ. Полимерные композиционные материалы получены по известной технологии переработки ПТФЭ: метод холодного прессования и спекания. Выявлено, что ультразвуковая обработка MoS_2 – более эффективный способ активации наполнителя по сравнению с механоактивацией. Результаты физико-механических исследований показали, что прочностные свойства при растяжении ПКМ остаются на уровне ненаполненного ПТФЭ, напряжение при сжатии увеличилось на 75 %, а твердость повысилась на 48 % по сравнению с исходным полимером. Структурными исследованиями показано достаточно равномерное распределение волокон в объеме полимера и изотропное армирование материала. Степень кристалличности ПКМ повысилась на 9–11 % относительно исходного полимера. Разработанные композиционные материалы характеризуются низкой скоростью массового изнашивания композитов и низким значением коэффициента трения. Микроскопическими исследованиями поверхности трения ПКМ выявлено, что УВ и MoS_2 локализуются на поверхности трения и защищают материал от изнашивания. Разработанные материалы могут быть предложены в качестве деталей в узлах трения, где ограничено применение смазочных масел или его использование недопустимо.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, углеродные волокна, дисульфид молибдена, структура, коэффициент трения

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ – НИР № FSRG–2020–0017. В исследовании использовано оборудование ЦКП СВФУ.

Для цитирования: Васильев А.П., Стручкова Т.С., Лазарева Н.Н., Никитина А.В., Алексеев А.Г. Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):618–630. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-618-630>

Effect of molybdenum disulphide and carbon fibers on the properties and structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene

A. P. Vasilev[✉], T. S. Struchkova, N. N. Lazareva, A. V. Nikitina, A. G. Alekseev

*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation
[✉]gtvap@mail.ru*

Abstract

Polymer composite materials (PCM) based on polytetrafluoroethylene (PTFE) are of great research interest due to their thermal stability, high chemical and corrosion resistance and excellent anti-friction properties. This paper pre-

sents the results of a study on the effect of carbon fibers (CF) along with molybdenum disulfide (MoS₂) with ultrasonic treatment on the mechanical and tribological properties, as well as on the structure of PTFE. Polymer composite materials were obtained according to the well-known technology for processing PTFE: the method of cold pressing and sintering. We found that ultrasonic treatment of MoS₂ is a more effective way to activate the filler compared to mechanical activation. Based on the results of physical and mechanical studies, we demonstrated that the tensile strength properties of PCM remained at the level of unfilled PTFE, the compressive stress increased by 75 %, and the hardness increased by 48 % compared to the original polymer. Structural studies have shown a fairly uniform distribution of fibers in the bulk of the polymer and isotropic reinforcement of the material. The degree of crystallinity of PCM increased by 9–11 % relative to the initial polymer. The developed composite materials are characterized by a low mass wear rate of composites by 1100 times and a low value of the friction coefficient. Microscopic studies of the friction surface of PCM revealed that hydrocarbons and MoS₂ are localized on the friction surface and protect the material from wear. The developed materials can be offered as parts in friction units, where the use of lubricating oils is limited or its use is unacceptable.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fibers, molybdenum disulfide, polymer composite materials, structure, coefficient of friction

Funding. This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant number [FSRG-2020-0017]). We used the equipment of Shared core facilities of the NEFU.

For citation: Vasilev A.P., Struchkova T.S., Lazareva N.N., Nikitina A.V., Alekseev A.G. Effect of molybdenum disulphide and carbon fibers on the properties and structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):618–630. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-618-630>

Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) и полимерные композиционные материалы (ПКМ) на его основе широко применяют в промышленности, что связано с уникальным комплексом эксплуатационных свойств матрицы: высокая температурная стабильность, низкий коэффициент трения и химическая стойкость в агрессивных средах [1]. В качестве наполнителей для ПТФЭ используют различные виды наполнителей: углеродные волокна, графит, стекловолокна, дисульфид молибдена, оксиды металлов и др. [2, 3]. Однако в ряде работ показано, что при введении наполнителей в ПТФЭ характерно существенное снижение прочностных характеристик с увеличением содержания наполнителя из-за отсутствия необходимого адгезионного сродства между неорганическим наполнителем и полимером [4, 5]. В связи с этим актуальными остаются исследования, направленные на получение ПКМ с улучшенным комплексом физико-механических и триботехнических характеристик.

Углеродные волокна (УВ) обладают высокой прочностью и модулем упругости, кроме того, волокна характеризуются термостойкостью и химической инертностью [6]. УВ являются армирующими материалами, придающими полимерной матрице высокую прочность и модуль упругости, а также улучшают износостойкость [7]. В композиционных материалах, усиленных УВ, физико-механические свойства сильно зависят от

межфазного взаимодействия на границе раздела фаз волокно–матрица. Обычно улучшения адгезии на границе волокно–полимер достигают предварительным аппретированием волокон различными органическими соединениями. Но многие органические соединения не подходят для модификации волокон, вводимых в ПТФЭ, так как не выдерживают температуру спекания полимера (360–380 °С). Оригинальный способ модифицирования углеродных волокон плазмохимической обработкой в среде фторсодержащих соединений разработан и исследован в [8]. Показано существенное улучшение механических и триботехнических свойств ПТФЭ, наполненного модифицированным УВ, по сравнению с ПКМ, содержащим волокна без модификации [9, 10].

Дисульфид молибдена (MoS₂), как и графит, является материалом со слоистой структурой, где каждый слой MoS₂ состоит из стопок S–Mo–S толщиной в три атома и отдельные двумерные (2D) слои связаны посредством ван-дер-ваальсового взаимодействия [11]. Слабые силы между прослойками дисульфида молибдена способствуют легкому скольжению по направлению приложенной нагрузки, что приводит к минимальному трению [12]. Благодаря этому MoS₂ применяется в качестве твердого смазочного материала, а также как антифрикционный наполнитель в полимерах. В ряде работ проведено исследование влияния MoS₂ на триботехнические

свойства ПТФЭ [13–15] и показана перспективность использования MoS_2 как наполнителя ПТФЭ, особенно при малом содержании (1 мас.%). Однако использование дисульфида молибдена как модифицирующей добавки в ПТФЭ-композитах с углеродным волокном при малых степенях наполнения рассмотрено в очень ограниченном количестве работ.

Целью работы является изучение влияния дисульфида молибдена с углеродными волокнами на свойства и структуру политетрафторэтилена.

Материалы и методы исследования

Полимерной матрицей служил ПТФЭ с размером частиц от 21 до 45 мкм и плотностью порошка примерно $\sim 2,16 \text{ г/см}^3$. Наполнители: дисульфид молибдена MoS_2 (производство Китай) представляет собой дисперсные чешуйчатые частицы со слоистой структурой и размером частиц $\sim 1 \text{ мкм}$; волокнистым наполнителем служили дискретные волокна марки «Белум» (Республика Беларусь) с диаметром волокна от 4,5 до 10,0 мкм и длиной от 50 до 500 мкм.

Образцы для исследования получали следующим образом: полимер с наполнителями смешивали в лопастном смесителе при комнатной температуре, затем смесь прессовали с удельной нагрузкой 50 МПа. Далее проводили спекание полученных заготовок в программируемой печи

SNOL 15/900 (Литва) при 375°C . Перед смешением MoS_2 предварительно активировали ультразвуковой обработкой (УЗ) в УЗ-диспергаторе ИЛ 100-6/4 (ИНЛАБ-Ультразвук, Россия), время воздействия 5 мин. Другим способом активации MoS_2 была механическая активация (МА) в планетарной мельнице «Активатор-2S» («Активатор», Россия), время воздействия МА составило 2 мин.

Физико-механические характеристики ПТФЭ и ПКМ исследовали по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527-2:2012), прочность при сжатии – по ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002) на испытательной машине Autograf AGS-J (Shimadzu, Япония). Испытания на трение и твердость ПТФЭ и ПКМ проводили на машине трения UMT-3 (CETR, США), где определяли скорость массового изнашивания, коэффициент трения (ГОСТ 11629-2017) и твердость методом вдавливания шарика (ГОСТ 4670-2015).

Рентгеновский порошковый дифрактометр ARL X'TRA «Thermo Scientific» (Швейцария), с рентгеновской трубкой с медным анодом ($\lambda\text{CuK}_\alpha = 0,154 \text{ нм}$) использовали для исследования структурных параметров исходного ПТФЭ и композитов на его основе. С помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-7800F (Jeol, Япония) исследовали надмолекулярную структуру ПТФЭ и ПКМ. Исследовали поверхность трения ПТФЭ и ПКМ на оптическом микроскопе Olympus BX-41 (Япония). Плотность образцов измеряли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139–69.

Таблица 1

Механические и триботехнические свойства ПТФЭ и ПКМ

Table 1

Mechanical and tribological properties of PTFE and PCM

Образец Sample	$\sigma_{\text{рм}}$, МПа $\sigma_{\text{ТС}}$, МПа	$\varepsilon_{\text{рр}}$, % $\varepsilon_{\text{ЕВ}}$, %	I, мг/ч I, mg/h	f
Исходный ПТФЭ	$21 \pm 1,5$	358 ± 31	110,0	0,21
ПТФЭ/ MoS_2	$16 \pm 1,2$	361 ± 29	23,4	0,25
ПТФЭ/ MoS_2 (УЗ)	$19 \pm 1,4$	366 ± 27	16,7	0,22
ПТФЭ/ MoS_2 (МА)	$13 \pm 1,1$	260 ± 22	51,2	0,20

Примечание. УЗ – ультразвуковая обработка; МА – механоактивация; $\sigma_{\text{рм}}$ – прочность при растяжении; $\varepsilon_{\text{рр}}$ – относительное удлинение при разрыве; I – скорость массового изнашивания; f – коэффициент трения.

Note. UT – ultrasound treatment; MA – mechanical activation; σ_{TS} – tensile strength; ε_{EB} – elongation at break; I – mass wear rate; f – coefficient of friction.

Результаты и обсуждение

С целью определения эффективного способа активации дисперсного наполнителя были изготовлены составы композитов ПТФЭ+1 мас.% MoS_2 с механоактивацией и УЗ-обработкой, проводили испытания на растяжение и трение (табл. 1).

Как видно из табл. 1, значение прочности при растяжении ПКМ с исходным MoS_2 снизилось на 23 %. Относительное удлинение при разрыве композита остается на значениях исходного полимера. Наблюдается снижение прочности при растяжении на 38 % и относительного удлинения на 27 % у композита ПТФЭ/ MoS_2 (МА) по сравнению с ненаполненным полимером. В случае ПТФЭ/ MoS_2 (УЗ) механические свойства сохраняются на уровне полимерной матрицы. Наименьшее значение скорости массового изна-

шивания зафиксировано у композита с ультразвуковой обработкой наполнителя, что в 6,5 раза ниже исходного ПТФЭ. Значение коэффициента трения композитов ПТФЭ/MoS₂ (УЗ) и ПТФЭ/MoS₂ (МА) сохраняется на уровне ненаполненного полимера. В случае ПТФЭ/MoS₂ без активации коэффициент трения выше на ~19 % относительно других композитов и исходного ПТФЭ.

Подобное изменение механических свойств ПКМ можно объяснить тем, что при ультразвуковом воздействии MoS₂ происходит разрушение агломератов частиц, благодаря этому наполнитель равномерно распределяется в полимерной матрице. В случае композита без предварительной обработки наполнителя ПТФЭ/MoS₂ и ПТФЭ/MoS₂

(МА) возможно присутствие агломератов наполнителя при введении в полимер, что в дальнейшем отрицательно влияет на деформационно-прочностные и антифрикционные свойства ПКМ.

Исходя из полученных результатов, для дальнейших исследований был выбран состав композита ПТФЭ+1 мас.% MoS₂ с УЗ-обработкой, к которому добавили углеродные волокна в количестве от 1 до 10 мас.%, результаты исследования физико-механических свойств представлены на рис. 1.

Из рис. 1, а видно, что независимо от содержания УВ+MoS₂ значение прочности при растяжении ПКМ не изменяется по сравнению с исходным ПТФЭ. Однако, показатель относитель-

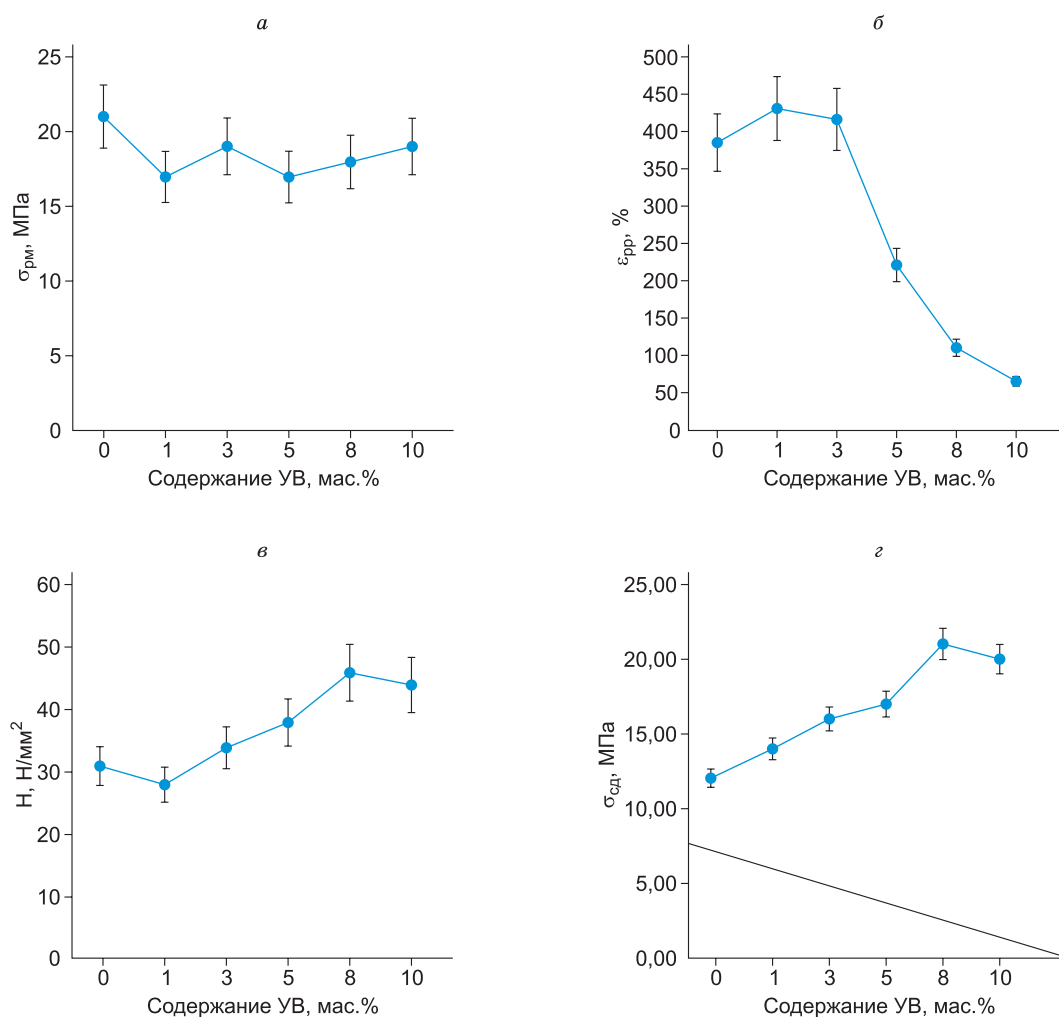


Рис. 1. Зависимость физико-механических свойств ПТФЭ и ПКМ от содержания наполнителей (УВ+1 мас.% MoS₂): а – прочность при растяжении; б – относительное удлинение при разрыве; в – твердость при вдавливании индентора; г – напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (10, %).

Fig. 1. Dependence of the mechanical properties of PTFE and PCM on the content of fillers (CF+1 wt.%MoS₂): (а) tensile strength; (б) elongation at break; (в) hardness; (г) compressive stress at a specified relative strain (10, %).

ного удлинения при разрыве ПКМ снижается при содержании 5–10 мас.% УВ. Резкое уменьшение относительного удлинения при разрыве с увеличением содержания наполнителя свидетельствует об образовании дефектов в полимере, что снижает способность к пластической деформации [5]. С повышением содержания УВ увеличивается прочность при сжатии ПКМ. Наибольшее значение прочности при сжатии зафиксировано в ПТФЭ+8 мас.% УВ+MoS₂, что на 75 % выше ненаполненного ПТФЭ. Показатель твердости ПКМ повысился на 35–48 % по сравнению с исходным ПТФЭ при содержании 8–10 мас.% УВ. Повышение твердости при вдавливании индентора и напряжения при сжатии разработанных материалов можно объяснить армирующим действием модифицированных УВ [16].

Для объяснения подобных изменений свойств были проведены исследования влияния наполнителей (УВ+MoS₂) на надмолекулярную структуру исходного ПТФЭ и композитов в зависимости от содержания волокон методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 2).

Надмолекулярная структура исходного ПТФЭ (рис. 2, а) имеет характерную ламеллярную структуру, типичную для полимерной матрицы [17]. В ПКМ с содержанием наполнителей УВ+MoS₂ происходит изменение надмолекулярной структуры от ламеллярной до сферолитоподобной. Видно, что УВ достаточно равномерно распределены в объеме композита (рис. 2, б–е). С увеличением массового содержания УВ в объеме ПКМ их становится больше, что коррелирует с повышением твердости и прочности при сжатии.

Твердый смазочный наполнитель MoS₂ также распределен достаточно равномерно в объеме материала; видимых признаков агломерации частиц в композитах не выявлено. Адгезионное взаимодействие УВ с плазмохимической модификацией поверхности к полимерной матрице достаточно сильная, в структуре граничной области не зарегистрированы дефекты [18].

Рентгеноструктурный анализ (РСА) применяется для изучения параметров кристаллической структуры в аморфно-кристаллических полимерах. Дифракционные кривые всех композиционных материалов, полученных методом РСА, приведены на рис. 3. На дифракционных кривых большой пик при угле дифракции ~18,0° и три небольших пика дифракции при 31,7°, 36,9°

и 41,4° относятся к ПТФЭ [19]. Кроме того, в композитах выявлен новый пик в области 2θ ~ 14°, который относится к дисульфиду молибдена [20].

На рис. 4 приведены результаты исследования плотности композитов, полученных методом гидростатического взвешивания, степени кристалличности композитов методом РСА и средних размеров кристаллитов, рассчитанных по методу Шеррера, ПТФЭ и ПКМ в зависимости от содержания УВ+1 мас.% MoS₂.

Из рис. 4, а видно, что плотность ПКМ монотонно снижается с увеличением содержания волокон от 1 до 10 мас.%. Наименьшее значение плотности зафиксировано у ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% MoS₂ – на 6 % ниже плотности полимерной матрицы. Изменение значений плотности ПКМ в зависимости от содержания волокон связано с низкой плотностью УВ (~1,45 г/см³) и разрыхлением надмолекулярной структуры композита (см. рис. 2), похожие результаты ранее обсуждались в [21].

Как видно из рис. 4, б, степень кристалличности всех композитов повысилась на 9–11 % относительно ненаполненного полимера. В ранее проведенной работе [21] было показано, что степень кристалличности ПКМ зависит от содержания волокон и возрастает с увеличением их содержания, чего не наблюдается в данной работе. Поэтому для объяснения подобного изменения степени кристалличности был исследован композит ПТФЭ/MoS₂ (УЗ), где α составляет 56 %, что на 5 % ниже исходного ПТФЭ. В то же время средние размеры кристаллитов уменьшаются с увеличением содержания волокон. Возможно, частицы MoS₂ подавляют процессы кристаллизации, из-за этого степень кристалличности композитов сохраняется на одном уровне и не зависит от содержания волокон, а повышение физико-механических характеристик связано, по видимому, с эффектом упрочнения матрицы модифицированными волокнами.

На рис. 5 приведены результаты исследования скорости массового изнашивания и величин коэффициента трения исходного ПТФЭ и композитов в зависимости от содержания наполнителей (УВ+MoS₂).

Как видно из рис. 5, а, износостойкость композитов резко увеличивается по сравнению с исходным полимером. С увеличением содержания УВ наблюдается монотонное снижение скорости

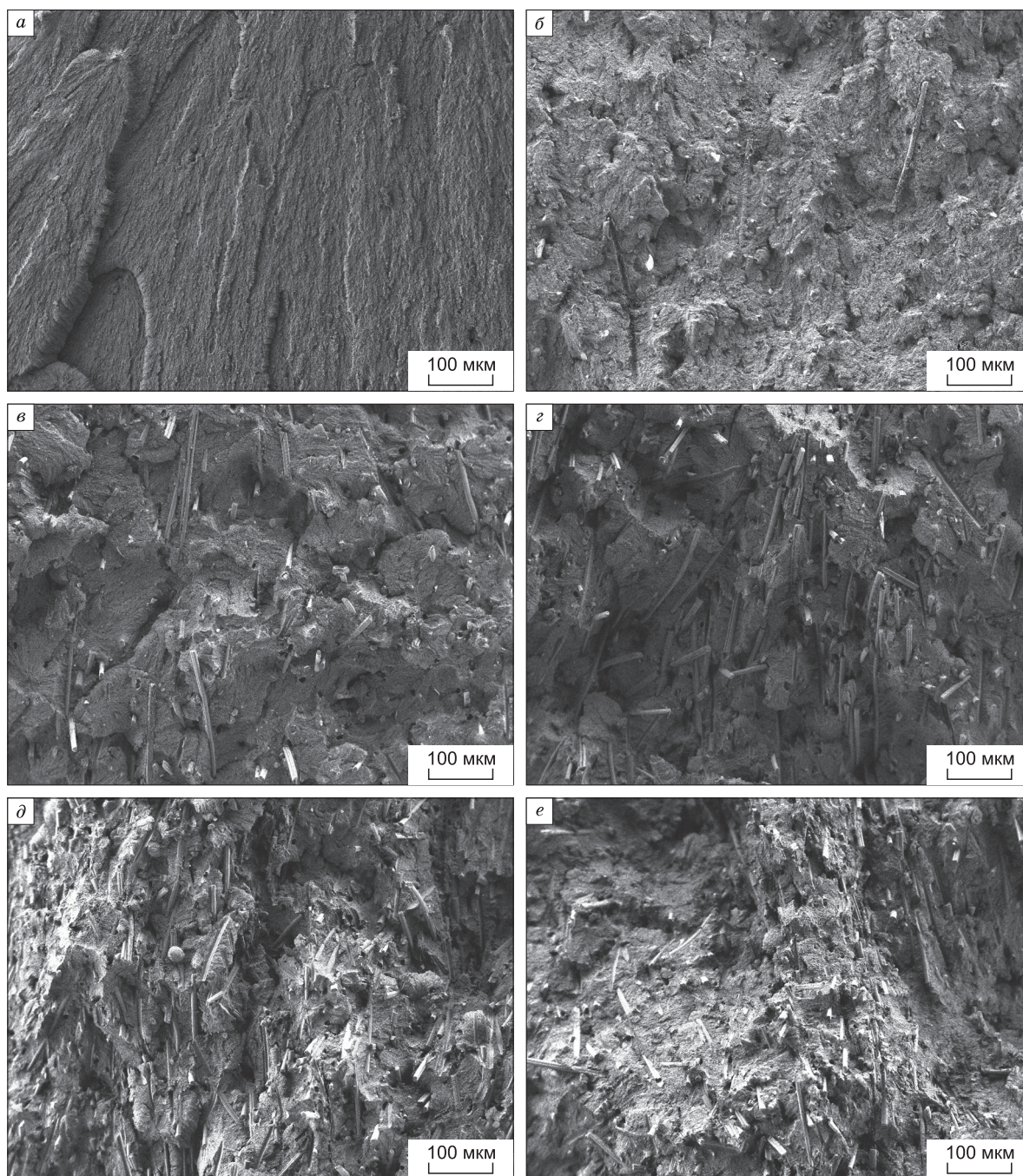


Рис. 2. Электронные микрофотографии образцов ПТФЭ и ПКМ: а – исходный ПТФЭ; б – 1 мас.% УВ+MoS₂; в – 3 мас.% УВ+MoS₂; г – 5 мас.% УВ+MoS₂; д – 8 мас.% УВ+MoS₂; е – 10 мас.% УВ+MoS₂.

Fig. 2. SEM-micrographs of PTFE and PCM samples: а) initial PTFE; б) 1 wt% CF+MoS₂; в) 3 wt.% CF+MoS₂; г) 5 wt.% CF+MoS₂; д) 8 wt% CF+MoS₂; е) 10 wt% CF+MoS₂.

массового изнашивания от 1 до 8 мас.%. Скорость массового изнашивания ПКМ снижается в 189–380 раз по сравнению с исходным ПТФЭ. Композит ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% MoS₂ характеризуется максимальным снижением скорости массового изнашивания, что в 1100 раз

ниже исходного ПТФЭ и в 167 раз ниже по сравнению с композитом, содержащим только дисульфид молибдена с ультразвуковой обработкой (см. табл. 1).

В композитах с 1–3 мас.% УВ+1 мас.% MoS₂ значение коэффициента трения снизилось на

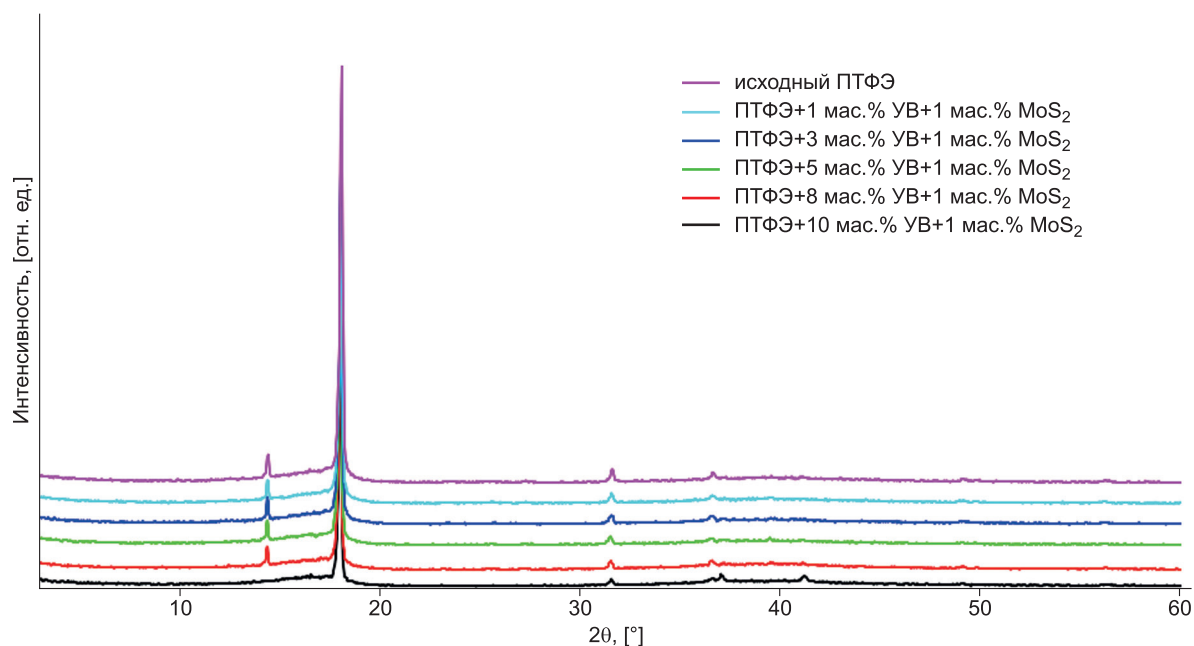


Рис. 3. Рентгеновские дифракционные кривые ПТФЭ и ПКМ.

Fig. 3. X-ray diffraction curves of PTFE and PCM.

14–24 % по сравнению с полимерной матрицей. В композитах при повышении волокнистого наполнителя от 5 до 10 мас.% приводит к повышению коэффициента трения до значений исходного ПТФЭ. Таким образом, разработанные материалы можно отнести к материалам антифрикционного назначения из-за высокой износостойкости и низкого коэффициента трения. Такие материалы можно предложить в качестве подшипников скольжения, втулок, направляющих лент и уплотнений в узлах трения, где ограничено или недопустимо применение смазочных масел.

На рис. 6 представлены результаты исследования поверхности трения ПТФЭ и композитов в зависимости от содержания наполнителей на оптическом микроскопе.

Как видно из рис. 6, а, на поверхности трения исходного ПТФЭ можно наблюдать следы царапин и пластического течения, это говорит о том, что доминирующим фактором изнашивания является процесс пластического течения в поверхностных слоях [22]. Такой механизм изнашивания исходного ПТФЭ согласуется с известными данными: поскольку полимер является достаточно мягким материалом, наличие неровностей на контртеле приводит к образованию и движению дислокаций, плотность которых увеличивается [23]. Соответственно, в процессе трения

в поверхностном слое полимера происходит зарождение и рост подповерхностных трещин, приводящих к образованию крупных пластинчатых продуктов износа. Таким образом, износостойкость исходного ПТФЭ очень низкая. На поверхности трения всех ПКМ наблюдаются углеродные волокна, которые хаотично ориентированы, как и в объеме композита (см. рис. 2), а частицы MoS_2 достаточно равномерно распределены между этими волокнами. Видно, что с увеличением концентрации волокон в ПТФЭ их на поверхности трения становится больше, что согласуется с результатами исследования скорости массового изнашивания. Следовательно, волокна и частицы MoS_2 , локализованные на поверхности трения, защищают материал от изнашивания. Так, твердые частицы наполнителя сдерживают зарождение и рост подповерхностных трещин, что приводит к повышению износостойкости композитов и уменьшению размеров продуктов износа. Кроме того, есть основания полагать, что частицы MoS_2 , имеющие чешуйчатую форму частиц и равномерно распределенные, препятствуют прямому контакту волокон с контртелом, что вносит вклад в улучшение антифрикционных свойств композитов [3]. Таким образом, выявленные на поверхности трения ПКМ частицы MoS_2 способствуют сохранению

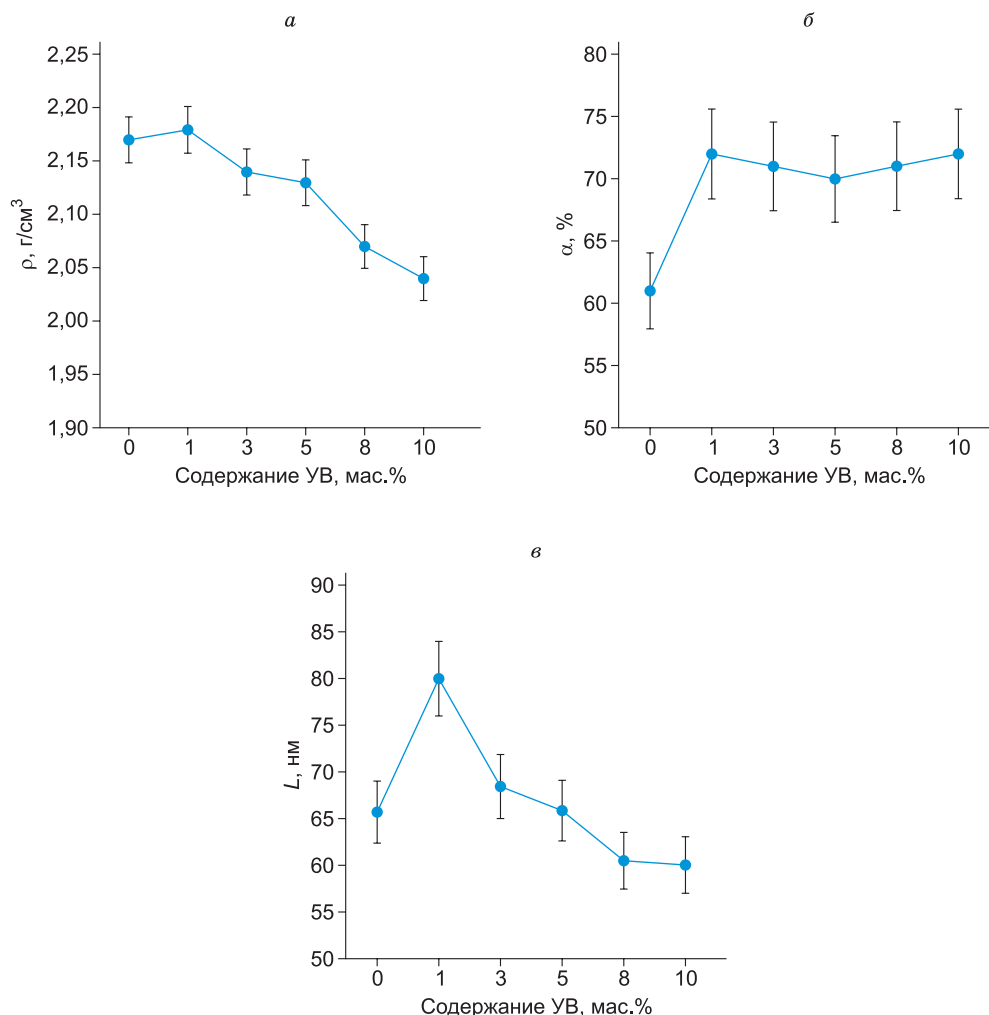


Рис. 4. Зависимость плотности (а), степени кристалличности (б) и средних размеров кристаллитов (в) ПТФЭ и ПКМ от содержания наполнителей (УВ+1 мас.% MoS₂).

Fig. 4. Dependence of density (а), degree of crystallinity (б) and average sizes of crystallites (в) of PTFE and PCM on content fillers (CF+1 wt.% MoS₂).

низкого коэффициента трения на уровне исходного ПТФЭ.

Сравнение триботехнических характеристик является сложной задачей из-за использования различных схем трения, режимов нагрузок и скоростей скольжения. Тем не менее можно провести сравнение, используя показатель – интенсивность изнашивания, показывающее отношение значения объемного износа к пути, на котором происходило это изнашивание.

В табл. 2 приведены результаты триботехнических свойств ПТФЭ, наполненного бинарными и многокомпонентными наполнителями, включая сравнение с результатами, полученными ранее. Для сравнения скорость массового изнаши-

вания переведена в интенсивность изнашивания по следующей 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/см³, – плотность образцов.

Из табл. 2 видно, что разработанный материал состава ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% MoS₂ не уступает по износостойкости и коэффициенту трения зарубежным аналогам со стекловолокном и УВ. По сравнению с ПТФЭ+10 мас.% УВ износостойкость разработанного материала выше в 3,3 раза, а по сравнению с ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% WS₂ – в 2 раза при сохранении

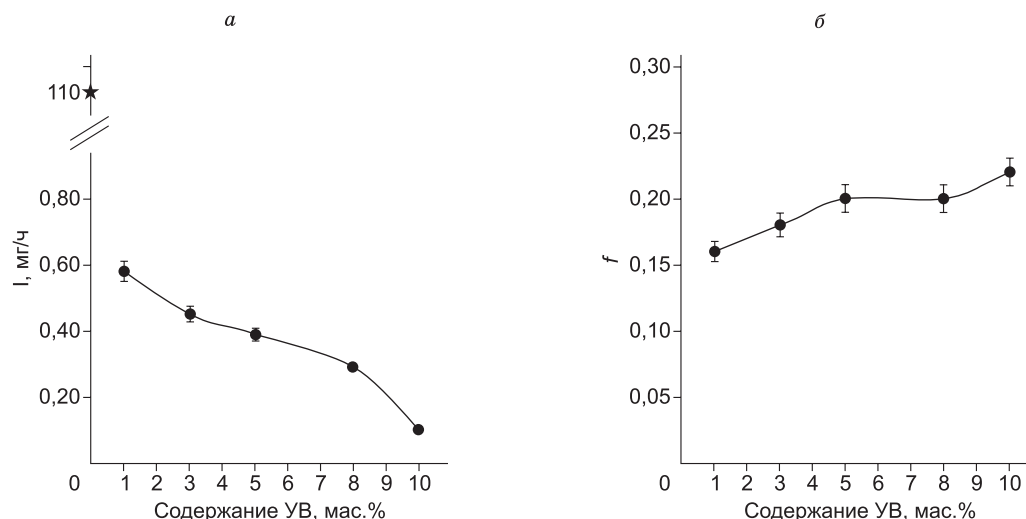


Рис. 5. Зависимость скорости массового изнашивания (*a*) и коэффициента трения (*б*) образцов ПТФЭ и композитов от содержания наполнителей (УВ+1 мас.% MoS₂)

Fig. 5. Dependence of the mass wear rate (*a*) and friction coefficient (*б*) of samples of PTFE and polymer composites on the content of fillers (CF + 1 wt.% MoS₂)

низкого коэффициента трения. Кроме того, разработанный материал по интенсивности изнашивания показывает лучшие результаты по сравнению с высоконаполненными материала-

ми. Таким образом, разработанные композиционные материалы могут быть использованы в узлах трения без использования смазочных материалов.

Таблица 2

Интенсивность изнашивания и коэффициент трения композитов на основе ПТФЭ

Table 2

Wear rate and friction coefficient of PTFE-based composites

Образец Sample	Схема трения Contact Type	$k, \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ $k, \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$	f	Источник References
ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% MoS ₂	Палец-диск Pin-On-Disk	0,36	0,22	Данная работа Present work
ПТФЭ+СВ+MoS ₂ +талк	Вал – частичный вкладыш Block-On-Ring	5,0	0,18	[24]
ПТФЭ+12 мас.% УВ+3 мас.% MoS ₂	Вал – частичный вкладыш Block-On-Ring	–	~0,13	[25]
ПТФЭ+10 мас.% УВ+1 мас.% WS ₂	Палец-диск Pin-On-Disk	0,74	0,19	[26]
ПТФЭ+10 мас.% УВ	Палец-диск Pin-On-Disk	1,19	0,39	[26]
ПТФЭ+20 об.% УВ+5 об.% MoS ₂	Вал – частичный вкладыш Block-On-Ring	1,58	0,11	[27]
5 мас.% MoS ₂ +20 мас.% СВ ПТФЭ	Палец-диск Pin-On-Disk	~0,7	0,21	[28]

Примечание. *k* – интенсивность изнашивания; СВ – стекловолокно.

Note. *k* – wear rate; GF – glass fiber.

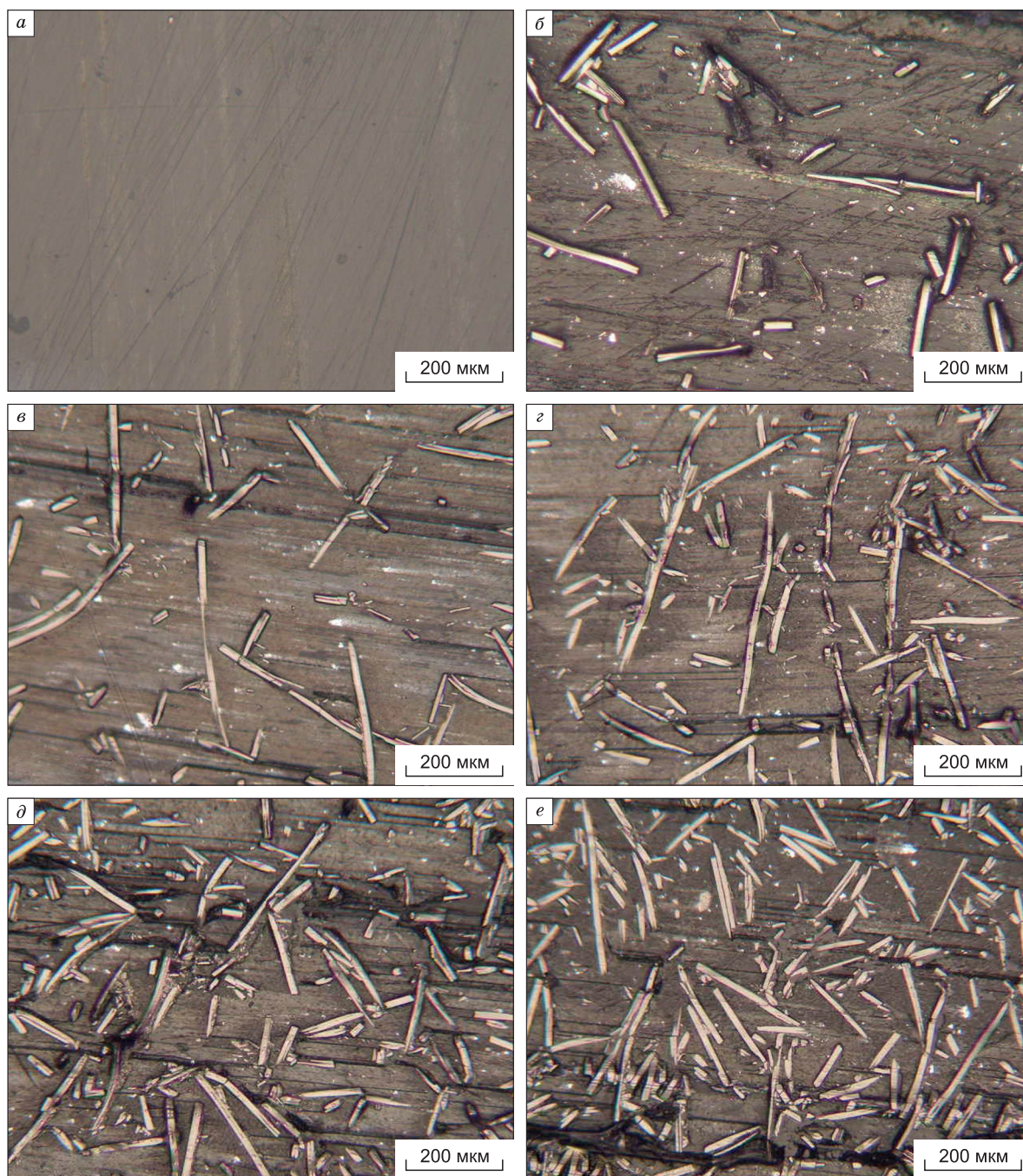


Рис. 6. Оптические изображения поверхностей трения образцов: а – исходный ПТФЭ; б – 1 мас.% УВ+MoS₂; в – 3 мас.% УВ+MoS₂; г – 5 мас.% УВ+MoS₂; д – 8 мас.% УВ+MoS₂; е – 10 мас.% УВ+MoS₂.

Fig. 6. Optical micrographs of the friction surface of samples: а) initial PTFE; б) 1 wt% CF+MoS₂; в) 3 wt.% CF+MoS₂; г) 5 wt.% CF+MoS₂; д) 8 wt% CF+MoS₂; е) 10 wt% CF+MoS₂.

Закключение

В работе исследовано совместное влияние углеродных волокон с дисульфидом молибдена с ультразвуковой обработкой на свойства и структуру политетрафторэтилена. Введение УВ (1–

10 мас.%) с MoS₂ (1 мас.%) с УЗ-обработкой в ПТФЭ приводит к сохранению прочности при растяжении на значениях исходного полимера, при этом относительное удлинение при разрыве существенно снижается. Прочность при сжатии

повысилась на 75 %, а твердость – на 48 % по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Улучшение физико-механических свойств ПКМ обусловлено достаточно равномерным распределением введенных наполнителей в объеме матрицы и сильной адгезией между модифицированным волокном и полимерной матрицей. Структурные исследования ПКМ показали повышение степени кристалличности методом РСА на 9–11 %. Введение наполнителей в ПТФЭ приводит к снижению плотности и средних размеров кристаллитов с увеличением содержания наполнителей. Испытания на трение показали повышение износостойкости ПКМ в 189–1100 раз относительно исходного ПТФЭ при сохранении низкого коэффициента трения. Повышение износостойкости ПКМ обусловлено тем, что твердые частицы наполнителя сдерживают зарождение и рост подповерхностных трещин, и это приводит к повышению износостойкости композитов. Зарегистрированные на поверхности трения ПКМ частицы MoS_2 способствуют сохранению низкого коэффициента трения.

Разработанные материалы по своим триботехническим характеристикам не уступают, а в ряде случаев превосходят зарубежные аналоги и благодаря низкой скорости массового изнашивания и коэффициента трения могут быть применены в узлах трения с ограниченным использованием смазочных масел или при их отсутствии.

Список литературы / References

1. Theiler G., Hübner W., Gradt T., Klein P., Friedrich K. Friction and wear of PTFE composites at cryogenic temperatures. *Tribology International*. 2002;35(7):449–458. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00035-X)
2. Tanaka K., Kawakami S. Effect of various fillers on the friction and wear of polytetrafluoroethylene-based composites. *Wear*. 1982;79(2):221–234. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90170-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90170-3)
3. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E.I. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*. 2002;(252)5–6:361–369. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00859-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00859-6)
4. Zhang F., Zhang J., Zhu Y., Wang X., Jin Y. Microstructure and properties of polytetrafluoroethylene composites modified by carbon materials and aramid fibers. *Coatings*. 2020;10(11):1103. <https://doi.org/10.3390/coatings10111103>
5. Mazur K., Gądek-Moszczak A., Liber-Kneć A., Kuciel S. Mechanical behavior and morphological study of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites under static and cyclic loading condition. *Materials*. 2021;14(7):1712. <https://doi.org/10.3390/ma14071712>
6. Bijwe J., Neje S., Indumathi J., Fahim M. Friction and wear performance evaluation of carbon fibre reinforced PTFE composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2002;21(13):1221–1240. <https://doi.org/10.1177/073168402128987743>
7. Friedrich K., Chang L., Hauptert F. *Current and future applications of polymer composites in the field of tribology*. London: Springer. 2011:129–167. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-166-0_6
8. Shelestova V.A., Grakovich P.N., Zhandarov S.F. A fluoropolymer coating on carbon fibers improves their adhesive interaction with PTFE matrix. *Composite Interfaces*. 2011;18(5):419–440. <https://doi.org/10.1163/156855411X595834>
9. Grakovich P.N., Shelestova V.A., Shumskaja V.J., Shylko I.S., Gucev D.M., Bashlakova A.L., Celuev M. J. Influence of the type of carbon fiber filler on the physical-mechanical and tribological properties of PTFE composites. *Journal of Friction and Wear*. 2019;40(1):11–16. <https://doi.org/10.3103/S1068366619010069>
10. Shelestova V.A., Grakovich P.N., Shilko I.S., Brundukov A.S., Stratanovich V.A., Gutsev D.M., Ivanov L.F. The Tribotechnical properties of composites based on different grades of fluoroplastic-4 and carbon fibers. *Journal of Friction and Wear*. 2021;42(2):75–79. <https://doi.org/10.3103/S1068366621020094>
11. Song I., Park C., Choi H. C. Synthesis and properties of molybdenum disulphide: from bulk to atomic layers. *RSC Advances*. 2015;5(10):7495–7514. <https://doi.org/10.1039/C4RA11852A>
12. John M., Menezes P. L. Self-lubricating materials for extreme condition applications. *Materials*. 2021;14(19):5588. <https://doi.org/10.3390/ma14195588>
13. Yan F., Xue Q., Yang S. Debris formation process of PTFE and its composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 1996;61(7):1223–1229. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19960815\)61:7<1223::AID-APP19>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19960815)61:7<1223::AID-APP19>3.0.CO;2-Y)
14. Suzuki M., Prat P. Synergism of an MoS_2 sputtered film and a transfer film of a PTFE composite. *Wear*. 1999;225–229:995–1003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00073-3)
15. Aderikha V.N., Krasnov A.P., Shapovalov V.A., Golub A.S. Peculiarities of tribological behavior of low-filled composites based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and molybdenum disulfide. *Wear*. 2014;320:135–142. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.09.004>
16. Lv M., Wang L., Liu J., Kong F., Ling A., Wang T., Wang Q. Surface energy, hardness, and tribological properties of carbon-fiber/polytetrafluoroethylene composites modified by proton irradiation. *Tribology International*. 2019;132:237–243. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.028>
17. Люкшин Б.А. [и др.] *Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2017. 311 с.

[Lyukshin B.A. *Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes*. Novosibirsk: Publishing House SB RAS; 2017. 311p. (In Russ.)]

18. Shelestova V.A., Zhandarov S.F., Danchenko S.G., Grakovich P.N. Surface modification of carbon fiber by fluoropolymer in a low-temperature plasma. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015;6(3):219–224. <https://doi.org/10.1134/S2075113315030107>

19. Zhang Y., Kou K., Pan C., Li Z., Ji T. Effect of tensile rates on thermal and mechanical properties of porous PTFE composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019;136(44):48175. <https://doi.org/10.1002/app.48175>

20. Štengl V., Henych J., Slušná M., Ecorchard P. Ultrasound exfoliation of inorganic analogues of graphene. *Nanoscale Research Letters*. 2014;9(1):167. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-167>

21. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Nikiforov L.A., Okhlopkova A.A., Grakovich P.N., Shim E.L., Cho J.H. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers. *Molecules*. 2019;24(2):224. <https://doi.org/10.3390/molecules24020224>

22. Zhao Y., Qi X., Ma J., Dong Y., Yang Y. Effects of polyimide/silica and polyimide/pores fillers on the morphology, thermal, mechanical, and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites. *Polymer Composites*. 2019;40(9):3438–3452. <https://doi.org/10.1002/pc.25205>

23. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ; 2013. 240 с.

[Mashkov Ju.K. *Tribophysics of metals and polymers: monograph*. Omsk: Izd-vo OmGTU; 2013. 240 p. (In Russ.)]

24. Jiang B., Zhu A., Zhang C., Li Y. Interface enhancement between polytetrafluoroethylene and glass fibers modified with a titanate coupler. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017;134(14). <https://doi.org/10.1002/app.44668>

25. Zhang K., Ji X., Mi Y., Gao L., Wang T. Effects of carbon fibers with different particle sizes on the physical properties of MoS₂-filled PTFE composites. *Philosophical Magazine Letters*. 2021;101(7):277–286. <https://doi.org/10.1080/09500839.2021.1917780>

26. Охлопкова А.А., Васильев А.П., Стручкова Т.С., Алексеев А.Г., Гракович П.Н. Влияние углеродных волокон и дисульфида вольфрама на свойства и структуру политетрафторэтилена. *Полимерные материалы и технологии*. 2018;4(3):26–34.

[Okhlopkova A.A., Vasilev A.P., Struchkova T.S., Alekseev A.G., Grakovich P.N. Influence of carbon fibers and tungsten disulfide on the properties and structure of polytetrafluoroethylene. *Polymer Materials and Technologies*. 2018;4(3):26–34. (In Russ.)]

27. Song F., Wang Q., Wang T. Effects of glass fiber and molybdenum disulfide on tribological behaviors and PV limit of chopped carbon fiber reinforced Polytetrafluoroethylene composites. *Tribology International*. 2016(104):392–401. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.015>

28. Homayoun M.-R., Golchin A., Emami N. Effect of hygrothermal ageing on tribological behaviour of PTFE-based composites. *Lubricants*. 2018;6(4):103. <https://doi.org/10.3390/lubricants6040103>

Об авторах

ВАСИЛЬЕВ Андрей Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Researcher ID: R-8924-2016, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>, e-mail: gtvap@mail.ru

СТРУЧКОВА Татьяна Семеновна, кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: E-5047-2014, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1491>, e-mail: sts_23@mail.ru

ЛАЗАРЕВА Надежда Николаевна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лаб. Researcher ID: E-5063-2014, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

НИКИТИНА Айгылаана Васильевна, студент, e-mail: nikitina.aigylaana@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Алексей Гаврильевич, старший преподаватель, Researcher ID: E-8150-2014, <http://orcid.org/0000-0001-5148-2837>, e-mail: alexalekseev.z@gmail.com

Аффилиация

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Институт естественных наук, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58, Российская Федерация

About the authors

VASILEV, Andrey Petrovich, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Researcher ID: R-8924-2016, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>, e-mail: gtvap@mail.ru

STRUCHKOVA, Tatyana Semenovna, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: E-5047-2014, <https://orcid.org/0000-0002-6469-1491>, e-mail: sts_23@mail.ru

А. П. Васильев и др. ♦ Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру...

LAZAREVA, Nadezhda Nikolaevna, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Head of the Laboratory, Researcher ID: E-5063-2014, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>, e-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

NIKITINA, Aigylaana Vasilievna, Student, e-mail: nikitina.aigylaana@mail.ru

ALEKSEEV, Alexsey Gavrilievich, Senior Lecturer, Researcher ID: E-8150-2014, <https://orcid.org/0000-0001-5148-2837>, e-mail: alexalekseev.z@gmail.com

Affiliation

Ammosov North-Eastern Federal University, Institute of Natural Science, 58 Belinsky st., Yakutsk 677000, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 23.07.2022

Поступила после рецензирования / Revised 15.09.2022

Принята к публикации / Accepted 12.10.2022

Полимерные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: структура и свойства

С. Н. Данилова✉, А. В. Оконешникова, А. А. Охлопкова

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉dsn.sakhayana@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования свойств и структуры сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) в зависимости от марок и молекулярной массы. Проведено сравнение марок СВМПЭ 510 и 517, синтезированных в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, и GUR марок 4022, 4130 и 4150 фирмы «Celanese» (Германия и Китай). Порошки перерабатывались по технологии горячего прессования в вулканизационном прессе в соответствии с ГОСТ 16337-77 с получением образцов для исследований. Изучение структуры полимеров проведено методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии. Результаты исследования морфологии порошков свидетельствуют, что порошки СВМПЭ состоят из кластеров более мелких субчастиц, связанных между собой фибриллами полимера. В то же время надмолекулярная структура СВМПЭ характеризуется формированием сферолитов, размеры которых уменьшаются с увеличением молекулярной массы. Рентгенограммы СВМПЭ показывают, что с увеличением молекулярной массы формируется более дефектная структура. Данное явление подтверждается методом дифференциально-сканирующей калориметрии. Выявлено уменьшение значений энтальпии плавления и степени кристалличности с увеличением молекулярной массы. Установлено, что значения степени кристалличности и плотности у СВМПЭ марки 517 российского производства сопоставимы с иностранными марками. При этом по физико-механическим и трибологическим параметрам данная марка не уступает иностранным аналогам: зарегистрированы повышение прочности при растяжении, которое достигает 45 МПа, и низкое значение скорости массового изнашивания, равное 0,07 мг/ч.

Ключевые слова: полимерный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, износостойкость, прочность
Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, НИР № FSRG–2020–0017. В исследовании использовано оборудование ЦКП Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Для цитирования: Данилова С.Н., Оконешникова А.В., Охлопкова А.А. Полимерные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: структура и свойства. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):631–642. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-631-642>

Polymer materials based on ultra-high molecular weight polyethylene: structure and properties

S. N. Danilova✉, A. V. Okoneshnikova, A. A. Okhlopkova

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉dsn.sakhayana@mail.ru

Abstract

This paper presents the results of a study of the properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) depending on grades and molecular weight. We compared the grades of UHMWPE 510 and 517 synthesized in the Federal Research Center Boreskov Institute of Catalysis, and GUR grades 4022, 4130 and 4150 from Celanese (Germany and China). Powders were processed according to the technology of hot pressing in a vulcanizing press in accordance with GOST 16337-77 to obtain samples for research. The structure of the polymers was studied by X-ray diffraction analysis and scanning electron microscopy. The study of powder morphology indicates that UHMWPE powders consist of clusters of smaller subparticles interconnected by polymer fibrils. At the same time, the

supramolecular structure of UHMWPE is characterized by the formation of spherulites, the size of which decreases with increasing molecular weight. X-ray patterns of UHMWPE show that with increasing molecular weight, a more defective structure is formed. This phenomenon is confirmed by the method of differential scanning calorimetry, a decrease in the values of the enthalpy of melting and the degree of crystallinity with increasing molecular weight was revealed. We established that the value of the degree of crystallinity and density of Russian-made brand 517 is comparable to foreign brands. In terms of physical, mechanical and tribological parameters, this brand is not inferior to foreign analogues, since it has a high tensile strength, which reaches up to 45 MPa, and a low mass wear rate of 0.07 mg/h.

Keywords: polymer material, ultra-high molecular weight polyethylene, wear resistance, strength

Funding. This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant number [FSRG-2020-0017]). We used the equipment of the Shared core facilities of the Ammosov North-Eastern Federal University.

For citation: Danilova S.N., Okonishnikova A.V., Okhlopko A.A. Polymer materials based on ultra-high molecular weight polyethylene: structure and properties. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):631–642. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-631-642>

Введение

Вопросы создания, изучения и использования полимерных материалов (ПМ) относятся к перспективной и интенсивно развивающейся области современного материаловедения. ПМ широко используются в качестве конструкционных материалов, в том числе антифрикционного назначения, для изготовления деталей наиболее ответственных узлов трения техники, эксплуатируемой в условиях ограниченной смазки, и деталей уплотнительных систем [1, 2]. Кроме того, из-за уникальных климатических условий Арктических регионов, Сибири, Дальнего Востока, в особенности Республики Саха (Якутия), существует необходимость разработки морозо- и износостойких материалов для эффективной работы техники и технологического оборудования, способных выдерживать экстремально низкие температуры. Экстремальные природно-климатические условия этих регионов затрудняют эксплуатацию технических систем, что сказывается на экономическом потенциале освоения больших запасов минерально-сырьевых ресурсов [3]. Как известно [4–6], сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает рядом уникальных характеристик, таких как высокая прочность, стойкость к истиранию, низкий коэффициент трения, высокая химическая инертность и стойкость. Известно [7], что изделия и детали из СВМПЭ могут эксплуатироваться при низких температурах, так как сохраняют высокую ударостойкость даже при $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ударную вязкость до $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Однако из-за сложившейся политической ситуации возникли проблемы с импортом СВМПЭ из других стран, в связи с чем стоит вопрос о переходе на российские аналоги. Ранее порош-

ки СВМПЭ на территории России получали на опытных установках предприятий ООО «Томск-нефтехим» (ОАО «Сибур Холдинг») и ОАО «Казаньоргсинтез» (ООО «Полинит») с производительной мощностью 1000 т/год [8]. В настоящее время внутренний рынок занимается переработкой импортного СВМПЭ и промышленное производство не налажено, а потребность с каждым годом растет. Исходя из этого, в данной работе проведен сравнительный анализ свойств и структуры СВМПЭ марки GUR фирмы Celanese с российскими аналогами, синтезированными в Институте катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук (ООО «Тинол»).

Материалы и объекты исследования

Исследованы марки (СВМПЭ) производства:

– *Celanese Corporation*: GUR-4022 (Китай) с молекулярной массой $5,0 \cdot 10^6$ г/моль; GUR-4130 (Германия) с молекулярной массой $6,7 \cdot 10^6$ г/моль; GUR-4150 (Германия) с молекулярной массой $8,7 \cdot 10^6$ г/моль.

– ООО «Тинол» (Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН) (Россия): п.И510Н с молекулярной массой $4,8 \cdot 10^6$ г/моль; п.517 с молекулярной массой $5,0 \cdot 10^6$ г/моль.

Порошки СВМПЭ сушили в печи «ПЭ-0041» («Экоприбор», Россия) при температуре $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1,5 ч для удаления адсорбированной воды. Образцы для исследований получали по технологии горячего прессования при температуре $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10 МПа, время выдержки 20 мин с последующим охлаждением под прессом до температуры $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Образцы для исследований изготовлены из порошков СВМПЭ без добавления наполнителей и без дополнительной модификации.

Физико-механические параметры определяли на универсальной разрывной машине «Autograph AGS-J» («Shimadzu», Япония) согласно ГОСТ 11262. Скорость движения подвижных захватов составляла 50 мм/мин, а количество образцов на каждую серию – 6. Модуль упругости определяли согласно ГОСТ 9550.

Трибологические параметры образцов исследовали на универсальной машине UMT-3 (CETR, США) при удельной нагрузке 1,9 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с по схеме трения «палец – диск» в течение 3 ч. Образцы имели диаметр $9,80 \pm 0,05$ мм и высоту $20,0 \pm 1,0$ мм. В качестве контртела использовали стальной диск из стали 45 с твердостью 45–50 HRC. Коэффициент трения определяли согласно ГОСТ 11629. Число параллельных испытаний на каждую серию – 3. В работе рассчитывали скорость изнашивания композитов ($\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$) по изменению объема образца при постоянной нагрузке и пути трения. Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139-69.

Статистическую обработку результатов исследований проводили по стандартной методике математической статистики в программе MS Excel. В работе использовался критерий Стьюдента при уровне надежности 0,95, при этом рассчитывали среднеквадратичное отклонение результатов измерений и доверительный интервал в каждой серии измерений.

Микрофотографии порошков и надмолекулярной структуры образцов получали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-7800F (Jeol, Япония) в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 1,0–1,5 кВ.

Рентгенограммы СВМПЭ снимали на рентгеновском порошковом дифрактометре марки ARL X'Tra (фирма Thermo Fisher Scientific, Zug, Швейцария). В качестве источника излучения использовали рентгеновскую трубку с медным анодом ($\lambda(\text{CuK}_\alpha) = 0,154$ нм). Углы сканирования от 3 до 60° с шагом сканирования $0,05^\circ$ и временем накопления в каждой точке 3 с в режиме отражения.

ИК-спектры образцов получали на ИК-спектрометре с фурье-преобразованием Varian 7000 FT-IR (Varian, США) с использованием приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в диапазоне $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$.

Термодинамические параметры исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия), погрешность измерения не более $\pm 0,1\%$, скорость нагревания – $20^\circ\text{C}/\text{мин}$, навеска образца – 18 ± 1 мг. Измерения проводили в среде гелия в температурном интервале $40\text{--}180^\circ\text{C}$.

Обсуждение результатов

Кристаллическая структура. Определение параметров кристаллической структуры образцов СВМПЭ после горячего прессования проводили с помощью метода РСА (рис. 1). Известно [9],

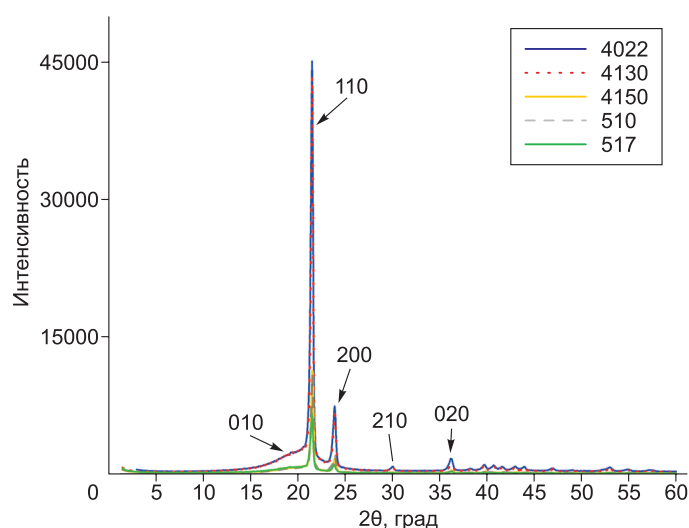


Рис. 1. Рентгенограммы СВМПЭ.

Fig. 1. X-ray diffraction patterns of UHMWPE.

Таблица 1
Степень кристалличности образцов СВМПЭTable 1
Degree of crystallinity of the UHMWPE samples

Показатель	Марки СВМПЭ				
	4022	4130	4150	510	517
Степень кристалличности	58	54	52	42	53
Плотность	0,93	0,93	0,93	0,91	0,93
Средняя молекулярная масса · 10 ⁶ , г/моль	5	6,7	8,7	4,8	5

что СВМПЭ кристаллизуется с образованием орторомбической, моноклинной и гексагональной форм решетки. При этом макромолекулы СВМПЭ в основном образуют орторомбическую элементарную ячейку с параметрами кристаллической решетки: $a = 7,42 \text{ \AA}$; $b = 4,95 \text{ \AA}$; $c = 2,44 \text{ \AA}$, углы ячеек составляют 90° [10].

Из рентгенограмм видно, что СВМПЭ характеризуется двумя интенсивными пиками при углах $2\theta - 21,52^\circ$ и $23,96^\circ$, которые относятся к двум плоскостям (200) и (110) кристаллической фазы орторомбической ячейки СВМПЭ. При этом малоинтенсивные рефлексы при больших углах 2θ представляют собой перекрытие плоскости (200) в кристаллической ячейке. Аморфное гало в области $2\theta \sim 19,12^\circ$ является отражением рефлекса (010) моноклинной формы СВМПЭ [11–13]. Гало аморфной фазы характерно для СВМПЭ, закристаллизовавшегося под нагрузкой во время горячего прессования [14].

Анализ рентгенограмм СВМПЭ показал, что марки 4022 и 4130 отличаются более интенсивными рефлексами кристаллических и аморфных составляющих по сравнению с марками 510 и 517. Положение и изменение интенсивности пиков зависит от условий полимеризации полимера, условий его переработки и т. д. В работе [15] показано, что при отверждении расплавленного порошка во время прессования наблюдается кристаллизация полимера с образованием преимущественно орторомбической ячейки. Различие интенсивностей рефлексов разных марок СВМПЭ связано с тем, что во время кристаллизации из-за высокой молекулярной массы затрудняется процесс релаксации проходных цепей в аморфных областях и вызывается дополнительное напряжение на образующихся кристаллитах [16].

В табл. 1 приведены результаты исследования степени кристалличности и плотности образцов СВМПЭ в зависимости от его средней молекулярной массы. Из таблицы видно, что с увеличением средней молекулярной массы СВМПЭ марки GUR наблюдается снижение степени кристалличности. Известно [17], что с увеличением молекулярной массы СВМПЭ увеличивается плотность запутывания макромолекул с образованием физически-сцепленных поперечных связей. Это объясняет снижение степени кристалличности по сравнению с низкомолекулярными аналогами полиэтилена, например, полиэтилен низкого давления имеет степень кристалличности, равную 75–90 % [18]. В случае СВМПЭ российского производства такой тенденции не наблюдается, что, возможно, обусловлено широким разбросом молекулярно-массового распределения и условием синтеза. Однако видно, что степень кристалличности у марки 517 «Тинол» аналогична значениям иностранных аналогов.

Таким образом, установлена зависимость кристаллической структуры образцов СВМПЭ от молекулярной массы и условий синтеза, которая выражается уменьшением степени кристалличности с увеличением молекулярной массы.

Морфология порошков и надмолекулярная структура СВМПЭ. Известно [19, 20], что выпускаемые промышленностью марки СВМПЭ различаются надмолекулярной структурой, размерами частиц и молекулярно-массовым распределением в зависимости от длины полимерных цепей и способа их самосборки. Размеры частиц играют немаловажную роль при формировании конечных свойств материала, особенно в случае наполненных полимерных композитов. Из рис. 2 и 3 видно, что порошки СВМПЭ состоят из агломерированных более мелких субчастиц, формирующихся из глобул в единое сетчатое образование. Длинные макромолекулы СВМПЭ свертываются, принимая энергетически выгодную форму в виде «сферы», что согласуется с работами других авторов [6, 21–24]. При этом видно, что эти субчастицы связаны между собой фибриллами, так называемыми узелками [24].

В случае СВМПЭ марки GUR (см. рис. 2) видно, что с увеличением молекулярной массы наблюдается уменьшение размеров порошка и изменение характера связывания субчастиц. Так, частицы СВМПЭ марки GUR 4022 и 4130 имеют практически одинаковый размер, в то время как

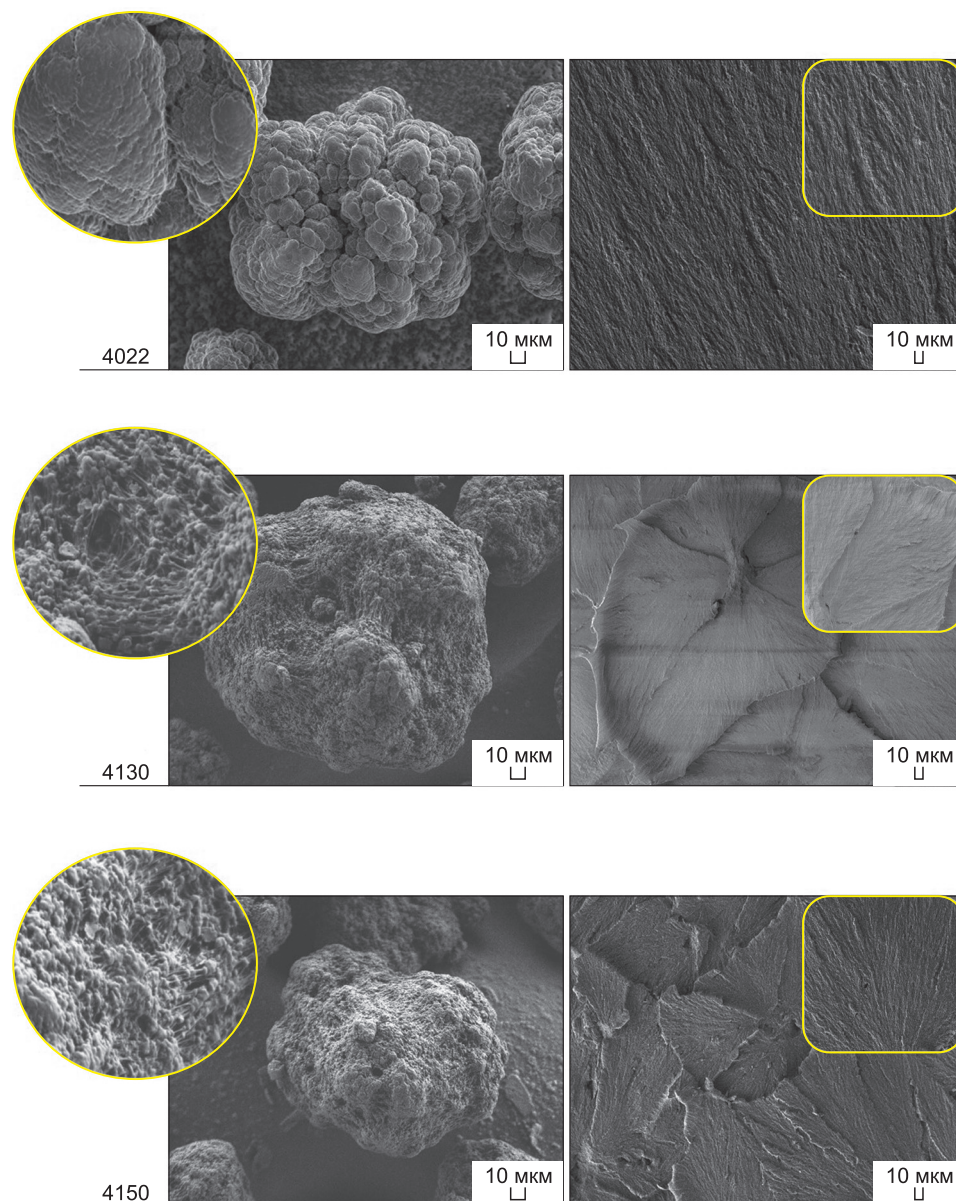


Рис. 2. Надмолекулярная структура образцов и морфология порошков СВМПЭ марок GUR.

Fig. 2. Supramolecular structure of samples and morphology of UHMWPE grades GUR powders.

частицы марки 4150 характеризуются меньшими размерами. В надмолекулярной структуре GUR 4022 видны выраженные большие элементы (субчастицы) с плотной упаковкой, которые связаны между собой короткими фибриллярными тяжами. Зафиксировано, что у порошков GUR 4130 и 4150 степень спутывания больше и в связывающих фибриллах наблюдается наличие островков ламелей в форме сфер и чешуек, а также наблюдается уменьшение размеров субчастиц. Из рисунка надмолекулярной структуры видно, что с увеличением молекулярной массы

наблюдается уменьшение структурных элементов «сферолитов». Радиальные сферолиты у GUR 4130 имеют вытянутые границы из-за выпрямления ламелей [25], тогда как у 4150 формируются мелкие сферолитные образования с формой «веера», которые перекрываются друг с другом.

Порошок СВМПЭ, синтезированный в Институте катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (см. рис. 3), отличается плотной упаковкой субчастиц, а фибриллярная сетка между глобулами слабо выражена по сравнению с порошками СВМПЭ марки GUR. При этом частицы имеют форму

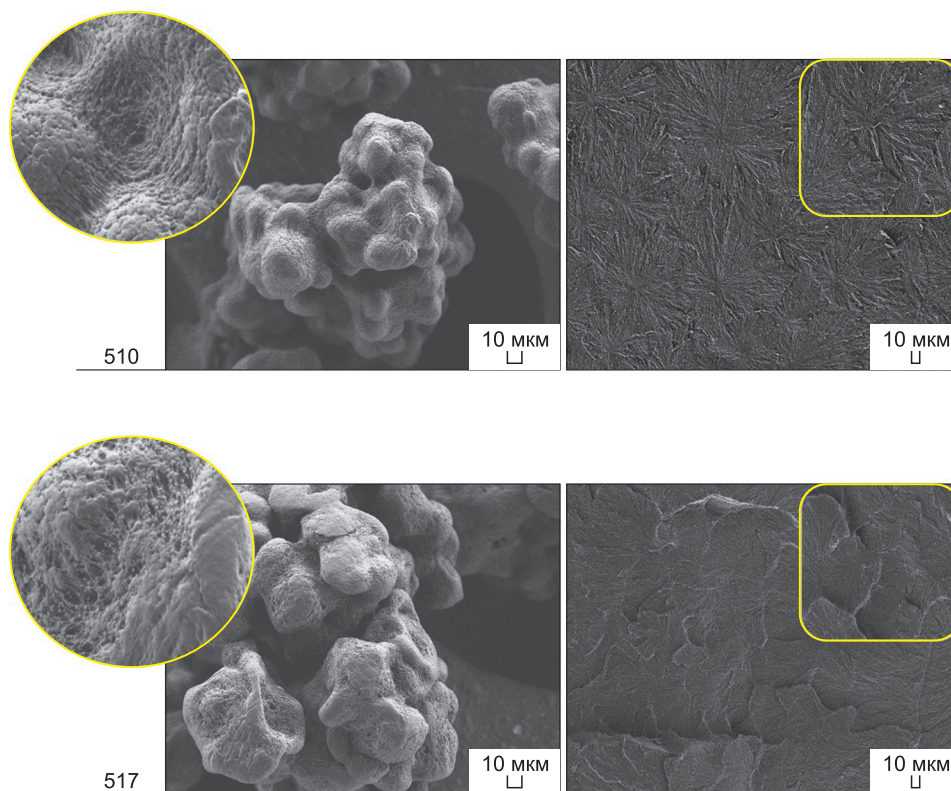


Рис. 3. Надмолекулярная структура образцов и морфология порошков СВМПЭ производства «Тинол».

Fig. 3. Supramolecular structure of samples and morphology of UHMWPE powders produced by «Tinol».

вытянутого сфероиды. Показано, что с увеличением молекулярной массы СВМПЭ марок 4130, 4150 к 510, 517 наблюдается увеличение размеров субчастиц. Исследование надмолекулярной структуры свидетельствует о том, что в структуре СВМПЭ марки 510 видны большие радиальные ламели, образующие сферолиты. У СВМПЭ марки 517 наблюдается формирование более мелких сферолитоподобных структур с неправильной формой.

В целом морфология порошков СВМПЭ определяется условиями синтеза: размерами катализаторов, их активностью, температурой полимеризации и т. д. В [26] показано, что появление фибриллярных элементов вызвано растягивающим напряжением на поверхности катализаторов в процессе полимеризации полиэтилена. Увеличение активности и размеров частиц катализатора приводит к повышению склонности полимера к образованию фибрилл и увеличению выхода продукта синтеза. В таких условиях происходит рост дефектности ламеллярных кристаллов и увеличение запутывания полимерных цепей, что согласуется со значениями степени кристалличности в табл. 1.

В свою очередь, надмолекулярная структура зависит от молекулярной массы СВМПЭ. В [27, 28] показано, что полимеры с высокой молекулярной массой начинают раньше кристаллизоваться, что обусловлено увеличением количества и плотности связующих молекул, тем самым повышается степень неупорядоченности. Полимеры с меньшей молекулярной массой начинают кристаллизоваться медленно, что приводит к формированию сферолитов больших размеров и правильной формы. Это согласуется с исследованиями надмолекулярной структуры как показано на рис. 1 и 2: с увеличением молекулярной массы у GUR и «Тинол» наблюдаются дефектные сферолиты.

Дифференциальная сканирующая калориметрия. С целью определения термодинамических параметров СВМПЭ в зависимости от молекулярной массы были проведены исследования методом ДСК. Результаты исследований образцов СВМПЭ после горячего прессования приведены на табл. 2.

Как видно из табл. 2, с увеличением молекулярной массы у СВМПЭ марки GUR отмечается снижение температуры плавления, энтальпии

плавления и степени кристалличности, а СВМПЭ российского производства отличается повышением этих характеристик, что согласуется с результатами РСА (см. табл. 1). Снижение этих параметров можно объяснить повышением вязкости расплава с увеличением молекулярной массы СВМПЭ.

Были проведены исследования степени кристалличности порошков СВМПЭ, результаты которых представлены на рис. 4.

Примечательно, что с увеличением молекулярной массы наблюдается повышение степени кристалличности, при этом СВМПЭ марок 4022 и 517 с молекулярной массой 5 млн г/моль имеют одинаковые значения степени кристалличности. Повышение степени кристалличности порошков СВМПЭ с увеличением его молекулярной массы может быть объяснено увеличением доли фибриллярной структуры в порошках, наблюдаемой на СЭМ-изображениях (см. рис. 1 и 2). Так, в работе [29] предполагается, что в фибриллах присутствуют кристаллы с вытянутой цепью, что приводит к более высоким значениям степени кристалличности.

Отклонение значений степени кристалличности у готового образца и порошка связано с изменением кристаллической структуры полимера после горячего прессования, а именно, происходит деформирование аморфных участков за счет гош- и трансконформационных переходов и изменение размеров кристаллитов [30]. В [29] показано, что подвижность аморфной фазы в порошке ограничена, также имеется меньше связей в гошконформации по сравнению с готовым

Таблица 2

Температура плавления, энтальпия плавления и степень кристалличности образцов СВМПЭ

Table 2

Melting point, melting enthalpy, and degree of crystallinity of UHMWPE samples

Марка СВМПЭ	$T_{\text{нач.пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{пл}}, \text{Дж/г}$	$\alpha, \%$
4022	127,7	142,6	171,1	58,8
4130	125,8	139,5	153,3	52,3
4150	124,4	138,7	140,9	48,1
510	114,6	130,9	116,7	39,8
517	126,3	141,1	158,6	54,1

Примечание. $T_{\text{нач.пл}}, ^\circ\text{C}$ – температура начала плавления; $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ – температура плавления; $\Delta H_{\text{пл}}, \text{Дж/г}$ – энтальпия плавления; $\alpha, \%$ – степень кристалличности.

Note. $T_{\text{нач.пл}}, ^\circ\text{C}$ – temperature of the beginning of melting; $T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$ – melting point; $\Delta H_{\text{пл}}, \text{J/g}$ – melting enthalpy; $\alpha, \%$ – degree of crystallinity.

образцом. В такой структуре, называемой напряженной морфологией [29], моноклинная форма находится под нагрузкой между кристаллитами и может быть удалена в процессе обработки, что приводит к снижению степени кристалличности после переработки порошка.

Результаты исследований РСА и ДСК образцов СВМПЭ согласуются между собой, при этом установлено, что российский аналог СВМПЭ 517 имеет схожие с зарубежными значения структурных и термодинамических параметров.

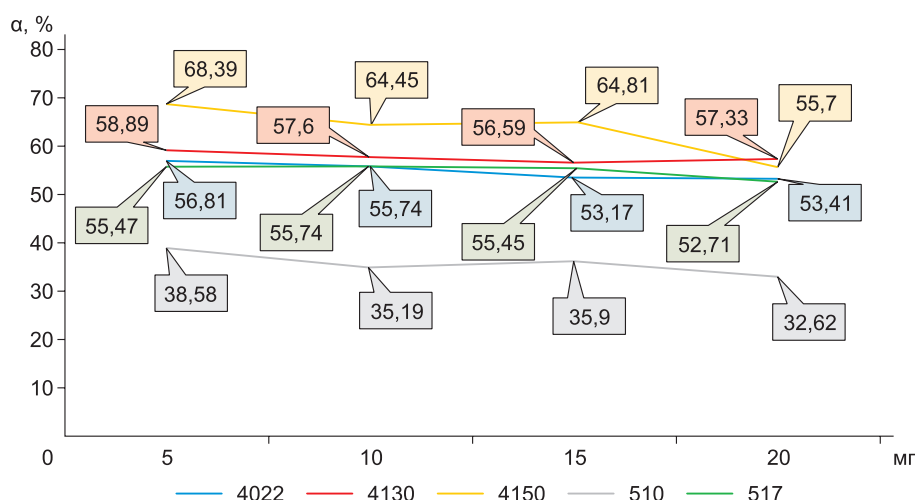


Рис. 4. Зависимость степени кристалличности порошков СВМПЭ от его молекулярной массы методом ДСК.

Fig. 4. Dependence of the degree of crystallinity of UHMWPE powders on its molecular weight by DSC.

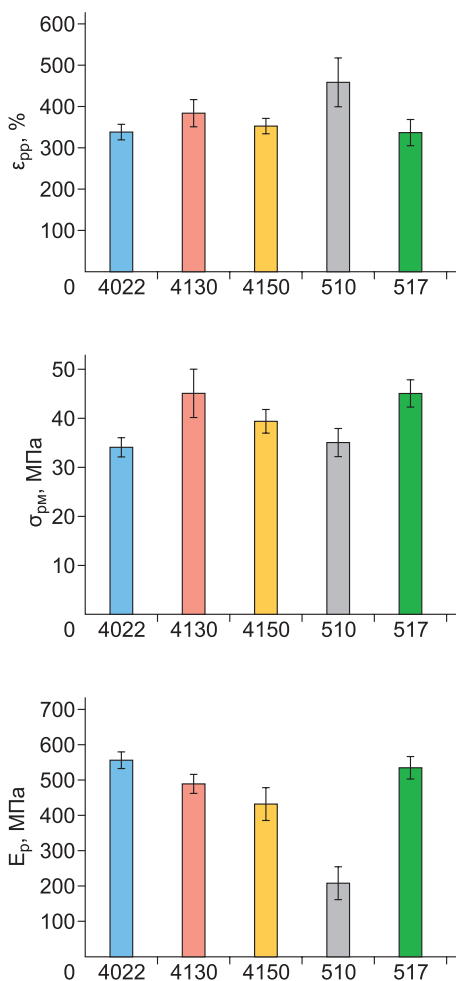


Рис. 5. Зависимость физико-механических свойств СВМПЭ от марки полимера.

Fig. 5. Dependence of the mechanical properties of UHMWPE on the grade of polymer.

Исследование физико-механических свойств. Результаты исследований относительного удлинения при разрыве, прочности при растяжении и модуля упругости приведены на рис. 5.

На основании результатов физико-механических исследований установлено, что с увеличением молекулярной массы СВМПЭ марки GUR наблюдается снижение модуля упругости. Наиболее высокими показателями модуля упругости обладает СВМПЭ с молекулярной массой 5,0 млн г/моль – это марки 4022 и 517, у которых значение модуля упругости достигает до 550 МПа. Самым высоким значением относительного удлинения при разрыве обладает СВМПЭ марки 510 – 459 %. Однако, этот полимер имеет самые низкие показатели модуля упругости по сравнению с остальными марками СВМПЭ.

Таблица 3

**Напряжение при сжатии
при установленной относительной деформации**

Table 3

Compressive stress at a specified relative strain

Марка СВМПЭ	$\sigma_{сд\ 5\%}, \text{МПа}$	$\sigma_{сд\ 10\%}, \text{МПа}$	$\sigma_{сд\ 25\%}, \text{МПа}$
4022	12±2	21±1	26±2
4130	16±3	23±3	35±5
4150	12±2	20±1	33±1
510	7±2	13±1	21±2
517	14±2	23±1	33±2

Примечание. $\sigma_{сд}$ – напряжение при сжатии при установленной относительной деформации (2,5, 10 и 25 %).

Note. $\sigma_{сд}$ – the compressive stress at the set relative strain (2.5, 10 and 25 %).

Установлено, что высокими прочностными параметрами характеризуется СВМПЭ марок 4130, 4150 и 517, при этом предел прочности при растяжении имеет значения 40–45 МПа.

В таблице 3 приведены результаты исследования прочности при сжатии образцов СВМПЭ. Из таблицы видно, что наиболее высокими показателями прочности при сжатии обладают образцы марок СВМПЭ 4130, 4150 и 517, причем эти образцы имеют наиболее высокие значения прочности при растяжении по сравнению с другими марками. Установлено, что наименьшим напряжением при сжатии обладает марка СВМПЭ 510, которая характеризуется высокой пластичностью (относительное удлинение при разрыве достигает 459 %).

Анализ кривых напряжения-деформации образцов (рис. 6), соответствующих средним значениям результатов физико-механических параметров, свидетельствует, что все кривые имеют одинаковую форму.

Известно, что деформационное сопротивление аморфной фазы СВМПЭ намного ниже, чем у кристаллической фазы [31]. Исходя из этого, начальная деформация будет локализована в аморфной части полимера. При постепенном увеличении деформации беспорядочно ориентированные ламели начинают перестраиваться в более ориентированную структуру с чередованием аморфных и кристаллических фаз. При этом изменение микроструктуры полимера при деформации сложно оценить количественно. Од-

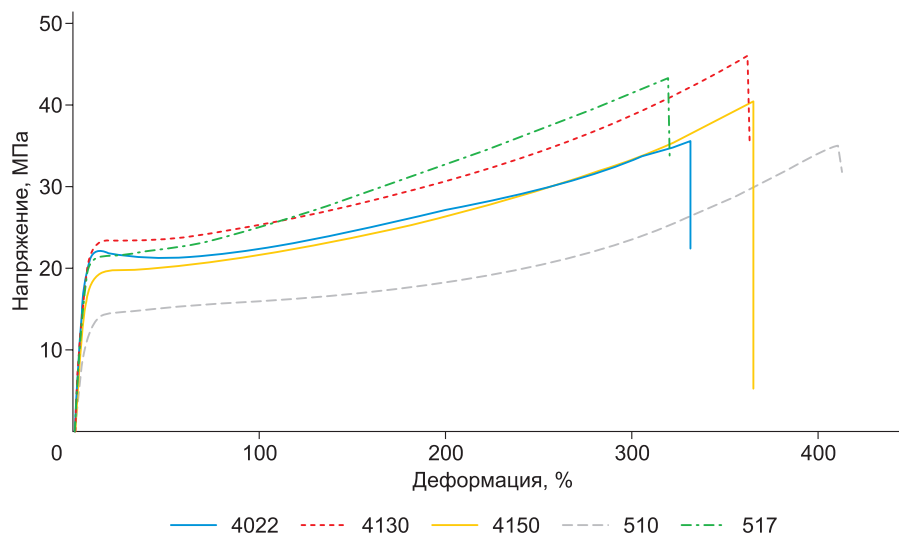


Рис. 6. Кривая напряжения-деформации образцов СВМПЭ.

Fig. 6. Stress-strain curve of UHMWPE specimens.

нако, предел текучести характеризует начало деформации и фрагментацию кристаллических областей полимера, а также выстраивание цепей в аморфных и кристаллических областях [32]. Согласно [33], предел текучести представляет собой активацию механизма кристаллографического скольжения, который зависит от толщины ламелей. В этой работе указано, что более толстые кристаллы требуют более высокого напряжения для активации скольжения. Однако, зависимость предела текучести от толщины ламелей требует дальнейшего изучения [32]. Поэтому в настоящей работе для объяснения механического поведения СВМПЭ рассматривали степень кристалличности СВМПЭ. Так, образцы с высокими значениями степени кристалличности (4022, 4130, 4150 и 517, см. табл. 1 и 2) характеризуются высокими значениями предела текучести, согласно кривой деформации-напряжения (см. рис. 6). В то же время формирование менее совершенных кристаллитов приводит к уменьшению модуля упругости, что объясняет низкие показатели у СВМПЭ марки 510 (см. рис. 5).

Высокие значения прочности при растяжении и при сжатии СВМПЭ марок 4130, 4150 и 517 обусловлены формированием сферолитной структуры с плотной упаковкой (рис. 2 и 3) [34, 35]. В случае СВМПЭ марки 510, характеризующейся формированием сферолитной структуры, зарегистрирована менее плотная упаковка ламелей. Как известно [25], между ориентированны-

ми ламелями находится аморфная фаза СВМПЭ, что объясняет высокую пластичность марки 510 (аморфная часть облегчает деформируемость и ориентацию кристаллитов).

Исследование трибологических свойств. На рис. 7 приведены результаты трибологических исследований: коэффициента трения и скорости массового изнашивания образцов СВМПЭ. Как видно из рисунка, значения коэффициента трения марок GUR и 517 находятся на одном уровне. Однако для СВМПЭ марки 510 отмечено повышение коэффициента трения, что свидетельствует о повышении термического напряжения в зоне трибоконтакта. У этого образца зафиксировано самое высокое значение скорости массового изнашивания, которое в 30 раз больше по сравнению с маркой 517. Возможно, образец 510, обладая большей пластичностью и низкими значениями температуры плавления, начинает интенсивно плавиться в зоне контакта и отслаиваться в процессе трения, т. е. изнашивание протекает более интенсивно за счет пластификации полимера в зоне контакта.

Сравнение значений скоростей массового изнашивания у остальных марок СВМПЭ показало, что наибольшей износостойкостью обладают марки 4130 (0,06 мг/ч) и 517 (0,07 мг/ч), которые имели высокие значения прочности при растяжении. СВМПЭ марок 4022 и 4150 имеют значения скоростей массового изнашивания равные 0,12 и 0,14 мг/ч соответственно. Таким образом, износостойкость СВМПЭ зависит от его пластической деформации, определяющей скорость

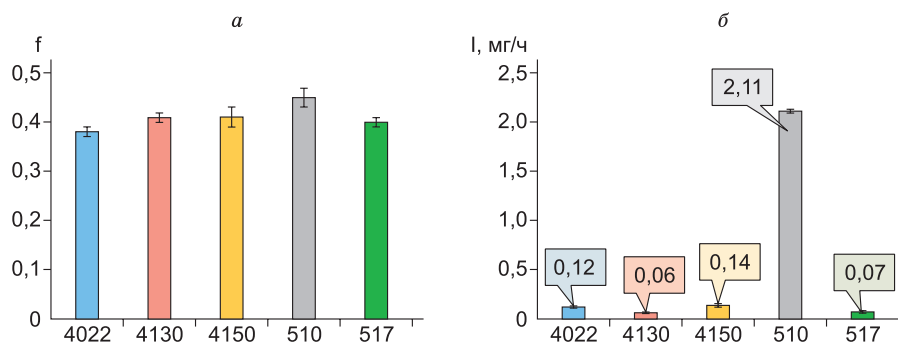


Рис. 7. Коэффициент трения (а) и скорость массового изнашивания (б) образцов СВМПЭ.

Fig. 7. Friction coefficient (a) and mass wear rate (b) of UHMWPE samples.

образования частиц износа, а также от его теплостойкости.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что СВМПЭ с низкой молекулярной массой марки 510 российского производства отличается высокими значениями пластичности (относительное удлинение достигает 459 %), низкими значениями энтальпии плавления и степени кристалличности по сравнению с остальными СВМПЭ, что приводит к интенсификации процессов изнашивания при трении и к высоким значениям скорости массового изнашивания. Высокими значениями прочности при растяжении и при сжатии обладают СВМПЭ марок 4130, 4150 и 517. Это связано со структурной особенностью морфологии порошков СВМПЭ и отличием самосборки макромолекул образца с формированием сферолитов, которые с увеличением молекулярной массы меняются на менее совершенные, что объясняется уменьшением степени кристалличности.

Таким образом, сравнение физико-механических и трибологических свойств образцов СВМПЭ производства Celanese (GUR 4022, 4130 и 5140), а также российского аналога, предоставленного Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН (Тинол) (марок 510 и 517), показало, что СВМПЭ марки 517 с молекулярной массой 5 млн г/моль не уступает по износостойкости и прочностным показателям иностранным маркам и может быть рекомендован в качестве импортозамещения.

Список литературы / References

1. Kurdi A., Chang L. Recent advances in high performance polymers-tribological aspects. *Lubricants*. 2018; 7(1): 2. DOI: 10.3390/lubricants7010002.
2. Склифос В.О., Рыжко А.А., Щеглов Д.П. Наночастицы для полимерных композиционных мате-

риалов в строительстве. *Перспективы науки*. 2021;5: 123–125.

[Sklyfos V.O., Ryzhko A.A., Shcheglov D.P. Nanoparticles for polymer composite materials in construction. *Science Prospects*. 2021;5:123–125. (In Russ.)]

3. Шерстюков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата. *Арктика и Север*. 2016;24:39–67.

[Sherstyukov B.G. The climatic conditions of the Arctic and new approaches to the forecast of the climate change. *Arktika i Sever [Arctic and North]*. 2016;24:39–67. (In Russ.)]

4. Selyutin G.E., Gavrilov Y.U., Voskresenskaya E.N., Zakharov V.A., Nikitin V.E., Poluboyarov V.A. Composite materials based on ultra-high molecular polyethylene: properties, application prospects. *Chemistry for sustainable development*. 2010;18(3):301–314.

5. Abdul Samad M. Recent Advances in UHMWPE/UHMWPE nanocomposite/UHMWPE hybrid nanocomposite polymer coatings for tribological applications: a comprehensive review. *Polymers*. 2021;13(4): 608. <https://doi.org/10.3390/polym13040608>.

6. Chen X., Wang X., Feng Y., Qu J., Yu D., Cao C., Chen X. Enhancing chain mobility of ultrahigh molecular weight polyethylene by regulating residence time under a consecutive elongational flow for improved processability. *Polymers*. 2021;13(13):2192. DOI: 10.3390/polym13132192.

7. Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И., Печенкин А.Д., Бухгалтер В.И., Поляков А.В. *Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности*. Л.: Химия; 1982. 80 с.

[Andreeva I.N., Veselovskaya E.V., Nalivajko E.I., Pechenkin A.D., Buhgalter V.I., Polyakov A.V. *Ultra high molecular weight polyethylene of high density*. L.: Chemistry; 1982. 80 p. (In Russ.)]

8. Галибеев С.С., Хайруллин Р.З., Архиреев В.П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы. *Вестник Казанского технологического университета*. 2008;2:50–55.

[Galibeev S.S., Hajrullin R.Z., Arhireev V.P. *Ultra-high molecular weight polyethylene. Trends and prospects*. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2008;2:50–55. (In Russ.)]

9. Peacock A.J. *Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications*. CRCpress; 2000. 544 p.
10. Охлопкова А.А., Охлопкова Т.А., Борисова Р.В. Управление процессами структурообразования в полимерных композиционных материалах на основе СВМПЭ. *Наука и образование*. 2015;2(78):85–90.
- [Okhlopko A.A., Okhlopko T.A., Borisova R.V. Controlling structure formation processes in polymer composite materials based on UHMWPE. *Nauka i Obrazovanie*. 2015;2(78):85–90. (In Russ.)]
11. Kossack W., Seidlitz A., Thurn-Albrecht T., Kremer F. Molecular order in cold drawn, strain-recrystallized poly(ϵ -caprolactone). *Macromolecules*. 2017;50(3):1056–1065. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b02714>.
12. Hu X.P., Hsieh Y.L. Crystallite sizes and lattice distortions of gel-spun ultra-high molecular weight polyethylene fibers. *Polymer journal*. 1998; 30(10): 771–774. DOI: 10.1295/polymj.30.771.
13. Joo Y.L., Han O.H., Lee H.K., Song J.K. Characterization of ultra high molecular weight polyethylene nascent reactor powders by X-ray diffraction and solid state NMR. *Polymer*. 2000;41(4):1355–1368. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00272-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00272-4).
14. Zamfirova G., Perena J.M., Benavente R., Pérez E., Cerrada M.L., Nedkov E. Mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene obtained with different cocatalyst systems. *Polymer journal*. 2002; 34(3):125–131. <https://doi.org/10.1295/polymj.34.125>.
15. Федоров Л.Ю., Карпов И.В., Ушаков А.В., Лепешев А.А., Иваненко А.А. Структурное состояние сверхвысокомолекулярного полиэтилена при одностадийном осаждении наночастиц из плазмы дугового разряда. *Письма в ЖТФ*. 2017;43(21):24–32. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.21.45158.16747>.
- [Fedorov L.Yu., Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshov A.A., Ivanenko A.A. Structural state of ultrahigh molecular weight polyethylene during one-stage deposition of nanoparticles from arc discharge plasma. *Technical physics letters*. 2017;43(21):24–32. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.21.45158.16747>. (In Russ.)]
16. Аулов В.А., Кучкина И.О. Проявление моноклинной фазы в ИК-спектрах сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Высокомолекулярные соединения*. Серия А. 2009;51(8):1440–1443.
- [Aulov V.A., Kuchkina I.O. Manifestation of the monoclinic phase in IR-spectra of ultrahigh-molecular-weight polyethylene. *Polymer Science, Series A*. 2009; 51(8):877–880. (In Russ.)]
17. Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S. Ultra-high molecular weight polyethylene: influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. A review. *Materials*. 2017;10(7):791. <https://doi.org/10.3390/ma10070791>.
18. Ней З.Л. *Технологические и эксплуатационные свойства наномодифицированного полиэтилена: дис.... канд. тех. наук.: 05.17.06 Москва: 2017. 163 с.*
- [Ney Z.L. *Technological and operational properties of nanomodified polyethylene: Dis.... Cand. Sci.: Moscow: 2017. 163 p.* (In Russ.)]
19. Galitsyn V., Gribov S., Kakiage M., Uehara H., Khizhnyak S., Pakhomov P., Moeller E., Nikitin V., Zakharov V., Tshmel A. Straight-chain segment length distributions in UHMWPE reactor powders of different morphological types. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2007; 12(3):221–230. <https://doi.org/10.1080/10236660701245264>.
20. Vadivel H.S., Bek M., Šebenik U., Perše L.S., Kádár R., Emami N., Kalin M. Do the particle size, molecular weight, and processing of UHMWPE affect its thermomechanical and tribological performance? *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;12:1728–1737. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.087>.
21. Лебедев Д.В., Иванькова Е.М., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Сейдевитц В. Строение поверхности наэцентных частиц реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Физика твердого тела*. 2009;51(8):1645.
- [Lebedev D.V., Ivan'kova E.M., Marikhin V.A., Myasnikova L.P., Seydewitz V. Surface structure of nascent particles of ultrahigh molecular weight poly(ethylene) reactor powders. *Physics of the Solid State*. 2009;51(8): 1645. (In Russ.)]
22. Khalil Y., Hopkinson N., Kowalski A., Fairclough J.P.A. Characterisation of UHMWPE polymer powder for laser sintering. *Materials*. 2019;12(21):3496. <https://doi.org/10.3390/ma12213496>.
23. Michler G.H., Seydewitz V., Buschnakowski M., Myasnikova L.P., Ivan'kova E.M., Marikhin V.A., Boiko Y.M., Goerlitz S. Correlation among powder morphology, compactability, and mechanical properties of consolidated nascent UHMWPE. *Journal of applied polymer science*. 2010;118(2):866–875. <https://doi.org/10.1002/app.32346>.
24. Rimell J.T., Marquis P.M. Selective laser sintering of ultra-high molecular weight polyethylene for clinical applications. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2000;53(4):414–420. [https://doi.org/10.1002/1097-4636\(2000\)53:4<414::AID-JBM16>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/1097-4636(2000)53:4<414::AID-JBM16>3.0.CO;2-M).
25. Охлопкова Т.А., Борисова Р.В., Охлопкова А.А., Дьяконов А.А., Васильев А.П., Миронова С.Н. Микроскопические исследования деформации растяжения сферолитных структур в полимерных композиционных материалах. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2015;3(47):75–87.
- [Okhlopko T.A., Borisova R.V., Okhlopko A.A., Dyakonov A.A., Vasiliev A.P., Mironova S.N. Microscopic investigations of spherulitic structures tensile strain in polymeric composite materials. *Vestnik NEFU*. 2015; 3(47):75–87. (In Russ.)]
26. Галицын В.П. *Физико-химические свойства и строение реакторных порошков, гелей и ориентированных волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена: дис.... д-ра хим. наук: 02.00.04 Тверь: 2012. 339 с.*
- [Galitsyn V.P. *Physical and chemical properties and structure of reactor powders, gels and oriented fibers*

made of ultrahigh molecular weight polyethylene: Dis. ... Dr Sci. Tver: 2012. 339 p. (In Russ.)]

27. Liu Y.X., Chen E.Q. Polymer crystallization of ultrathin films on solid substrates. *Coordination Chemistry Reviews*. 2010;254(9-10):1011–1037. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2010.02.017>.

28. Dingler C., Dirnberger K., Ludwigs S. Semiconducting polymer spherulites-From fundamentals to polymer electronics. *Macromolecular Rapid Communications*. 2019; 40(1): 1800601. <https://doi.org/10.1002/marc.201800601>.

29. Cook J.T.E., Klein P.G., Ward I.M., Brain A.A., Farrar D.F., Rose J. The morphology of nascent and moulded ultra-high molecular weight polyethylene. Insights from solid-state NMR, nitric acid etching, GPC and DSC. *Polymer*. 2000;41(24):8615–8623. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00254-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00254-8).

30. Жорник В.И., Ковалева С.А., Григорьева Т.Ф., Киселева Т.Ю., Белоцерковский М.А., Таран И.И., Валькович И.В., Витязь П.А., Ляхов Н.З. Формирование структуры высоконаполненных композитов на основе СВМПЭ в условиях интенсивной механической активации для получения радиационно-защитных материалов. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019;4:70–78.

[Zhornik V.I., Kovaliova S.A., Grigoryeva T.F., Kiseleva T.Yu., Belotserkovsky M.A., Taran I.I., Valkovich I.V., Vityaz P.A., Lyakhov N.Z. Formation of structure of

highly filled UHMWPE composites under conditions of intensive mechanical activation for radiation protective materials. *Mechanics of machines, mechanisms and materials*. 2019;4:70–78. (In Russ.)]

31. Bergström J.S., Kurtz S.M., Rimnac C.M., Edidin A.A. Constitutive modeling of ultra-high molecular weight polyethylene under large-deformation and cyclic loading conditions. *Biomaterials*. 2002;23(11):2329–2343. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00367-2](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00367-2).

32. Sobieraj M.C., Rimnac C.M. Ultra high molecular weight polyethylene: mechanics, morphology, and clinical behavior. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2009;2(5):433–443. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.12.006>.

33. Galeski A., Bartczak Z., Vozniak A., Pawlak A., Walkenhorst R. Morphology and plastic yielding of ultrahigh molecular weight polyethylene. *Macromolecules*. 2020;53(14):6063–6077. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b02154>.

34. Danilova S.N., Yarusova S.B., Kulchin Y.N., Zhevtun I.G., Buravlev I.Y., Okhlopko A.A., Gordienko P.S., Subbotin E.P. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: mechanical and tribological properties. *Polymers*. 2021;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/polym13040570>.

35. Way J.L., Atkinson J.R., Nutting J. The effect of spherulite size on the fracture morphology of polypropylene. *Journal of Materials Science*. 1974;9(2):293–299. <https://doi.org/10.1007/BF00550954>.

Об авторах

ДАНИЛОВА Сахаяна Николаевна, младший научный сотрудник, AuthorID: 933163, Researcher ID: AAZ-5494-2021, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

ОКОНЕШНИКОВА Анастасия Васильевна, студент 3 курса, <https://orcid.org/0000-0002-3647-2718>, e-mail: anasema2003@mail.ru

ОХЛОПКОВА Айталиа Алексеевна, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, AuthorID: 57856, Researcher ID: A-6594-2014, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, e-mail: okhlopko@yandex.ru

Аффилиация

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58, Российская Федерация

About the authors

DANILOVA, Sakhayana Nikolaevna, Junior Researcher, AuthorID: 933163, Researcher ID: AAZ-5494-2021, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

OKONESHNIKOVA, Anastasia Vasilievna, 3rd year student, <https://orcid.org/0000-0002-3647-2718>, e-mail: anasema2003@mail.ru

OKHLOPKOVA, Aitalina Alexeevna, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Researcher, AuthorID: 57856, Researcher ID: A-6594-2014, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, e-mail: okhlopko@yandex.ru

Affiliation

Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinsky st., Yakutsk 677000, Russian Federation

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2022

Поступила после рецензирования / Revised 28.09.2022

Принята к публикации / Accepted 19.10.2022