

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2021, Том 26, № 4

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители:

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

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

Главный редактор

В.В. Филиппов

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

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

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

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

<http://nras.asrsya.ru>

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

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

© Академия наук РС (Я), 2021
© Якутский научный центр СО РАН, 2021
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2021
© Министерство образования и науки РС (Я), 2021

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 «Nauka i Obrazovanie»)

Scientific journal

2021, Vol. 26, No. 4

Founded in 1996
4 issues per year

Founders:

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

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

Editor-in-Chief

V.V. Filippov

Corresponding Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief:

N.G. Solomonov

Corresponding Member of RAS

Yu.M. Grigoriev

Dr.Sci. (Phys.-Math.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

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

<http://nras.asrsya.ru>

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

© Academy of Sciences of RS (Ya), 2021
© Yakut Scientific Center of SB RAS, 2021
© M.K. Ammosov North-Eastern
Federal University, 2021
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2021

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Науки о Земле

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

Общая биология

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

Материаловедение

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

Editorial Council:

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

Editorial Board:

Earth Sciences

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

General Biology

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

Materials Science

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

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

<i>Васильев Д.А., Прокопьев А.В.</i> Новые данные о тектонике Адыча-Тарынской зоны разломов (Восточная Якутия)	5
<i>Округин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И.</i> Медно-никелевое сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита	16
<i>Опарин Н.А., Олейников О.Б.</i> Минералы ряда флогопит–киноситалит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия)	29
<i>Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Каширцев В.А., Зуева И.Н., Глянцева Ю.С.</i> Углеводороды каркасного строения в различных генетических типах нефтей и конденсатов Западной Якутии	43

Общая биология

Экология

<i>Масанов А.Ю., Анисимова П.С., Толстов А.В., Шеремет А.Х., Дубовичев М.А. Зимов Н.С.</i> Реализация экологических инициатив АК «АЛРОСА» (ПАО) по достижению углеродной нейтральности	54
<i>Алфимов А.В., Берман Д.И.</i> Северо-Восток Азии как температурная гиперзона и ее изменения за последние 60 лет. <i>Сообщение 1.</i> Температурный режим теплого сезона на северо-востоке Азии	67
<i>Данилова Н.С., Семенова В.В.</i> Фитоценотическая характеристика сообществ с участием <i>Alyssum lenense</i> в долине Средней Лены	82
<i>Колосова О.Н., Засимова Е.З., Слепцов И.В., Гольдерова А.С., Кершенгольц Б.М.</i> К вопросу разработки теста отбора вахтовиков для работы на Севере на основе определения метаболомного профиля плазмы крови, на примере работников водного транспорта	91

Биологические ресурсы

<i>Сидоров М.М., Мамаев Н.В., Слепцов И.В., Журавская А.Н., Михайлов В.В.</i> Биохимический состав желчи и питание <i>Martes zibellina</i> в зимний период на территории Якутии	103
<i>Докучаева В.Б., Докучаев Н.Е.</i> Ель аянская (<i>Picea ajanensis</i>) в Магаданской области: интродукция или реинтродукция?	112

Материаловедение

<i>Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н.</i> Разработка полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата	122
Игорю Иннокентьевичу Колодезникову 80 лет	132

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

<i>Vasiliev D.A., Prokopiev A.V.</i> New data on the tectonics of the Adych-Taryn fault zone (Eastern Yakutia)	5
<i>Okrugin A.V., Zemnukhov A.L., Zhuravlev A.I.</i> Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield	16
<i>Oparin N.A., Oleynikov O.B.</i> Minerals of the phlogopite-kinoshitalite series from the ground-mass of kimberlite rocks in pipes from the Khompu-May field (Central Yakutia).....	29
<i>Chalaya O.N., Lifshits S.Kh., Kashirtsev V.A., Zueva I.N., Glyaznetsova Yu.S.</i> Skeleton structure hydrocarbons in different genetic types of oils and condensates in Western Yakutia.....	43

General biology

Ecology

<i>Masanov A.Yu., Anisimova P.S., Tolstov A.V., Sheremet A.H., Dubovichev M.A., Zimov N.S.</i> Implementation of environmental initiatives of JSC «ALROSA» (PJSC) to achieve carbon neutrality	54
<i>Alfimov A.V., Berman D.I.</i> North-East of Asia as the temperature hyperzone and its alteration over the past 60 Years. <i>Communication 1.</i> Temperature regime of a warm season in the North-East of Asia.....	67
<i>Danilova N.S., Semenova V.V.</i> Phytocenotic characteristics of the communities with participation of the <i>Alyssum lenense</i> in the Lena River valley	82
<i>Kolosova O.N., Zasimova E.Z., Sleptsov I.V., Golderova A.S., Kershengolts B.M.</i> On the development of a test for the selection of shift workers for work in the North based on the determination of the metabolomic profile of blood plasma, by the example of workers in water transport	91

Biological resources

<i>Sidorov M.M., Mamaev N.V., Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N., Mikhailov V.V.</i> Biochemical composition of bile and nutrition of <i>Martes zibellina</i> in the wintertime in Yakutia	103
<i>Dokuchaeva V.B., Dokuchaev N.E.</i> Ayan spruce in the Magadan region: introduction or reintroduction?	112

Materials science

<i>Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N.</i> Development of polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate	122
The 80th anniversary of Professor I.I. Kolodeznikov	132

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 550.93:552.4(571.5)

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-5-15

Новые данные о тектонике Адыча-Тарынской зоны разломов (Восточная Якутия)

Д.А. Васильев*, А.В. Прокопьев**

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

**juorankhay@mail.ru*

***prokopiev@diamond.ysn.ru*

Аннотация. В центральной части зоны регионального Адыча-Тарынского разлома (АТР), разделяющего Адыча-Эльгинский и Нерский антиклинории (Верхояно-Колымский орогенный пояс), установлены три этапа тектонических деформаций в верхнетриасовых отложениях. В первый этап образовались надвиги и складки северо-западного простирания. Деформации второго этапа представлены складками с крутыми шарнирами и ассоциирующими с ними левосторонними сдвигами. Предполагается третий этап деформаций, с которым связано образование правосторонних сдвигов. Впервые установлена не только поперечная, но продольная изменчивость интенсивности тектонических деформаций вдоль АТР: с северо-запада на юго-восток на юго-западном крыле зоны АТР она понижается, в том же направлении на северо-восточном крыле – постепенно увеличивается. Впервые установлена ориентировка осей палеонапряжений, под действием которых были сформированы тектонические структуры изученной территории. Складки и надвиги первого этапа деформаций были сформированы при субгоризонтальном сжатии северо-восточного простирания. Левые сдвиги и ассоциирующие с ними складки второго этапа были образованы при субгоризонтальной ориентировке осей сжатия субширотного направления. Последующие правосдвиговые деформации происходили при субгоризонтальном сжатии северо-западного простирания и северо-восточной ориентировке субгоризонтальных осей растяжения.

Ключевые слова: тектоника, структурная геология, Верхояно-Колымский орогенный пояс.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00945.

Введение

Изученный район находится в бассейне нижнего течения р. Эльги, левого притока р. Индигирка. Исследования проводились в крупных техногенных карьерах, расположенных вдоль автодороги «Колыма». В тектоническом отношении территория располагается в центральной части зоны влияния регионального Адыча-Тарынского разлома (АТР), в его юго-западном крыле (центральная часть Верхояно-Колымского орогенного пояса). Ранее предполагалось, что этот разлом отделяет Адыча-Эльгинский антиклинорий зоны хинтерланда Верхоянского складчато-надвигового пояса от Нерского блока (антиклинория) Кулар-Нерского террейна [1]. Однако впоследствии

Нерский блок был включен в состав зоны хинтерланда (рис. 1, а). На юго-западном крыле АТР, в Адыча-Эльгинском антиклинории, выделяется несколько генераций складчатости, кливажа и разломов. Здесь отмечено постепенное повышение интенсивности деформаций в северо-восточном направлении [1]. Считается, что северо-восточное крыло АТР деформировано более интенсивно [2]. Разлом плохо обнажен, однако хорошо дешифрируется на космо- и аэрофотоснимках, устанавливается в геологической структуре по усилению интенсивности складчатых и разрывных нарушений, положению кайнозойских впадин и т. д. Предполагается, что АТР первоначально имел преобладающую взбросовую ки-

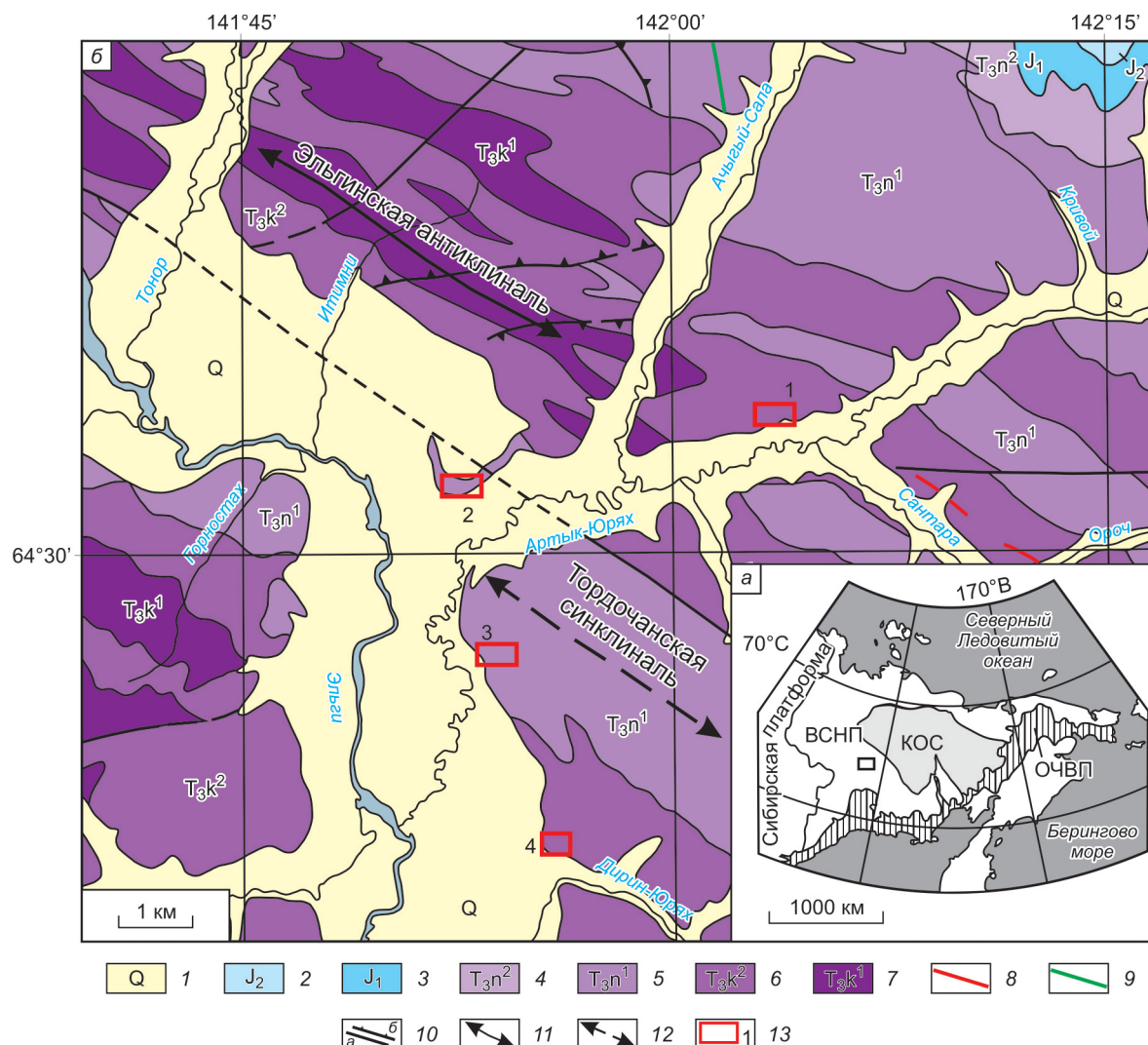


Рис. 1. Местоположение изученного района (а) и геологическая карта юго-западного крыла центральной части Адыча-Тарынской зоны разломов (б).

КОС – Колыма-Омолонский супертеррейн, ВСНП – Верхоянский складчато-надвиговый пояс, ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканический пояс.

Отложения: 1 – четвертичные, 2 – среднеюрские, 3 – нижнеюрские, 4 – верхненорийские, 5 – нижненорийские, 6 – верхнекарнийские, 7 – нижнекарнийские; 8 – дайки риолитовых порфиров предположительно позднеюрского возраста, 9 – дайки кварцево-диоритовых порфиров предположительно позднеюрского возраста, 10 – разломы (а – неустановленной кинематики, б – надвиги), 11 – оси антиклиналей, 12 – оси синклиналей, 13 – участки наблюдений и их номера. Черный прямоугольник на схеме а – местоположение изучаемого района.

Fig. 1. Location of the study area (а) and geological map of the east wall in the central part of the Adycha-Taryn fault zone (б). КОС – Kolyma – Omolon superterrane, ВСНП – Verkhoyansk fold-thrust belt, ОЧВП – Okhotsk-Chukotka volcanic belt.

Deposits: 1 – Quaternary, 2 – Middle Jurassic, 3 – Lower Jurassic, 4 – Upper Norian, 5 – Lower Norian, 6 – Upper Carnian, 7 – Lower Carnian; 8 – rhyolite porphyry dikes of presumable Late Jurassic age, 9 – quartz-diorite porphyry dikes of presumable Late Jurassic age, 10 – faults: а – unidentified kinematics, б – thrusts, 11 – axis of anticline, 12 – axis of syncline, 13 – study areas and their numbers. Black square in diagram а shows location of the study area.

нематиту, которая сменилась на левосдвиговую с элементами транспрессии и транстенсии [2]. К зоне АТР приурочена Тарынская металлогеническая зона, которая, протягиваясь в северо-западном направлении на 500 км, содержит много-

численные Au–Sb и в меньшей мере Ag и Ag–Sn полиметаллические месторождения и рудопроявления. В этой металлогенической зоне находятся такие Au–Sb-месторождения, как Сарылах и Сентачан [1].

Методы исследования

В процессе экспедиционных исследований производились детальные описания деформационных структур (складок, разломов, кливажа, трещиноватости горных пород и проч.), сопровождавшиеся массовыми замерами ориентировок слоистости, кливажа, плоскостей разломов, трещин, штрихов на зеркалах скольжения. В дальнейшем изучение тектонических структур проводилось методами структурной геологии [3, 4] на стереографических сетках и при помощи компьютерных программ (StereoNett, QuickPlot, FaultKinWin). Тектонофизические исследования и расчет осей палеонапряжений были выполнены по методикам [5, 6]. Стратиграфические, литологические и седиментологические наблюдения проводились непосредственно на обнажениях.

Складчатые структуры

Основными складчатыми структурами изученного района являются Эльгинская антиклиналь и расположенная юго-западнее Тордочанская синклиналь северо-западного простирания. Более крупная Эльгинская антиклиналь имеет ширину 12–15 км и протяженность более 100 км. Северо-восточное крыло более пологое, угол падения меняется в широких пределах от 40 до 80°; юго-западное крыло крутое, угол падения достигает 80–90°. Залегание пород на юго-западном крыле изменяется от нормального до опрокинутого. В изученных нами обнажениях на северо-восточном крыле этой антиклинали мелких складок не обнаружено. По данным геологического картирования здесь были описаны подобные и концентрические ундулирующие складки и пологие, широкие концентрические и коробчатые складки. Местами проявлена микроскладчатость, в которую смяты пластичные глинистые толщи [8]. Тордочанская синклиналь имеет ширину 4–8 км и протяженность более 40 км. Общее с Эльгинской антиклиналью северо-восточное крыло этой складки более крутое, тогда как углы залегания пород на ее юго-западном крыле достигают 40–70°. Эти складки деформируют верхнетриасовые терригенные породы, среди которых преобладают аргиллиты и алевролиты; реже встречаются пласты мелкозернистых песчаников и конгломератов. Роль грубообломочных пород возрастает вверх по карнийско-норийскому разрезу. Свод Эльгинской антиклинали слагают породы ни-

жней толщи карния, а мульду Тордочанской синклинали – нижняя толща норийского яруса (рис. 1, б). Крылья складок сложены отложениями верхней толщи карнийского яруса. Северо-восточнее в мульде Удунинской синклинали вскрываются несогласно залегающие на верхнетриасовых толщах отложения нижней и средней юры [9].

Складчатые и разрывные деформации представлены несколькими генерациями. Складки первой генерации F_n северо-западного простирания независимо от размеров асимметричны, реже симметричны, иногда опрокинуты на северо-восток (рис. 2, а). Шарниры складок слабо наклонны или субгоризонтальны. Несмотря на то что в целом складчатость неверхгентная, встречаются антиклинали и синклинали с более крутыми северо-восточными и юго-западными крыльями соответственно. Складки линейные и ундулирующие; преобладают конические формы, хотя цилиндрические также встречаются. По форме замков и мульд складки в большинстве косые, реже прямые закрытые, иногда встречаются как открытые, так и сжатые. Складчатость концентрическая; размеры складок варьируют от первых десятков сантиметров до первых десятков метров. К этой генерации относятся Эльгинская антиклиналь и Тордочанская синклиналь. По массовым замерам ориентировки слоистости расчетная ось складчатости погружается в северо-западном (аз. пад. 316°) направлении под $\angle 27^\circ$ (рис. 2, б). Складки первой генерации F_n часто сопровождаются непроникающим кливажем, проявленным в основном в прослоях аргиллитов и алевролитов. Его интенсивность увеличивается с уменьшением зернистости пород, достигая максимума в аргиллитах. Характерна рефракция кливажа, проявленная на границах разнокомпетентных слоев. Простирание кливажа практически параллельно простиранию складчатости.

Складки второй генерации F_{n+1} менее выражены. Их шарниры круто наклоненные (60–70°) (рис. 3). Складки прямые симметричные, реже асимметричные. Поскольку обнаруженные складки в целом прямые, то можно считать, что складчатость неверхгентная. Складки предположительно линейные, цилиндрические; ундуляция не отмечена. По форме замков и мульд преобладают прямые, реже косые открытые складки. В целом складчатость концентрическая. Размеры складок изменяются от 1–2 м до 6–7 м.

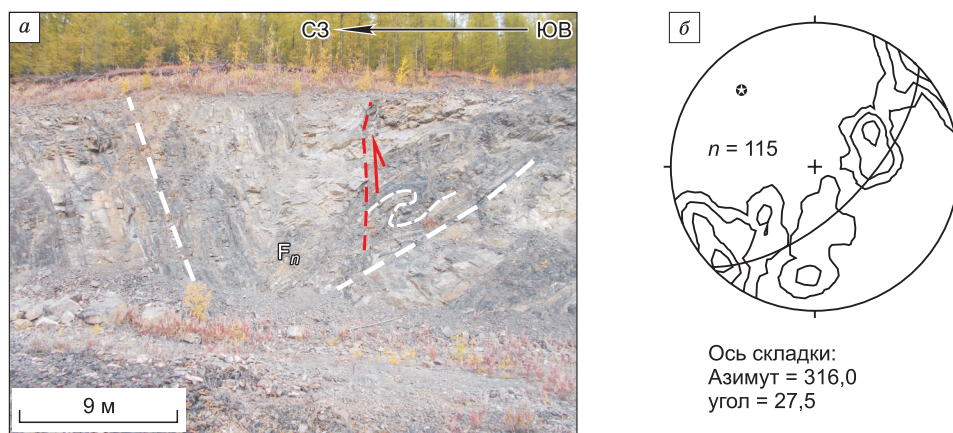


Рис. 2. Асимметричные складки первой генерации в центральной части Тордочанской синклинали (а) и стереограмма полюсов слоистости складок первой генерации (б).

Штриховые линии на фото (здесь и далее): белая – слоистость, красная – разломы. На стереограмме (здесь и далее) – равноугольная проекция, нижняя полусфера, n – количество замеров.

Fig. 2. Asymmetric folds of the first generation in the central part of the Tordochan syncline (a) and diagram of poles to bedding for the first-generation folds (b).

Dashed lines on photo (hereafter): white – bedding, red – fault. On stereogram (hereafter) – equal-angle projection, lower hemisphere, n – number of measurements.

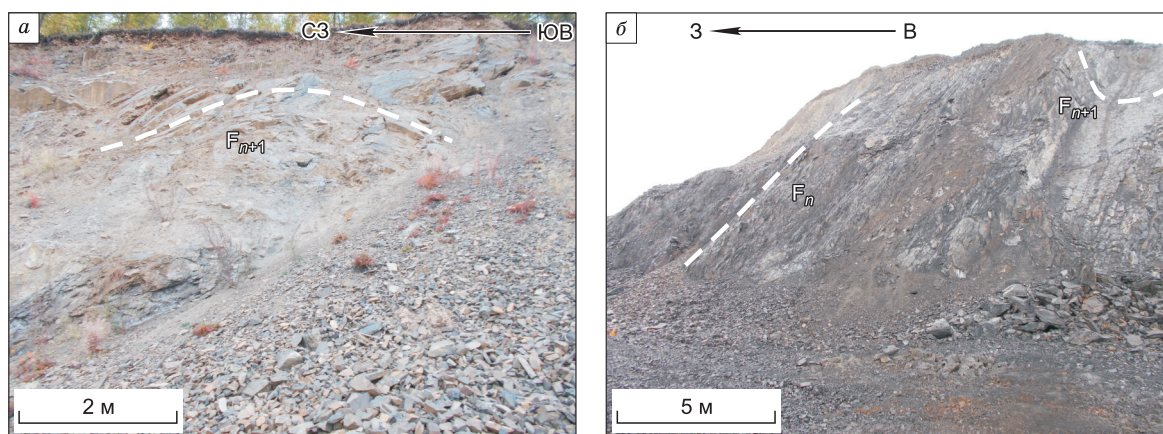


Рис. 3. Симметричная складка второй генерации (а) в центральной части Тордочанской синклинали и взаимоотношение складок разной генерации (б) в юго-западной части Тордочанской синклинали.

Усл. обозн. см. на рисунке 2.

Fig. 3. Symmetric fold of the second generation (a) in the central part of the Tordochan syncline and relationships between folds of different generations (b) in the southwest part of the Tordochan syncline.

For symbols see figure 2.

Разрывные структуры

Первая генерация разломов характеризуется преобладанием надвигов. Распространены межслоевые срывы (рис. 4, а). Простирающие надвигов меняется в широких пределах, однако основными направлениями являются северо-западное и северо-восточное (рис. 5, а). Углы падения надвигов варьируют от 40 до 90° (в среднем около 60°). Надвиги, как правило, структурно и генетически связаны со складками первой гене-

рации, формируя местами небольшие взбросо-складки. Иногда наблюдается смещение складок и надвигов первой генерации крупными взбросами (рис. 4, б). Амплитуда смещения по ним изменяется от первых сантиметров до первых десятков метров.

Ко второй генерации разрывных нарушений относятся сдвиги. В изученных обнажениях среди всех типов разломов преобладают левые сдвиги. Выделяются два преобладающих направления –

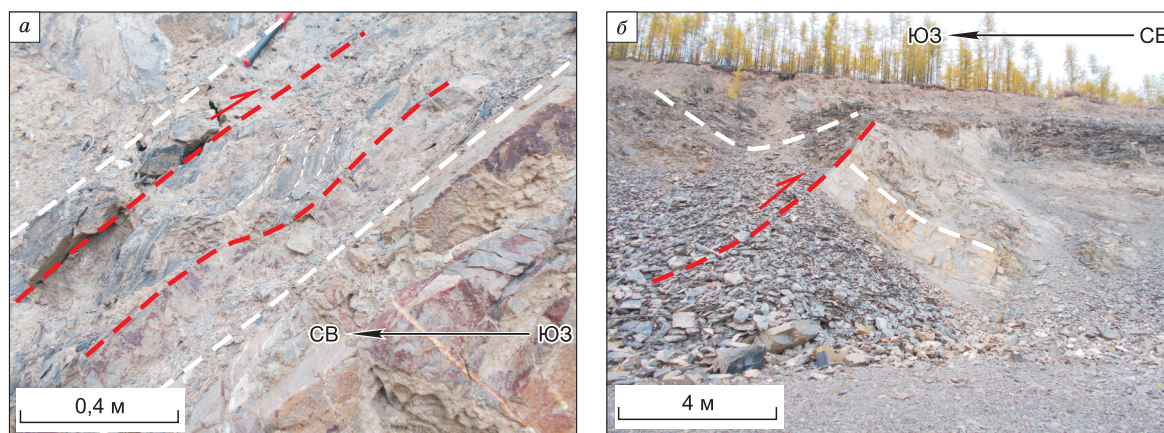


Рис. 4. Межслоевой надвиговый дуплекс (а) в центральной части Тордочанской синклинали и взброс, секущий складку первой генерации (б) на северо-восточном крыле Эльгинской антиклинали. Усл. обозн. см. на рисунке 2.

Fig. 4. Bedding-plane thrust duplex (a) in the central part of the Tordochan syncline and a thrust cutting a fold of the first generation (б) on the southeast limb of the El'gi anticline. For symbols see figure 2.

север-северо-западное и восток-северо-восточное (рис. 5, б). При этом главным направлением предполагается последнее. Углы падения этих разломов $75-90^\circ$, реже $40-50^\circ$. Правые сдвиги менее распространены. Иногда наблюдается смещение ими плоскостей левых сдвигов. Основные направления простирания правых сдвигов – северо-западное и субширотное (рис. 5, в). Их углы падения крутые – от 68 до 90° . Кроме того, встречаются комбинации сдвигов, как левых, так и правых, с другими типами разломов, прежде всего со взбросами. Смещение по сдвигам определить сложно. Однако в пределах обнажений наблюдаются сдвиги с амплитудой от десятков сантиметров до первых метров. Сбросы на территории крайне редки. Был найден только один сброс субширотного простирания с крутым углом падения, который, имея левосдвиговую составляющую, безусловно находится в структурном параганезе со сдвигом.

Кварцевые жилы

Трещины отрыва представлены кварцевыми жилами. Они встречаются часто и имеют разные простирания, но преобладают жилы северо-восточного направления (рис. 5, г). Мощность жил до первых десятков сантиметров. Иногда встречаются жилы, смятые в асимметричные складки первой генерации. С использованием элементов залегания жил, а также наблюдений за их взаимоотношениями, были вычислены оси полей палеонапряжений в пределах четырех участков (рис. 6).

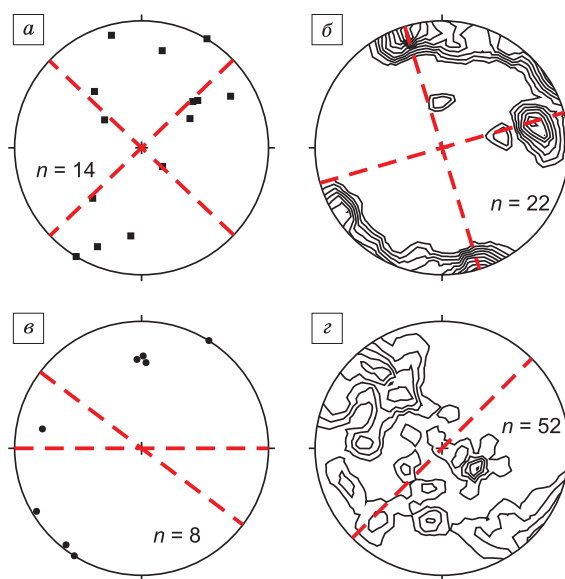


Рис. 5. Стереогаммы полюсов разломов. а – надвиги и взбросы, б – левые сдвиги, в – правые сдвиги, г – кварцевые жилы. Усл. обозн. см. на рисунке 2.

Fig. 5. Diagrams of poles to faults: а – thrusts, б – sinistral strike-slip faults, в – dextral strike-slip faults, г – quartz veins. For symbols see figure 2.

На каждом участке были определены системы сопряженных жил и построены стереогаммы с вычисленными осями палеонапряжений (табл. 1). Методика основана на представлении о том, что точка пересечения проекций больших кругов сопряженных трещин на стереографической сетке Вульфа соответствует средней (проме-

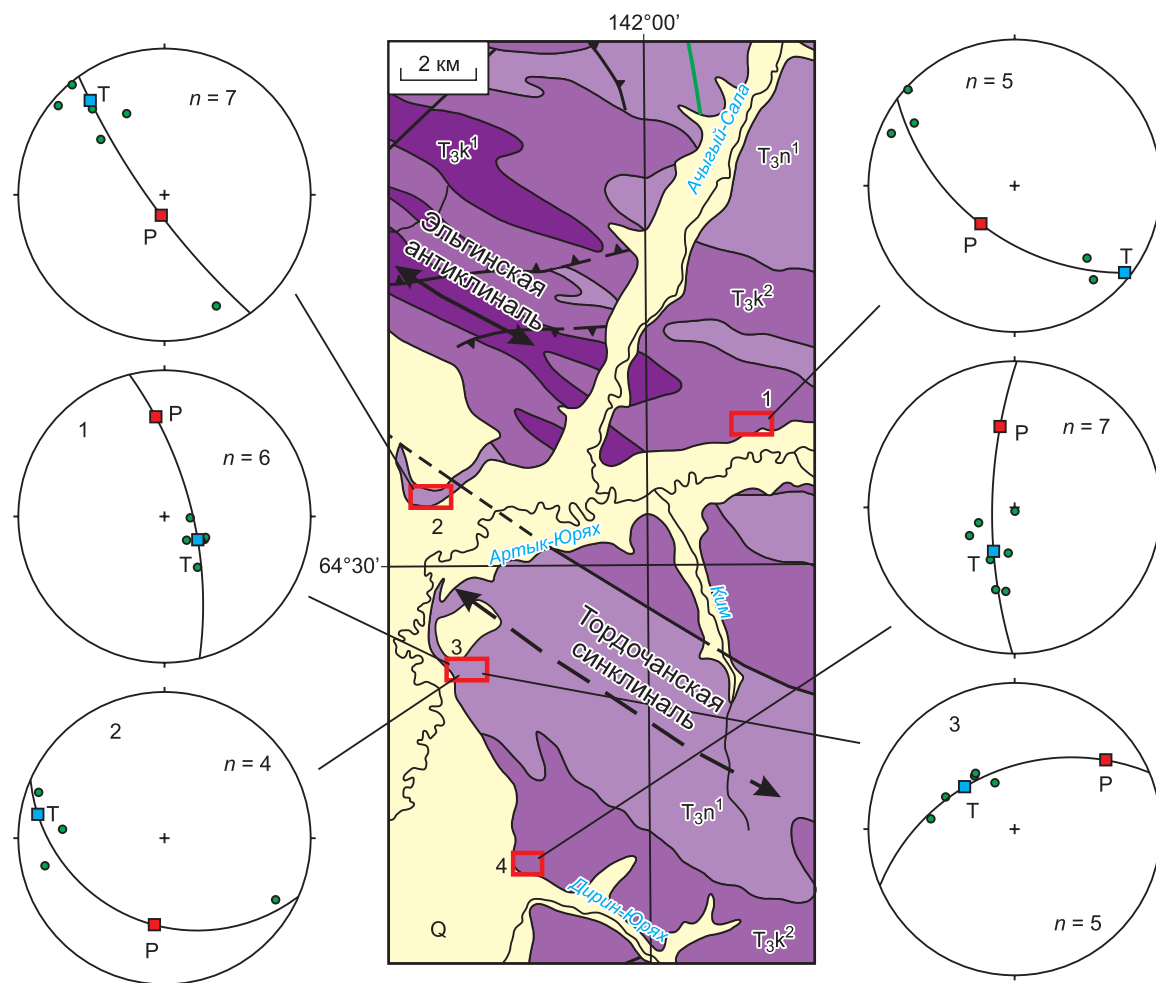


Рис. 6. Стереогаммы с полюсами сопряженных жил, вспомогательной дугой большого круга и вычисленными осями палеонапряжений.

T – ось растяжения, P – ось сжатия. Усл. обозн. см. на рисунке 2.

Fig. 6. Diagrams with poles to conjugate veins, an auxiliary great-circle path and calculated paleostress axes.

T – extension axis, P – compression axis. For symbols see Figure 2.

жуточной) оси главных нормальных напряжений [4]. П.Л. Хэнкок и Т. Кадхи [7] установили, что в сопряженной системе трещин отрыва (в данном случае жил) ось сжатия всегда ориентирована параллельно биссектрисе наименьшего угла, тогда как ось растяжения параллельна биссектрисе наибольшего угла. На изучаемой площади предполагается, как минимум, две генерации жил. Первая, по-видимому самая ранняя, генерация представлена смятыми в складки жилами. Вторая представлена жилами, сформированными при субгоризонтальном ($\angle 2-11^\circ$) растяжении северо-западного (аз. пр. $308-322^\circ$) простирания. Ось сжатия при этом крутонаклонна ($\angle 51^\circ$) или субвертикальна ($\angle 74^\circ$). Жилы, сформированные в этом поле палеонапряжений,

являются наиболее многочисленными и наблюдаются на наиболее северо-восточных участках (участки 1 и 2) (см. рис. 6). По-видимому, именно эта генерация жил связана со складками первой генерации. На участках 3 и 4 выделяется несколько систем жил, характеризующихся разноориентированными направлениями осей палеонапряжений. Разброс значений, вероятно, связан с последующими, наложенными сдвиговыми деформациями.

Оси палеонапряжений

По замерам ориентировок штрихов на зеркалах скольжения мелких разломов и их кинематике также были рассчитаны главные оси палеонапряжений [7]. Поскольку на территории предпола-

Таблица 1

Ориентировки осей палеонапряжений для систем сопряженных жил

Table 1

Orientation of paleostress axes for conjugate vein systems

Участки наблюдений (Areas)	Кол-во замеров (<i>n</i>)	Оси палеонапряжений (paleostress axes)					
		Растяжения (1) (Tension)		Промежуточная (2) (Intermediate)		Сжатия (3) (Compression)	
		Падение (Dip)					
		Азимут (Azimuth)	∠	Азимут (Azimuth)	∠	Азимут (Azimuth)	∠
1	5	128,4	2,3	36,5	38,4	221,3	51,5
2	7	321,7	11,3	54,1	11,7	188,8	73,6
3 – 1	6	125,3	58,8	256,1	21,6	355,0	21,4
3 – 2	4	280,5	7,2	23,5	60,7	186,6	28,2
3 – 3	5	310,1	41,8	157,2	44,9	52,9	14,0
4	7	205,5	52,9	90,9	17,5	349,7	31,5

гается проявление нескольких деформационных этапов, с которыми связаны определенные типы разломов, для каждого из них (типов разломов) на каждом из выделенных участков были вычислены отдельно главные оси палеонапряжений. В результате были рассчитаны направления осей палеонапряжений нескольких генераций разломов, показанные в табл. 2. На изучаемой площади выделены две генерации надвигов и сдвигов. Первая генерация надвигов, судя по всему основная и связанная с образованием складок первой генерации, была сформирована при субгоризонтальном ($\angle 12^\circ$) сжатии северо-восточного (аз. пад. 222°) простираения. Ось растяжения субвертикальная ($\angle 77^\circ$) (рис. 7, а). Одновременно с этими же надвигами предположительно были сформированы как левые, так и правые сдвиги первых генераций (рис. 77, в, д). Затем сформировались левые сдвиги второй генерации при субгоризонтальном ($\angle 1^\circ$) сжатии запад-северо-западного (аз. пад. 287°) простираения. Ось растяжения ориентирована субгоризонтально ($\angle 12^\circ$) в субдолготном (аз. пад. 18°) направлении (рис. 7, з). Вероятно, с этими деформациями связано образование складок второй генерации. При смене оси сжатия на субгоризонтальное ($\angle 0,3^\circ$) северо-западное (аз. пад. 326°) направление образуются правые сдвиги второй генерации. Ось растяжения под острым углом ($\angle 21^\circ$) падает на северо-восток (аз. пад. 56°) (рис. 7, е). Образование надвигов второй генерации остается дискуссионным, вероятно, они связаны с формированием сдвигов поздних генераций (рис. 7, б). Безусловно, при этом необходи-

мо иметь в виду, что поздние деформации изменяли, смещали положение в пространстве более ранних разломов. Таким образом, положение осей палеонапряжений правых сдвигов как наиболее поздних разломов можно считать наиболее достоверным. Различия простираения осей палеонапряжений, а также полевые наблюдения предыдущих исследователей на смежных территориях позволяют предположить третий, правосдвиговый этап деформаций. Поскольку правые сдвиги встречаются довольно редко и, видимо, имеют незначительное влияние на общее тектоническое строение территории, значение осей палеонапряжений левых сдвигов также можно считать достоверным. Координаты осей палеонапряжений надвигов, предположительно, являются наименее точными.

Тектонические деформации вдоль зоны АТР в прошлом веке были изучены точно, но достаточно подробно [2, 10, 11]. Специальные структурные исследования вдоль р. Нельгесе, впадающей в р. Адыча в среднем ее течении, показали, что на обоих крыльях зоны разломов выявлены несколько этапов деформаций. С наиболее ранним этапом связано образование цилиндрических сжатых складок с увеличенными мощностями слоев в ядрах и почти вертикальными осевыми поверхностями. Наложенная деформация обусловлена надвигами и более поздними по отношению к ним сдвигами. В зонах надвигов отмечаются изоклинальные лежащие складки [10]. В верхнем течении р. Адыча наблюдается схожая ситуация. Здесь на обоих крыльях АТР вы-

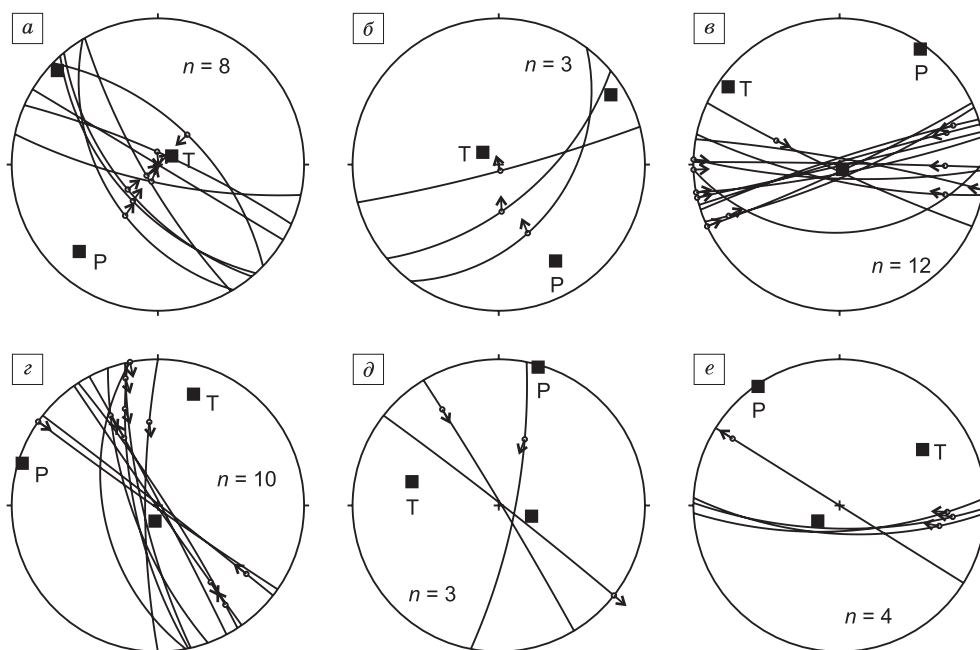


Рис. 7. Стереогаммы дуг большого круга плоскостей разломов с вычисленными осями палеонапряжений. Стрелка показывает перемещение висячего крыла. Т – ось растяжения, Р – ось сжатия. а–е см. в тексте. Усл. обозн. см. на рисунке 2.

Fig. 7. Diagrams of great-circle paths of fault planes with calculated paleostress axes. Arrow shows the movement of the hanging wall. Т – extension axis, Р – compression axis. а–е see in text. For symbols see figure 2.

деляются два этапа деформаций (две генерации складок). В первый этап образовалась основная складчатость, с которой ассоциируют надвиги. Во второй этап формировались взбрососдвиги и собственно зона АТР. Со сдвигами ассоциируют мелкие складки с субвертикальными шарнирами. Зона АТР здесь выделена как Быльнинский блок, который представляет собой сложно построенную моноклинал, состоящую из серии тектонических пластин, ограниченных взбросами. В блоке в целом преобладают взбросы, которые расчленены левыми сдвигами субширотного простирания с почти вертикальными и крутыми углами падения в основном в северном направлении [11].

Детальные структурные исследования ранее проводились на обоих крыльях центрального отрезка АТР в среднем течении р. Эльги и в нижних течениях ее притоков Тобычан и Арангас, а также на правобережье нижнего течения р. Эльги. Исследователи обращали внимание на повышенную деформированность триасовых отложений северо-восточного крыла разлома по сравнению с юго-западным. На северо-восточном крыле разлома были выделены четыре генерации складок и две генерации кливажа. На юго-

западном крыле разлома, на правобережье нижнего течения р. Эльги, наблюдается упрощение складчатой структуры. Здесь также присутствует кливаж, хотя интенсивность его заметно ослабевает. Большая часть разломов также концентрируется на северо-восточном крыле АТР. Предполагается проявление двух генераций надвигов и двух генераций сдвигов. При этом если сдвиги преимущественно группируются на северо-восточном крыле АТР, то надвиги встречаются на обоих крыльях [2].

Эти данные, дополненные результатами наших исследований, позволяют утверждать, что от среднего течения р. Адыча до устья р. Эльги интенсивность деформации меняется не только вкост зоны АТР, но и вдоль. На юго-западном крыле разлома с северо-запада на юго-восток отмечается понижение интенсивности складчатости, ее упрощение. На северо-восточном крыле разлома в том же направлении наблюдается увеличение степени деформации до среднего течения р. Эльги, сменяемое далее на юго-восток (нижнее течение р. Эльги) на ее уменьшение. В самой зоне АТР, по-видимому, в северо-западном направлении повышается количество взбросов.

Ориентировки осей палеонапряжений для разломов

Table 2

Orientation of paleostress axes for faults							
Кинематика разломов и этапы деформаций (Faults kinematics and stage of deformations)	Кол-во замеров (<i>n</i>)	Оси палеонапряжений (paleostress axes)					
		Растяжения (1) (Tension)		Промежуточная (2) (Intermediate)		Сжатия (3) (Compression)	
		Падение (dip)					
		Азимут (Azimuth)	∠	Азимут (Azimuth)	∠	Азимут (Azimuth)	∠
Надвиг (1) Thrust (1)	8	57,9	77,2	313,0	3,4	222,3	12,4
Надвиг (2) Thrust (2)	3	307,7	74,0	58,0	5,7	149,5	15,0
Левый сдвиг (1) Sinistral strike-slip (1)	12	304,9	3,8	148,2	85,8	35,0	1,6
Левый сдвиг (2) Sinistral strike-slip (2)	10	17,7	12,4	190,7	77,5	287,4	1,5
Правый сдвиг (1) Dextral strike-slip (1)	3	285,6	26,7	107,6	63,3	16,0	0,8
Правый сдвиг (2) Dextral strike-slip (2)	4	55,8	20,8	234,8	69,2	325,7	0,3

Заключение

Впервые описаны тектонические структуры, вскрытые в техногенных обнажениях левобережья нижнего течения р. Эльги, которые значительно уточнили и дополнили имеющиеся данные по тектонике центральной части зоны АТР (центральная часть Верхояно-Колымского орогенного пояса). Установлены два структурных парагенезиса. Первый включает надвиги, взбросы, сдвиги и складки первой генерации. Второй – складки второй генерации и левые сдвиги. Подтверждено сделанное ранее предположение [11] о проявлении на изученной площади как минимум двух этапов деформаций. Сложная и напряженная складчатость первого этапа здесь имеет северо-западное простирание. Видимо, преобладающие надвигово-взбросовые деформации сопровождалась довольно интенсивными левосдвиговыми, а также формированием основной части кварцевых жил. Наложенные левосдвиговые деформации сопровождалась менее интенсивной складчатостью с субвертикальными шарнирами. Сделано предположение о возможном существовании третьего этапа деформаций, связанного с образованием правосторонних сдвигов. Впервые установлена не только поперечная, но и продоль-

ная изменчивость интенсивности тектонических деформаций вдоль АТР. С северо-запада на юго-восток на юго-западном крыле зоны разломов понижается интенсивность деформационных структур. В том же направлении на северо-восточном крыле наблюдается постепенное увеличение интенсивности деформаций до среднего течения р. Эльги, сменяемое ее уменьшением в юго-восточном направлении (нижнее течение р. Эльги). Предполагается, что в северо-западном направлении повышается взбросовая компонента в зоне АТР. Впервые установлена ориентировка осей палеонапряжений, под действием которых были сформированы тектонические структуры изученной территории. Структуры первого этапа деформаций, преобладающим типом разломов которого являются надвиги, были сформированы при субгоризонтальном сжатии северо-восточного простирания. Ориентировка осей палеонапряжений этого этапа наименее точная. Структуры второго, левосдвигового этапа деформаций были образованы при субгоризонтальной ориентировке осей субширотного сжатия и субдолготного растяжения. Последующие правосдвиговые деформации происходили при субгоризонтальном сжатии северо-западного простирания и северо-восточном слабонаклонном растяжении.

Литература

1. Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
2. Парфенов Л.М., Рожин С.С., Третьяков Ф.Ф. О природе Адыча-Тарынской зоны разломов (Восточное Верхоянье) // Геотектоника. 1988. № 4. С. 99–102.
3. Родыгин А.И. Азимутальные проекции в структурной геологии. Томск: Изд. ТГУ, 1992. 136 с.
4. Родыгин А.И. Методы стрейн-анализа. Учебное пособие. Издание второе, исправленное и дополненное. Томск: Изд-во Томского ун-та, 2006. 168 с.
5. Marrett R., Allmendinger R. Kinematic analysis of fault-slip data // Journal of Structural Geology. 1990. Vol. 12. P. 973–986.
6. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. С. 376–535.
7. Hancock P.L., Kadhi T. Analysis of mesoscopic fractures in the Dhruma-Nisah segment of the central Arabian graben system // Journal of the Geological Society of London, 1978. Vol. 135. P. 339–347.
8. Акулов Б.И., Данилогорский Е.П. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Верхоянская серия. Лист Q-54-XXXV. Объяснительная записка. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1968. 81 с.
9. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Верхоянская. Лист Q-54-XXXIV. Объяснительная записка. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1968. 88 с.
10. Архипов Ю.В., Парфенов Л.М. Об Адычанской зоне пологих дислокаций // Докл. АН СССР. 1980. Т. 250, № 1. С. 155–158.
11. Архипов Ю.В., Климаш В.П., Попов Л.Н., Трущелев А.М., Шапкина И.А. Геологическое строение Былыньинского блока в центральной части Адыча-Тарынского разлома (верхнее течение р. Адыча) // Геотектоника. 1981. № 4. С. 78–89.

Поступила в редакцию 26.08.2021

Принята к публикации 13.10.2021

Об авторах

ВАСИЛЬЕВ Дмитрий Анатольевич, научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-1201-3805>, e-mail: juorankhay@mail.ru;

ПРОКОПЬЕВ Андрей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, e-mail: prokopiev@diamond.ysn.ru.

Информация для цитирования

Васильев Д.А., Прокопьев А.В. Новые данные о тектонике Адыча-Тарынской зоны разломов (Восточная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 5–15. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-5-15>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-5-15

New data on the tectonics of the Adych-Taryn fault zone (Eastern Yakutia)

D.A. Vasiliev*, A.V. Prokopiev**

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

**juorankhay@mail.ru*

***prokopiev@diamond.ysn.ru*

Abstract. In the central part of the regional Adycha-Taryn fault (ATF) zone, separating the Adycha-Elginsky and Nersky anticlinoria (Verkhoyansk-Kolyma folded area), three stages of tectonic deformation in the Upper Triassic rocks have been established. In the first stage, thrusts and folds of the northwest strike

formed. Deformations of the second stage are represented by folds with steep hinges and associated sinistral strike-slip faults. The third stage of deformation marked by the formation of dextral strike-slip faults is also presumed. It is established for the first time that the intensity of tectonic deformations varies both along and across the ATF. The intensity of deformations decreases from northwest to southeast on the southwest flank of the ATF zone. On its NE flank, the deformation intensity gradually increases in the same direction. The orientation of paleostress axes responsible for the formation of tectonic structures in the study area was determined for the first time. Folds and thrusts of the first deformation stage were formed under NE-directed subhorizontal compression. The formation of sinistral strike-slip faults and associated folds of the second stage was related to subhorizontal compression in sublatitudinal direction. Subsequent dextral strike-slip faults resulted from NW-directed subhorizontal compression and NE-oriented subhorizontal extension.

Keywords: tectonics, structural geology, the Verkhoyansk-Kolyma orogenic belt.

Acknowledgements. The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project № 19-05-00945).

References

1. Parfenov L.M., Kuzmin M.I. Tectonika, geodynamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutia). Moskva: MAIK «Nauka/Interperiodica», 2001. 571 p.
2. Parfenov L.M., Rozhin S.S., Tretyakov F.F. O prirode Adycha-Tarynskoy zony razlomov (Vostochnoye Verkhoyan'ye) // Geotektonika. 1988. No. 4. P. 99–102.
3. Rodygin A.I. Azimutal'nye proektsii v strukturnoy geologii. Tomsk: Izdatel'stvo TSU, 1992. 136 p.
4. Rodygin A.I. Metody strein-analiza. Uchebnoe posobie. Izdanie vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Un-ta, 2006. 168 p.
5. Marrett R., Allmendinger R. Kinematic analysis of fault-slip data // Journal of Structural Geology. 1990. Vol. 12. P. 973–986.
6. Gzovskiy M.V. Osnovy tektonofiziki. Moskva: Nauka, 1975. P. 376–535.
7. Hancock P.L., Kadhi T. Analysis of mesoscopic fractures in the Dhruma-Nisah segment of the central Arabian graben system // Journal of the Geological Society of London. 1978. Vol. 135. P. 339–347.
8. Akulov B.I., Danilogorsky E.P. Geological map of the USSR on a scale of 1: 200 000. Verkhoyanskaya series. Sheet Q-54-XXXV. Explanatory note. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Literature on Geology and Subsoil Protection, 1968. 81 p.
9. Danilogorsky E.P. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Verkhoyanskaya seriya. List Q-54-XXXV. Ob'yasnitel'naya zapiska. Moskva: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr, 1968. 88 p.
10. Arkhipov Yu.V., Parfenov L.M. Ob Adychanskoy zone pologikh dislokatsiy // Dokl. AN SSSR. 1980. Vol. 250, No. 1. P. 155–158.
11. Arkhipov Yu.V., Klimash V.P., Popov L.N., Trushchelev A.M., Shashkina I.A. Geologicheskoye stroeniye Bylyn'inskogo bloka v tsentral'noy chasti Adycha-Tarynskogo razloma (verkhneye techeniye r. Adycha) // Geotektonika. 1981. No. 4. P. 78–89.

About the authors

VASILIEV, Dmitry Anatolyevich, researcher scientist, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<http://orcid.org/0000-0003-1201-3805>, e-mail: juorankhay@mail.ru;

PROKOPIEV, Andrei Vladimirovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), associate professor, head of the laboratory, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<http://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, e-mail: prokopiev@diamond.ysn.ru.

Citation

Vasiliev D.A., Prokopiev A.V. New data on the tectonics of the Adych-Taryn fault zone (Eastern Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 5–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-5-15>

Медно-никелевое сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита

А.В. Округин^{1,*}, А. Л. Земнухов², А.И. Журавлев¹

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

²АО «Алмазы Анабара», Якутск, Россия

*okrugin@diamond.ysn.ru

Аннотация. Приводится описание сульфидных нодулей из глыбы долеритов, найденной на террасе р. Большая Куонамка на восточном борту Анабарского щита (северо-восток Сибирской платформы). Долериты представлены среднезернистыми породами с офитовой структурой, состоят в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномagnetита, реже встречаются КППШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит. По химическому составу и структуре эти долериты похожи на докембрийские субщелочные долериты. Сульфиды в изученных долеритах встречаются в виде отдельных сегрегаций округлой формы размером до 8 мм, состоящие в основном из пирротина и халькопирита. Часто встречаются мелкие (от первых мкм до 0,5 мм) каплевидные выделения пирротина и халькопирита. Такие формы выделений сульфидных минералов свидетельствуют о том, что при слиянии первичных мелких сульфидных капелек, не смешивающихся с силикатной магмой, формируются крупные желваки. В сульфидных сегрегациях реже встречаются зигенит $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, герсдорфит NiAsS с высоким содержанием Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %, галенит, сфалерит и другие. Сульфидные минералы часто тяготеют к скоплениям Ti-магнетита и апатита, образуя тесные сульфид-apatит-титаномagnetитовые обособления. Наличие в магматических породах ликвационных сульфидных обособлений является одним из важных критериев насыщенности магматических расплавов сульфидами, свидетельствующим об их потенциальной рудоносности. Подобная форма и аналогичная ассоциация сульфидных минералов характерна для платиноидно-медно-никелевых сульфидных месторождений Норильского района. Прожилково-вкрапленная медно-никелевая минерализация известна в такситовых габбро-долеритах Будьурхайской дайки по р. Кенгеде, что позволяет предположить возможное присутствие на Анабарском щите докембрийских базитов с Cu–Ni сульфидным оруденением.

Ключевые слова: медно-никелевые руды, сульфиды, долериты, Сибирская платформа, Анабарский щит.

Благодарности. Авторы благодарят коллег, участвовавших в выполнении полевых работ: Андросова А.Р. – начальника и Находкина А.П. – геолога горно-проходческого отряда № 1 ГРП «Куонамская», а также ведущих инженеров ИГАБМ Христофорову Н.В., Самсонову О.К., Васильеву А.С., Замийскую О.Д. и Васильеву Т.И. за проведение аналитических исследований. Работа выполнена в рамках НИР ИГАБМ СО РАН (№ 0381-2019-0003).

Введение

Крупные сульфидные PGE–Cu–Ni-месторождения в основном связаны с комплексом докембрийских базит-ультрабазитовых пород: Канадский щит (Садбери, Томпсон), Балтийский щит (Мончегорское и др.), Австралия – (Камбалда) и др. Фанерозойская эпоха в целом бедна проявлением сульфидоносных магматических образований, за исключением Норильских месторождений – крупнейших среди подобных месторождений [1–3].

Одним из важных критериев насыщенности сульфидами магматических расплавов, которые могут быть потенциальными источниками, является наличие в них ликвационных сульфидных обособлений. В связи с этим в данном сообщении нами обсуждаются типоморфные особенности сульфидных минералов, слагающих нодулярные выделения ликвационного типа, обнаруженных в долеритах на восточном склоне Анабарского щита. Также рассматриваются минералого-геохимические характеристики долеритов в сопо-

ставлении с базитами восточной части Анабарского массива с целью оценки потенциальной медно-никелевой рудоносности данного района. Подобные исследования имеют не только научное значение, но и практический интерес с точки зрения комплексного изучения металлоносности всего Восточного Прианабарья. Этот район является

одним из самых перспективных Арктических районов Якутии, где сосредоточены крупные загадочные россыпные месторождения алмазов с попутными благородными металлами – платиной и золотом, а также уникальное в мире Томторское месторождение с богатейшими содержаниями ниобий-редкоземельных металлов (рис. 1).

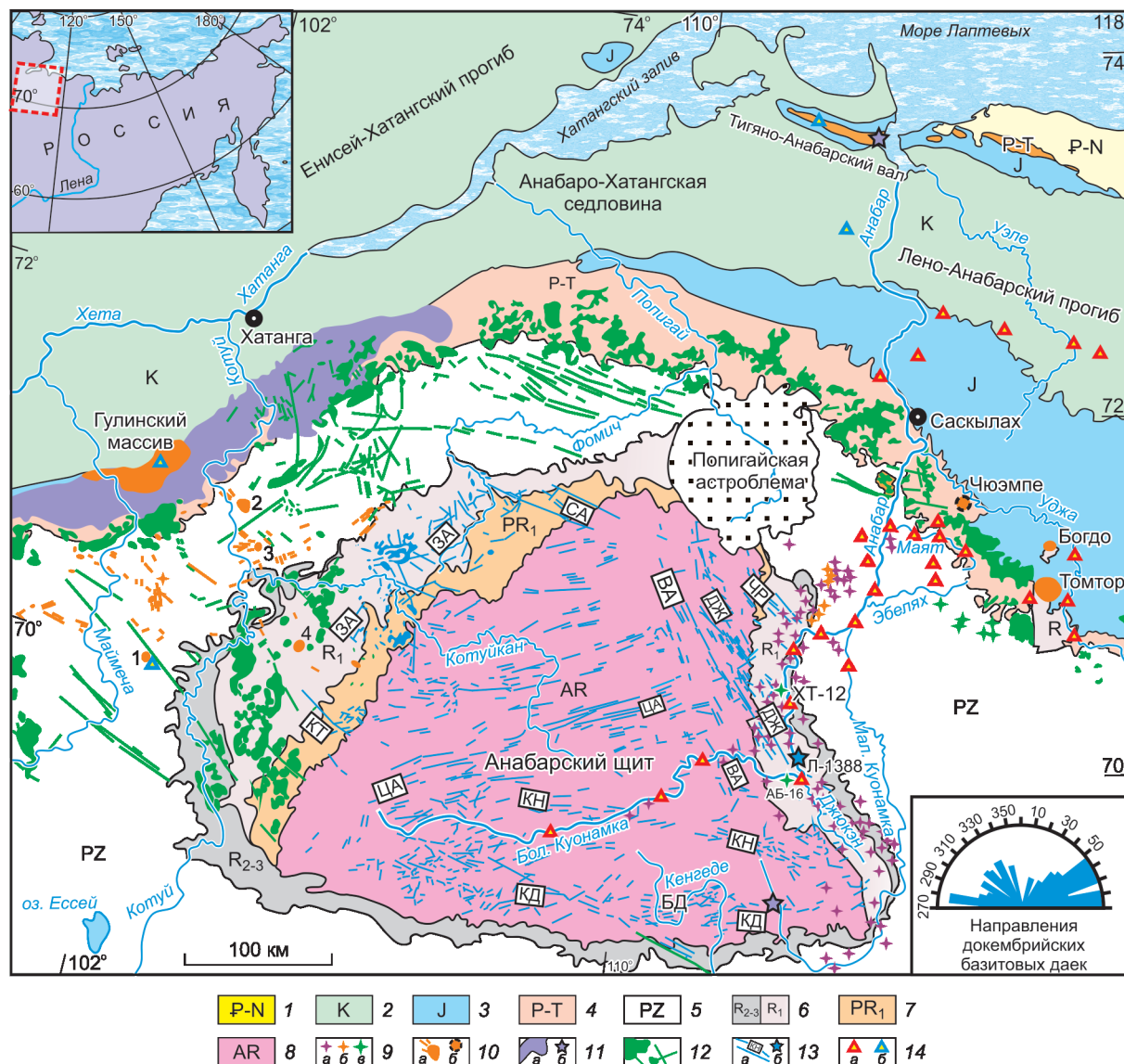


Рис. 1. Схема распространения магматитов и золотоплатиноносных россыпей проявлений на севере Сибирской платформы.

1 – палеоген-неогеновые осадки; 2 – меловые пески, алевроиты и галечники; 3 – юрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 4 – пермские и триасовые песчаники, алевролиты; 5 – палеозойские доломиты, известняки, мергели и песчаники; 6 – средне-верхнерифейские (R_{2-3} – 1400–600 млн лет) и нижнерифейские (R_1 – 1650–1400 млн лет) конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты и доломиты; 7 – нижнепротерозойские породы (1900–1650 млн лет); 8 – архейские метаморфические комплексы; 9 – кимберлитовые (а), карбонатитовые (б) и базитовые (в – ХТ-12, АБ-16 и др.) трубки; 10 – интрузии и дайки щелочных и ультраосновных пород с карбонатами: а – установленные (1 – Гули, 2 – Бор-Урах, 3 – Одихинча, 4 – Кугда, 5 – Маган; Томгор, Богдо и др.), б – предполагаемые (8 – Чюэмп); 11 – эффузивы базальтов и щелочных базальтоидов (а) и пикритобазальты устья р. Анабар и дайка мейчиктоподобных пород в верховьях р. Малая Куонамка [26] (б); 12 – силы и дайки Р-Т долеритов и трахидолеритов; 13 – (а) позднекомбейрийские дайковые пояса (ДЖ – Джукенский, ВА – Восточно-

Анабарский, ЗА – Западно-Анабарский, КД – Кенгединский, КН – Куонамский, КТ – Котуйский, СА – Северо-Анабарский, ЧР – Чирээсский) базитов (БД – Будурхайская дайка), (б) место находки долерита Л-1388; 14 – россыпи золота с Fe-Pt (а) и Ir-Os минералами (б). Построена на основе геологической карты Сибирской платформы масштаба 1:1 500 000, 1999 г. Отделы докембрийского периода даны в соответствии с Международной стратиграфической шкалой 2006 г.

Fig. 1. Scheme of distribution of magmatites and gold-platinum-bearing placers in the north of the Siberian platform.

1 – Paleogene-Neogene sediments; 2 – Cretaceous sands, silts and gravels; 3 – Jurassic conglomerates, sandstones, siltstones; 4 – Permian and Triassic sandstones, siltstones; 5 – Paleozoic dolomites, limestones, marlstones and sandstones; 6 – middle-upper Riphean (R_{2-3} – 1400–600 Ma) and lower Riphean (R_1 – 1650–1400 Ma) conglomerates, sandstones, siltstones, argillite and dolomites; 7 – Lower Proterozoic rocks (1900–1650 Ma); 8 – Archean metamorphic complexes; 9 – kimberlite (а), carbonatite (б) and basite (в – XT-12, AB-16 et al.) pipes; 10 – intrusions and dikes of alkaline and ultrabasic rocks with carbonatites: а – founded (1 – Guli, 2 – Bor-Uryakh, 3 – Odikhincha, 4 – Kugda, 5 – Magan, 6 – Tomtor, 7 – Bogdo, etc.), б – supposed (8 – Chuempе); 11 – effusive basalts and alkaline basaltoids (а) and picrite-basalts, the estuary of the r. Anabar and similar to meimechites dyke, upper reaches of the r. Malaya Kuonamka [26] (б); 12 – sills and dikes of P – T dolerites and trachydolerites; 13 – (а) Late Precambrian dyke swarms (ДЖ – Djukensky, ВА – Vostochno-Anabarsky, ЗА – Zapadno-Anabarsky, КД – Kengedinsky, КН – Kuonamsky, КТ – Kotuysky, СА – Severo-Anabarsky, and ЧР – Chiersky swarms; КД – Budyurhai dyke); (б) – location of the dolerite sample L-1388; 14 – placers of gold with Fe-Pt (а) and Ir-Os minerals (б). Constructed on the basis of a geological map of the Siberian platform with scale 1:1500000, 1999. Precambrian divisions are given in accordance with the International Stratigraphic Chart, 2006.

Фактический материал и методы исследований

В ходе проведения АО «Алмазы Анабара» поисково-оценочных работ на участке «Средний» россыпного месторождения алмазов р. Большая Куонамка в декабре 2019 г. в глыбе долеритов (образец Л-1388), поднятой с глубины около 8 м (в шурфе 44л разведочной линии 1388) на террасе р. Большая Куонамка, в 18 км ниже устья притока Джюкен, были обнаружены визуально определяемые округлые сульфидные нодулы размером от 1 до 10 мм в поперечнике.

Подготовка проб и изучение образца Л-1388 проводились традиционными способами с применением оптических методов. Состав минералов долеритов и сульфидных обособлений в них определялся на микрозондовом анализаторе Camebax-Micro французской фирмы Cameca, а их микроструктурные взаимоотношения изучались на сканирующем микроскопе JSM-6480LV японской фирмы JEOL в лаборатории рентгено-спектральных методов анализа в ИГАБМ СО РАН. В качестве эталонов применялись стандартизированные минералы, чистые металлы и их сплавы. Режимы съемки: 20 кВ, ток 30 нА, время 7 с. Рентгенофазовый анализ выполнен на дифрактометре D2 PHASER, CuK_α -излучение, 30 кВ, 10 мА, для диагностики минералов использована база данных PDF-2. Силикатные и полуколичественные спектральные анализы долеритов выполнены также в лабораториях нашего института.

Вещественный состав долеритов Л-1388

Вмещающие сульфидные вкрапления долериты Л-1388 представлены среднезернистыми светло-серыми породами офитовой структуры

(рис. 2), состоящими в основном из плагиоклаза, клинопироксена и титаномагнетита, реже содержащими КППШ, амфибол, ромбический пироксен, апатит хлорит, цеолит, кварц, кальцит и ильменит. Пластинчатые кристаллы плагиоклаза, размером до 5 мм в удлинении занимают примерно половину объема породы. Они, по данным микрозондового анализа, имеют состав от лабрадора (An_{57}) до андезина (Ab_{65}) с ортоклазовым компонентом от 3 до 13 % соответственно и находятся в мелкозернистой основной массе, состоящей из авгита (30–35 %), Ti-магнетита (3–5 %, местами до 10 %), реже КППШ, амфибола, ромбического пироксена, псевдоморфоз по оливину (?).

Авгит состава ($\text{Wo}_{31-40}\text{En}_{40-45}\text{Fs}_{18-26}$) представлен призматическими зернами и изометричными выделениями неправильной формы размером до 1 мм. Титаномагнетит обычно образует отдельные хорошо ограниченные полигональные кристаллы размером 0,1–0,5 мм. Кроме постоянной примеси TiO_2 (19–24 %) магнетит содержит Al_2O_3 (1,2–3,3 %), MnO (0,6–1,3 %), MgO (0,2–1,3 %) и Cr_2O_3 (до 0,12 %). Редкие мелкие пластинчатые зерна ильменита содержат незначительные примеси MgO (0,9–2 %), MnO (0,6–1,2 %) и Al_2O_3 (до 0,5 %).

В породе редко встречаются псевдоморфозы по округлым зернам (оливина?) размером 0,1–0,5 мм, находящимся в виде включений в плагиоклазе или в основной массе. По пироксену развивается амфибол, по составу отвечающий обыкновенной роговой обманке. Были также зафиксированы клиноэнстатит ($\text{Wo}_{4,6}\text{En}_{64}\text{Fs}_{31,4}$) и пижонит ($\text{Wo}_{13}\text{En}_{56}\text{Fs}_{31}$), кальцит, цеолиты и кварц. В основной массе наблюдаются мельчайшие гексагональные призматические кри-

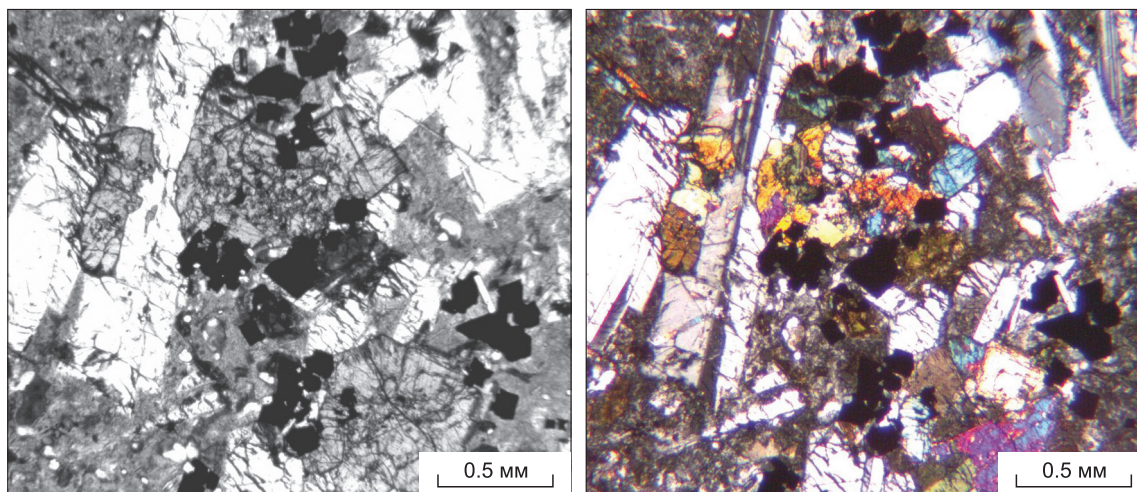


Рис. 2. Офитовая структура долеритов Л-1388, справа снимок при скрещенных николях. Белые таблитчатые вкрапления – плагиоклаз; округлые яркоокрашенные зерна – авгит; черные полигональные кристаллики – титаномagnetит; темно-серые мутные интерстиционные выделения – вторичные минералы.

Fig. 2. Ophitic texture of the dolerite L-1388, on the right is a picture with crossed nicols. White tabular phenocrysts – plagioclase; rounded vivid colored grains – augite; black polygonal crystals – titanomagnetite; dark-grey cloudy interstice precipitates – secondary minerals.

сталлики апатита до 0,1–0,5 мм в длину, содержащего F от 2,6 до 5,6 %.

Долерит Л-1388 по составу на классификационной диаграмме кремнезем–сумма щелочей (рис. 3), согласно Петрографическому кодексу России 2008 г., попадает в поле базальтов (Б). На этой диаграмме составы докембрийских базитов Анабарского массива образуют протяженную серию пород, занимающих преимущественно широкую промежуточную полосу между нормально щелочными базальтами (Б) – андезибазальтами (АБ) и трахибазальтами (ТБ) – трахиандезибазальтами (ТАБ). В редких сложных дифференцированных многофазных дайках появляются кварцевые габбро-диориты и кварцевые монзонит-порфиры, переходящие в области андезитов (А) и трахиандезитов (ТА). Это обусловлено дифференциацией расплава как *in situ*, так и в протяженных магматических каналах. Отдельные разрозненные маломощные тела сложены однородными породами, но они могут резко различаться по составу, что объясняется поступлением разных дифференциатов магмы из глубинных очагов.

Первые доказательства рифейского возраста базитов Анабарского массива были приведены в работах Е.С. Кутейникова, М.С. Мащака, Л.П. Белякова, В.Л. Масайтиса и других [4, 5; и др.]. В результате проведенных нами исследований базитов бассейнов рек Большая Куонамка, Хаптасынна и Котуйкан по петрохимическим осо-

бенностям были выделены три группы базитов [6]. Проявления базитового магматизма более позднего возраста, аналогичные толеитовым долеритам трапповой формации, широко развиты в основном на западном склоне Анабарского щита (276–406 млн лет, К–Аг-определения). В пределах Анабарского щита докембрийские базиты образуют протяженные дайковые рои длиной до 200–300 км и шириной до нескольких десятков км (см. рис. 1). По простиранию, геологическому положению и особенностям состава пород даек нами были выделены следующие дайковые пояса: Кенгединский (КД), Куонамский (КН), Центрально-Анабарский (ЦА), Котуйканский (КК), Северо-Анабарский (СА), Восточно-Анабарский (ВА), Джюкенский (ДЖ), Чиэрэсский (ЧР), Котуйский (КТ) и Западно-Анабарский (ЗА) [7]. Протяженность отдельных даек колеблется от десятков метров до нескольких км при мощности от первых метров до 100–200 м. Падение тел крутое, мелкие дайки имеют в плане линзовидные выклинивающиеся формы. Нашими последующими исследованиями базитов Анабарского щита на основе прецизионных определений возраста (U–Pb-датирования) даек под руководством канадского ученого Ричарда Эрнста было установлено, что на Анабарском щите формирование Куонамского (КН) дайкового пояса происходило 1500 млн лет назад [8], а Чиэрэсского (ЧР) и Восточно-Анабарского (ВА) поясов 1380 млн лет назад [9–11].

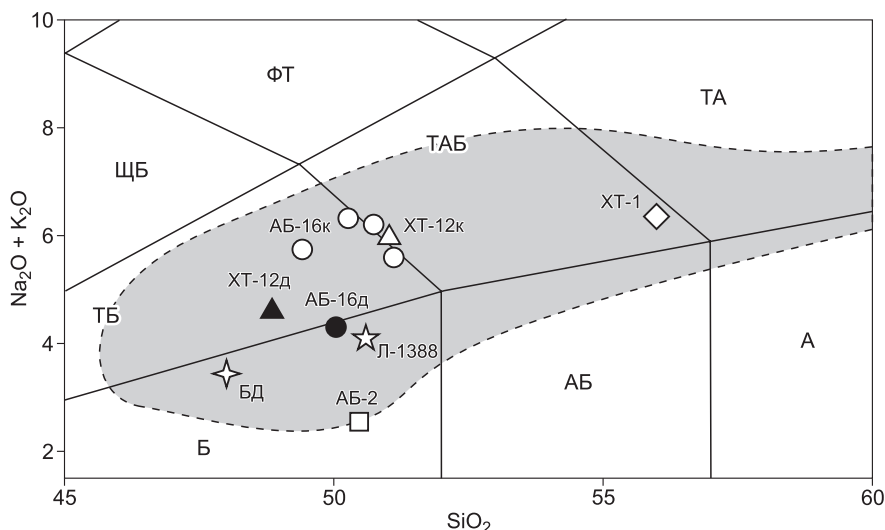


Рис. 3. Составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита.

Номера у символов соответствуют номерам проб в табл. 1. Серое поле – составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита, остальные пояснения в тексте.

Fig. 3. Compositions of Late Precambrian dykes in the Anabar shield.

Numbers at the symbols correspond to the numbers of the samples in Table 1. Grey field – compositions of Late Precambrian basites in the Anabar shield, other explanations in the text.

По составу изученные долериты Л-1388 (см. табл. 1) наиболее близки долеритам АБ-16д из дайки сложного строения, состоящего в основном из миндалекаменных калиевых магматитов АБ-16к. Эта дайка принадлежит Джюкенскому (ДЖ) поясу, и долериты в ней встречаются в виде обломков глыбового размера, а также при-контактные зоны этой же дайки сложены такими же долеритами, т. е. калиевые миндалекаменные магматиты образуют сложный туффизитовый аппарат. Такое же сложное строение имеет и Талахтагская диатрема (обр. ХТ-12к в табл. 1), отнесенная рядом исследователей к продуктам лампроитового магматизма. Калиевые магматиты отличаются от интродуцируемых ими долеритов, так же как и от долеритов Л-1388, более высоким содержанием MgO и K_2O , резким снижением MnO , CaO и Na_2O . Свое видение причин такого загадочного процесса мы излагали ранее [12].

От базитов других близлежащих дайковых поясов (ВА, ЧР, КН, см. табл. 1) востока Анабарского щита долериты Л-1388 отличаются повышенным содержанием TiO_2 , P_2O_5 и Ni , более умеренным количеством MgO , K_2O и Cr . Долеритам Л-1388 наиболее близки также породы Будархайской дайки (БД на рис. 1) Кенгединского (КД) дайкового пояса. При проведении геологической съемки в 1966–1967 гг. М.С. Машаком [4, 5] были установлены зоны с сульфидной медно-ни-

келевой минерализацией в пределах Харапской и Будархайской даек. Сульфидная минерализация связана с такситовыми диабазами и прослеживается на сотни метров шириной 2–3 м, иногда до 5–6 м, а в локальных раздувах до 8–9 м, в которых заметно увеличивается размер сульфидов и их содержание, достигающее до 8–10, реже 15 %.

Форма мелких вкрапленников – неправильная, обусловленная их интерстициальным положением. Основным минералом является пирротин (90–95 %), содержащий редкие линзовидные включения пентландита. Халькопирит занимает 5–10 % и развивается обычно по границе пирротина с нерудными минералами. Крупные шпировые обособления сульфидов имеют неправильную, реже изометричную форму размером 15–20 мм в среднем. Краевые части сульфидных нодул сложены титаномagnetитом, с пластинчатыми структурами распада ильменита. Реже в сульфидах встречаются кубанит, макиновит, виоларит, бравоит, миллерит, борнит, пирит и другие. М.С. Машак [4] сопоставляет сульфидоносные такситовые диабазы с аналогичными породами норильских интрузий.

Сульфидные минералы долеритов Л-1388

Основным минералом в сульфидных желваках овальной формы размером до 8 мм (рис. 4, а) и

Химические составы позднедокембрийских базитов Анабарского щита

Table 1

Chemical composition of Late Precambrian dykes of the Anabar Shield

Элемент/ Element	Пояса ¹ /Swarms ¹								
	ДЖ	ДЖ	ДЖ	ДЖ	КД	ВА	ЧР	ЧР	КН
	Дайки/Dykes								
	Л-1388	АБ-16д ²	АБ-16к	ХТ-12к	БД ³	ХТ-1л	ХТ-11д	ХТ-11м	АБ-2
SiO ₂ , %	49,30	48,40	47,97	47,13	47,42	55,24	47,21	53,94	49,65
TiO ₂	3,32	3,27	3,42	1,86	3,60	2,13	2,20	1,44	1,82
Al ₂ O ₃	13,00	12,07	13,08	14,49	12,22	13,50	15,09	16,22	13,10
Fe ₂ O ₃	7,45	7,09	7,87	6,49	5,67	2,57	5,50	5,12	4,11
FeO	7,22	8,09	5,80	5,17	11,07	8,80	8,08	5,56	10,74
MnO	0,14	0,20	0,03	0,01	0,14	0,16	0,20	0,08	0,20
MgO	4,40	5,34	8,32	11,62	5,87	3,37	6,69	4,42	6,44
CaO	7,27	8,28	2,19	0,52	8,90	6,08	6,62	1,67	10,16
Na ₂ O	2,22	2,44	0,70	0,01	2,70	3,09	2,78	4,98	2,02
K ₂ O	1,83	1,82	5,31	5,69	0,62	3,15	2,32	2,54	0,53
P ₂ O ₅	1,14	0,81	0,91	0,20	0,26	0,76	0,44	0,56	0,19
п.п.п.	2,68	2,76	4,74	7,00	1,38	1,12	3,08	3,30	1,64
Сумма	99,97	100,57	100,34	100,19	99,85	99,97	100,21	99,83	100,60
n	3	5	6	6	25	10	10	2	7
Ni, г/т	500	59	61	136	82	33	62	13	130
Co	50	40	32	26	43	26	48	24	50
Cr	40	48	67	152	95	260	110	130	110
V	200	220	230	285	505	200	300	90	240
Sc	20	21	25	40	49	36	35	25	29
Cu	50	45	45	61	260	20	132	20	210
Zn	150	190	290	99	63	140	110	100	113
Pb	7,0	5,3	6,7	2,8	2,4	19,0	3,3	3,0	3,7
Sn	3,0	2,3	2,9	1,6	2,3	2,1	1,6	2,5	1,5
Ge	1,5	1,5	2,0	3,4	1,7	1,7	1,4	1,4	2,1
n	3	5	6	6	66	20	18	10	20

Примечание. ¹ – дайковые пояса: ДЖ – Джюкенский, КД – Кенгединский, ВА – Восточно-Анабарский, ЧР – Чиэрэсский, КН – Куонамский; ² – буквенные обозначения пород в дифференцированных дайках: д – долериты; к – калиевые магматиты; л – лейкодолериты и диориты; м – монзониты. ³ – данные по Будьурхайской дайке по [5], остальные по [7, 12].

Note. ¹ – dyke swarms: ДЖ – Djukensky, КД – Kengedinsky, ВА – Vostochno-Anabarsky, ЧР – Chieresky, КН – Kuonamsky; ² – letter designations of rocks in differentiated dikes: д – dolerites; к – potassium magmatites; л – leucodolerites and diorites; м – monzonites. ³ – data on the Budyurhai dyke (БД) according to [5], the rest according to [7, 12].

мелких вкраплениях в долерите Л-1388 является пирротин, по тонким сетчатым трещинкам которого развиты вторичные минералы. Вторым по распространенности сульфидом является халькопирит, образующий тонкие (до 10–30 мкм) ка-

емки вокруг пирротина и проникающие извилистые прожилки (рис. 4, в). Вокруг желвака часто формируются скопления отдельных хорошо ограненных кристаллов до 0,5 мм или тесных сростаний многих оплавленных индивидов титано-

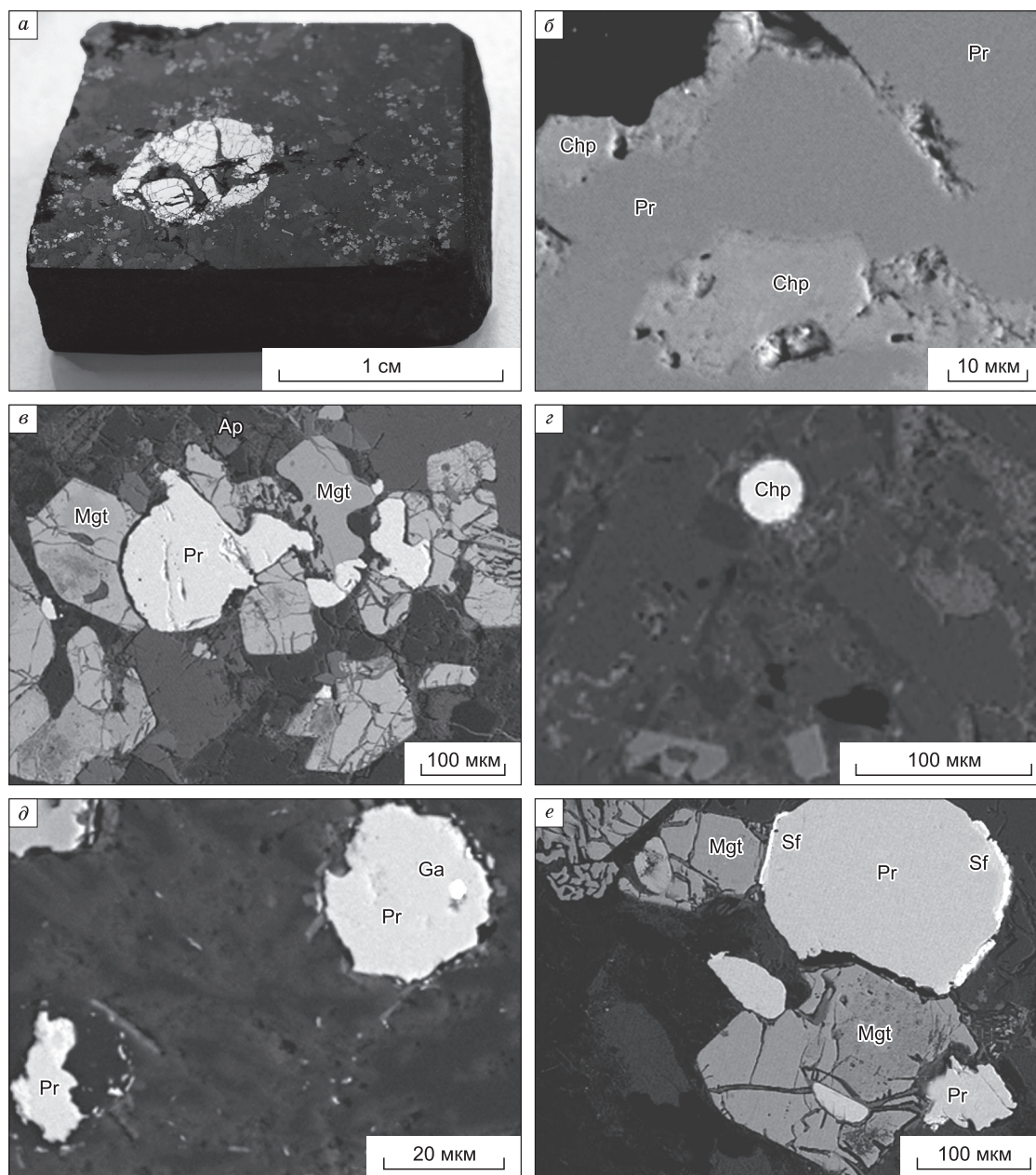


Рис. 4. Минералы сульфидного желвака (а, б) и мелких выделений апатит-титаномagnetит-сульфидной ассоциации (в–е) в долеритах р. Большая Куонамка. Минералы: Pr – пирротин, Chp – халькопирит, Mgt – магнетит, Ap – апатит, Ga – галенит, Sf – сфалерит.

Fig. 4. Minerals of the sulfide nodule (a, б) and small precipitates of the apatite-titanomagnetite-sulfide association (в–е) in the dolerites of the r. Bol'shaya Kuonamka. Minerals: Pr – pyrrhotite, Chp – chalcopryrite, Mgt – magnetite, Ap – apatite, Ga – galena, Sf – sphalerite.

магнетита, которые ассоциируют с пирротином и апатитом (рис. 4, в).

Кроме крупных округлых нодулей в долеритах наблюдаются и мелкие обособленные капельки халькопирита и пирротина размером от первых мкм до 0,1–0,2 мм (рис. 4, з, д). Сульфидные капельки часто тяготеют к скоплени-

ям титаномagnetита и апатита, образуя тесные сульфид-apatит-титаномagnetитовые обособления (рис. 4, е). При коалесценции (coalescence – слияние, соединение) отдельных сульфидных капелек, не смешивающихся с силикатной магмой, формируются вышеописанные крупные желваки. Они состоят в основном из пирротина, окаймлен-

ного тонкой оболочкой халькопирита и пронизанные извилистыми прожилками халькопирита, а также содержащие по периферии многочисленные амёбовидные включения Тi-магнетита.

Остальные редкие сульфидные минералы представлены зигенитом – $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, герсдорфитом NiAsS с высоким содержанием Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %, галенитом, сфалеритом и другими неопределёнными фазами. Из-за мелких размеров они трудно поддаются качественному анализу. Например, в пирротине встречаются мелкие (~3 мкм) изометричные включения галенита (см. рис. 4, д), а в одном случае вокруг «капельки» пирротина зафиксировано наличие тонкой каемки сфалерита (см. рис. 4, е).

Как показали микрозондовые анализы (табл. 2), пирротин с большим дефицитом металла и относится к моноклинному пирротину Fe_7S_8 , что подтверждается рентгенофазовым анализом. На дифрактограммах некоторые слабые линии мо-

гут быть отнесены к халькопириту, пентландиту, пириту, миллериту и ковеллину. Установлены небольшие примеси Ni и Co. Значительные количества этих примесей в некоторых анализах (1-44, см. табл. 2), возможно, объясняются присутствием в пирротине тонких структур распада, представленных пентландитом. В халькопирите значительных примесей не установлено.

В виде мелких включений обнаружены фазы, отвечающие по составу зигениту $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$, промежуточному члену ряда полидимит Ni_3S_4 – линнеит Co_3S_4 – минералов группы тиошпинелей. По составу этот минерал из долерита Л-1388 очень похож на зигенит из ликвационных «капелек», сложенных пирротинном, халькопиритом, пентландитом, борнитом, пиритом и магнетитом, в рифейско-вендских пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала [13, 14]. В них среди других минералов также установлены галенит и сфалерит, что сближает ассоциацию

Таблица 2

Составы сульфидных минералов, мас. %

Table 2

Composition of sulfide minerals, wt. %

Sample	Fe	Co	Ni	Cu	Sb	S	As	Total
Моноклинный пирротин/monoclinic pyrrhotite Fe_7S_8								
1-88	57,41	0,16	0,78	0,00	–	37,71	0,99	97,65
1-113	58,99	0,50	0,32	0,03	–	38,66	1,68	101,37
1-95	58,77	0,19	0,33	0,00	–	40,45	0,27	100,10
1-100	58,45	0,19	0,20	0,00	–	39,09	0,86	99,91
Халькопирит/chalcopyrite CuFeS_2								
1-47	30,29	0,08	0,02	34,56	–	33,58	0,46	99,71
1-48	30,78	0,07	0,02	34,57	–	33,64	0,21	99,35
2-20	29,78	0,05	0,02	33,80	–	33,09	0,30	97,59
Пирротин + пентландит (?)/Pyrrhotite + pentlandite (?)								
1-44	35,42	10,57	5,91	1,47	–	39,67	0,27	93,36
Зигенит /siegenite $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})_3\text{S}_4$								
2-53	8,03	28,01	17,17	8,03	–	38,65	0,22	100,13
2-58	3,92	33,96	20,92	0,20	–	38,48	0,21	97,69
Герсдорфит NiAsS с примесью Fe, Co и Sb/ gersdorffite NiAsS with impurity Fe, Co и Sb								
2-3-3	6,03	12,57	14,47	–	–	15,17	50,09	98,34
2-2-5	5,62	12,87	16,44	–	2,99	17,37	44,25	99,14
Пирит/pyrite								
2-18	46,30	0,18	0,29	0,00	–	51,46	0,15	98,48
1-93	46,69	0,08	0,01	0,01	–	53,26	0,11	100,18

сульфидных минералов из пикродолеритов Южного Урала с минералами, обнаруженными нами в долеритах Л-1388.

Обнаружен также редкий сульфоарсенид Ni, Co и Fe, близкий по составу к герсдорфиту – NiAsS. В герсдорфите Л-1388 отмечаются высокие содержания Fe до 6 %, Co до 12 % и Sb до 3 %. Герсдорфит из норильских руд содержит меньшее количество Fe – 1,2 %, Co – 1 %, но больше Sb – 4 % [1].

Попытки установить в сульфидных минералах наличие примесей элементов платиновой группы (ЭПГ) не увенчались успехом. Микрозондовым анализом эти элементы в сульфидах долерита Л-1388 не обнаружены в пределах обнаружения: Pt – 0,27, Rh – 0,06 и Pd – 0,06 %. Анализы сульфидных микронавесок приближенно-количественным атомно-эмиссионным методом на аналитическом комплексе ДФС-8 также не дали положительных результатов в пределах обнаружения: Pt – 3; Ir – 30; Os – 30; Ru – 10; Rh – 3 и Pd – 1 г/т. К сожалению, мы должны признать, что наши выводы о содержании ЭПГ в сульфидах Л-1388 до 0,1 %, указанные в тезисах доклада [15], оказались преждевременными и ошибочными вследствие воздействия мешающих наложений других элементов. Практическое отсутствие в мелких сульфидных нодулях ЭПГ может указывать только на то, что процесс ликвационного отделения сульфидов находился на ранней стадии, поэтому не было существенного концентрирования ЭПГ из силикатной магмы в мелкие капельки сульфидных ликватов.

Заключение

Округлые выделения сульфидных нодулей свидетельствуют об их раннемагматической ликвационной природе, что подтверждается находками мелких сульфидных сферолитов в протокристаллах оливина и плагиоклаза в базальтах [16]. При благоприятных условиях дифференциации больших объемов подобных ликватов могут формироваться богатые PGE–Cu–Ni сульфидные руды. Образование ЭПГ-сульфидных месторождений в серонасыщенных магмах объясняется очень высокой степенью распределения ЭПГ в несмешивающейся сульфидной жидкости [17, 18] и сбором ЭПГ в сульфидные глобулы, начиная уже с раннемагматической стадии. В серонедосыщенных магматах сульфидные минералы появляются только на позднемагматической стадии кристаллизации магмы, когда в

остаточных расплавах происходит накопление летучих, в том числе и серы, что приводит к появлению в интерстиционных полостях поздних сульфидов, лишенных примесей ЭПГ.

Преимущественное концентрирование ЭПГ в сульфидах при силикат-сульфидной несмесимости обусловлено тем, что в отличие от силикатных магм, имеющих ионно-молекулярную природу, сульфидные расплавы являются типично ионно-электронными жидкостями [19]. Таким образом, в силу того, что ЭПГ в силикатном расплаве находятся в ионной и металлической форме [20], то при ликвации платиноиды будут распределяться преимущественно в сульфидную часть.

Для выяснения условий кристаллизации сульфидных расплавов, образующих при кристаллизации сложные сочетания твердых моносульфидных ассоциаций [21–25], необходимы дальнейшие детальные исследования типоморфных особенностей сосуществующих сульфидных фаз из подобных нодулярных образований ликвационного типа.

Выводы

При исследовании образца долеритов Л-1388 с крупными округлыми сульфидными вкраплениями установлено, что нодулярные выделения сульфидов формировались при слиянии мелких сульфидных «капелек», отделившихся от силикатной магмы на раннемагматической стадии. По химическому составу и особенностям порообразующих и второстепенных минералов изученный долерит похож на породы из Джукенского дайкового пояса, формировавшегося, по данным U–Pb-датировок, 1380 млн лет назад.

По минеральному составу сульфидные нодули долеритов Л-1388 аналогичны прожилково-вкрапленным медно-никелевым проявлениям, приуроченным к породам докембрийских даек Кенгединского дайкового пояса на юго-востоке Анабарского щита. Подобные ассоциации и типоморфные особенности редких сульфидов характерны платиноидно-медно-никелевым рудам Норильских месторождений, а также медно-никелевым минерализациям ликвационного типа, связанным с дифференцированными докембрийскими комплексами мафит-ультрамафитовых пород других регионов. Все это позволяет предположить потенциальную возможность присутствия на восточном борту Анабарского щита докембрийских базитов с PGE–Cu–Ni сульфидным орудением.

Литература

1. Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д. и др. Сульфидные медно-никелевые руды норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.
2. Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л. и др. Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 1988. 232 с.
3. Лихачев А.П. Платино-медно-никелевые и платиновые месторождения. М.: Эслан, 2006. 496 с.
4. Мащак М.С. Сульфидные медно-никелевые рудопроявления в протерозойских дайках диабазов южного склона Анабарского щита // Геология рудных месторождений. 1969. № 6. С. 74–78.
5. Олейников Б.В., Мащак М.С., Колодезников И.И. и др. Петрология и геохимия позднедокембрийских интрузивных базитов Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1983. 207 с.
6. Округин А.В., Саввинов В.Т., Олейников Б.В., Ненашев Н.И. Позднедокембрийские интрузивные базиты анабарского массива / Базитовый магматизм Сибирской платформы и его металлогения. Тез. докл. Якутск, 1989. С. 67–69.
7. Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D. Late precambrian dyke swarms of the Anabar massif, Siberian Platform // Mafic dykes and emplacement mechanisms. Rotterdam Brockfield: A.A.Balkema, 1990. P. 529–534.
8. Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Сёдерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонамская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1501 млн лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 833–855. DOI: 10.15372/gig20160502. РИНЦ.
9. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U-Pb geochronology of mafic dykes of the eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for the Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // Journal of Geology. 2000. Vol. 108. P. 381–401.
10. Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 464–469. DOI: 10.1038/NGeo2700.
11. Округин А.В., Якубович О.В., Эрнст Р., Дружинина Ж.Ю. Платиноносные россыпи Сибирской платформы: минеральные ассоциации и их возрастные характеристики как индикаторы проявления крупных изверженных провинций на древней платформе // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. № 3. С. 36–52.
12. Округин А.В., Королева О.В. Вещественный состав и генезис калиевых высокомагнезиальных базитов Анабарского массива // Отечественная геология. 2000. № 5. С. 70–74.
13. Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.С. Первые находки зигенита (CoNi_2S_4) в пикритовых и пикродолеритовых комплексах Южного Урала // Докл. РАН. 2014. Т. 437, № 3. С. 308–314.
14. Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Ковалев С.С., Высоцкий С.И. Минералы системы Fe–Ni–Co–Cu–S в пикритовых интрузиях Южного Урала: свидетельства ликвации и дифференциации сульфидного расплава // Докл. РАН. 2020. Т. 492, № 1. С. 29–34. DOI: 10.31857/S2686739720050084
15. Округин А., Земнухов А., Журавлев А. Ликвационное PGE–Cu–Ni сульфидное рудопроявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Якутск, 2021. С. 213–216.
16. Вахрушев В.А., Латин Б.Н. Первично магматические сульфидные образования в лавах Камчатки и Курильских островов // Геология рудных месторождений. 1967. № 3. С. 74–78.
17. Bezmen N.L., Asif M., Brugmann G.E., Romanenko I.M., Naldrett A.J. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os and Au between sulfide and silicate melts. Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. P. 1251–1260.
18. Fleet M.E., Crockett J.H., Liu M., Stone W.E. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits // Lithos. 1999. Vol. 47. P. 127–142.
19. Ольшанский Я.И. Об ионно-электронных жидкостях // Докл. АН СССР. 1950. Т. 71, № 4. С. 701–704.
20. Borisov A., Palme H. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems // Amer. Mineral. 2000. Vol. 85. P. 1665–1673.
21. Крейг Дж., Куллеруд Дж. Система Cu–Fe–Ni–S // Экспериментальная петрология и минералогия. Труды Геофизической лаборатории Института Карнеги. Вып. 63–65. М.: Недра, 1971. С. 272–278.
22. Куллеруд Дж. Система Fe–Ni–S // Экспериментальная петрология и минералогия. Труды Геофизической лаборатории Института Карнеги. Вып. 62. М.: Недра, 1969. С. 138–154.
23. Воган Д., Крейг Дж. Химия сульфидных минералов. М.: Мир, 1981. 575 с.
24. Ballhaus C., Tredoux M., Spath A. Phase relations in the Fe–Ni–Cu–PGE–S system at magmatic temperature and application to massive sulphide ores of the Sudbury igneous complex // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 1911–1926. DOI: 10.1093/petrology/42.10.1911
25. Косяков В.И., Синякова Е.Ф. Физико-химические предпосылки образования первичной зональности рудных тел в медно-никелевых сульфидных

месторождениях (на примере систем Fe–Ni–S и Cu–Fe–S) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 9. С. 1126–1153.

26. Музыка Г.М., Чумирин К.Г. К вопросу о проявлении аналогов меймечитов на южной окраине Ана-

барского массива // Геология, петрография и минералогия магматических образований северо-восточной части Сибирской платформы. М.: Наука, 1970. С. 183–190.

Поступила в редакцию 29.09.2021

Принята к публикации 16.11.2021

Об авторах

ОКРУГИН Александр Витальевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,

<https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru;

ЗЕМНУХОВ Алексей Леонидович, начальник отдела минералогических исследований, АО «Алмазы Анабара», 677000, Якутск, ул. Чернышевского, д. 6, e-mail: zemnuhovAL@alanab.ru;

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com.

Информация для цитирования

Округин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Медно-никелевое сульфидное рудопоявление в долеритах восточного склона Анабарского щита // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 16–28. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28

Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield

A.V. Okrugin^{1,*}, A.L. Zemnukhov², A.I. Zhuravlev¹

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

²AO Almazы Anabara, Yakutsk, Russia

*okrugin@diamond.ysn.ru

Abstract. A description of sulfide nodules from the block of dolerites, found on the terrace of the Bolshaya Kuonamka river on the eastern side of the Anabar shield (north-east of the Siberian platform) is given. Dolerites are represented by medium-grained rocks with ophitic texture, consist mainly of plagioclase, augite, and Ti-magnetite; potassium feldspar, amphibole, pigeonite, apatite, chlorite, zeolite, quartz, calcite, and ilmenite are less common. In terms of chemical composition and structure, these dolerites are similar to the Precambrian subalkaline dolerites. Sulfides in the studied dolerites occur in the form of separate rounded segregations up to 8 mm in size, consisting mainly of pyrrhotite and chalcopyrite. Small (from several microns to 0.5 mm) drop-shaped precipitates of pyrrhotite and chalcopyrite are often found. Such forms of sulfide mineral segregations indicate that large nodules are formed during merging of small primary sulfide droplets immiscible with silicate magma. Siegenite (Co,Ni,Fe)₃S₄, gersdorffite NiAsS with a high Fe content up to 6 %, Co up to 12 % and Sb up to 3 %, galena, sphalerite, and others are less common in sulfide segregations. Sulfide minerals are often gravitating to the accumulations of Ti-magnetite and

apatite, forming close sulfide-apatite-titanomagnetite segregations. The presence of liquation sulfide segregations in igneous rocks is one of the important criteria of the saturation of magmatic melts with sulfides, indicating their potential ore content. Platinoid-copper-nickel sulfide deposits of the Norilsk region are characterized by similar forms of segregations and sulfide mineral associations. Vein-disseminated copper-nickel mineralization in taxite gabbro-dolerites of the Budyrkhaiskaya dike along the Kengede river is known, which allows us to suggest the possible presence of Precambrian basite rocks with Cu-Ni sulfide mineralization on the Anabar shield.

Keywords: copper-nickel ores, sulfides, dolerites, Siberian platform, Anabar shield.

Acknowledgements. The authors thank all colleagues who participated in the field work: Androsov A.R. – the chief and Nakhodkin A.P. – geologist of the Kuonamskaya GRP, as well as employees of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS – Khristoforova N.V., Samsonova O.K., Vasilieva A.S., Zamyskaya O.D. and Vasilieva T.I. for performing analytical studies. This study was carried out within the State Assignment for Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (No. 0381-2019-0003).

References

1. Genkin A.D., Distler V.V., Gladyshev G.D. et al. Sulfide copper-nickel ores of the Norilsk deposits. Moscow. Nauka, 1981. 234 p.
2. Distler V.V., Grokhovskaya T.L., Evstigneeva T.L. et al. Petrology of sulfide magmatic ore formation. Moscow: Nauka, 1988. 232 p.
3. Lichachev A.P. Platinum-nickel-copper and platinum deposits. Moscow: Aslan, 2006. 496 p.
4. Mashchak M.S. Sul'fidye medno-nikelevye rudoproyavleniya v proterozojских daykach diabazov yuznogo sklona Anabarskogo schita // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 1969. No. 6. P. 74–78.
5. Oleinikov B.V., Mashchak M.S., Kolodeznikov I.I. et al. Petrology and geochemistry of basites intrusions of the Siberian platform. Novosibirsk: Nauka, 1983. 208 p.
6. Okrugin A.V., Savvinov V.T., Oleinikov B.V., Nenashev N.I. Pozdnedokembrijskie intruzivnye bazity Anabarskogo massiva // Bazitovyy magmatizm Sibirskoj platformy i ego metallogeniya. Tez. dokl. Yakutsk, 1989. P. 67–69.
7. Okrugin A.V., Oleinikov B.V., Savvinov V.T., Tomshin M.D. Late precambrian dyke swarms of the Anabar massif, Siberian Platform // Mafic dykes and emplacement mechanisms. Rotterdam Brockfield: A.A.Balkema, 1990. P. 529–534.
8. Ernst R.E., Okrugin A.V., Veselovskiy R.V., Kamo S.L., Hamilton M.A., Pavlov V., Söderlund U., Chamberlain K.R., Rogers C. The 1501 Ma Kuonamka Large Igneous Province of northern Siberia: U–Pb geochronology, geochemistry, and links with coeval magmatism on other crustal blocks // Russian Geology and Geophysics. 2016. Vol. 57. P. 653–671. doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.015.
9. Ernst R.E., Buchan K.L., Hamilton M.A., Okrugin A.V., Tomshin M.D. Integrated paleomagnetism and U–Pb geochronology of mafic dykes of the eastern Anabar Shield Region, Siberia: Implications for the Mesoproterozoic paleolatitude of Siberia and comparison with Laurentia // Journal of Geology. 2000. Vol. 108. P. 381–401.
10. Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 464–469. DOI: 10.1038/NGEO2700.
11. Okrugin A.V., Yakubovich O.V., Ernst R.E., Druzhinina Zh.Yu. Platinum-bearing placers of Siberian platform: mineral associations and their age characteristics as indicators of large igneous provinces manifested in old platform // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2018. No. 3. P. 36–52.
12. Okrugin A.V., Koroleva O.V. Veshchestvennyy sostav i genezis kalievyyh vysokomagnezial'nyh bazitov Anabarskogo massiva // Otechestvennaya geologiya. 2000. No. 5. P. 70–74.
13. Kovalev S.G., Puchkov V.N., Kovalev S.S. The first finds of siegenite in picrite and picrito-dolerite complex of the Southern Urals // Doklady Earth Sciences, 2014. Vol. 457, No. 3. P. 308–314.
14. Kovalev S.G., Puchkov V.N., Kovalev S.S., Vysotsky S.I. New data on minerals of the system Fe–Ni–Co–Cu–S in differentiated intrusions of the Southern Urals // Dokl. RAN. 2020. Vol. 492, No. 1. P. 29–34. DOI: 10.31857/S2686739720050084
15. Okrugin A., Zemnuhov A., Zhuravlev A. Likvacionnoe PGE–Cu–Ni sul'fidnoe rudoproyavlenie v doleritah vostochnogo sklona Anabarskogo shchita // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy XI Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2021. P. 213–216.
16. Vahrushev V.A., Lapin B.N. Pervichno magmaticheskie sul'fidnye obrazovaniya v lavah Kamchatki i Kuril'skih ostrovov // Geologiya rudnyh mestorozhdenij. 1967. No. 3. P. 74–78.
17. Bezmen N.L., Asif M., Brugmann G.E., Romanenko I.M., Naldrett A.J. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os and Au between sulfide and silicate melts // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. Vol. 58. P. 1251–1260.
18. Fleet M.E., Crocket J.H., Liu M., Stone W.E. Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits // Lithos. 1999. Vol. 47. P. 127–142.

19. *Ol'shansky Ya.I.* On ionic-electronic liquids // Dokl. AN SSSR. 1950. Vol. 71. P. 701–704.
20. *Borisov A., Palme H.* Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems // Amer. Mineral. 2000. Vol. 85. P. 1665–1673.
21. *Kreig J., Kullerud G.* Sistema Cu–Fe–Ni–S // Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya. Trudy Geofizicheskoy laboratorii Instituta Karnegi. Iss. 63–65. M.: Nedra, 1971. P. 272–278.
22. *Kullerud G.* Sistema Fe–Ni–S // Eksperimental'naya petrologiya i mineralogiya. Trudy Geofizicheskoy laboratorii Instituta Karnegi. Iss. 62. M.: Nedra, 1969. P. 138–154.
23. *Vogan D., Kreig J.* Himiya sul'fidnyh mineralov. M.: Mir, 1981. 575 p.
24. *Ballhaus C., Tredoux M., Spath A.* Phase relations in the Fe–Ni–Cu–PGE–S system at magmatic temperature and application to massive sulphide ores of the Sudbury igneous complex // Journal of Petrology. 2001. Vol. 42. P. 1911–1926. DOI: 10.1093/petrology/42.10.1911
25. *Kosyakov V.I., Sinyakova E.F.* Physicochemical prerequisites for the formation of primary orebody zoning at copper-nickel sulfide deposits (by the example of the systems Fe–Ni–S and Cu–Fe–S) // Geologiya i Geofizika. 2012. Vol. 53, No. 9. P. 1126–1153.
26. *Muzyka G.M., Chumirin K.G.* K voprosu o pro-
javlenii analogov mejmechitov na yuznoj okraine
Anabarskogo massiva // Geologiya, petrografiya i
mineralogia magmaticheskikh obrazovaniy severo-
vostochnoj chasti Sibirskoj platform. M.: Nauka, 1970.
P. 183–190/

About the authors

OKRUGIN, Aleksandr Vitalievich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), chief researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-1248-8993>, e-mail: okrugin@diamond.ysn.ru;

ZEMNUKHOV, Aleksey Leonidovich, head of the Mineralogical Research Department of the JSC Almazny Anabara, 6 Chernyshevskogo str., Yakutsk 677000, Russia,
e-mail: zemnuhovAL@alanab.ru;

ZHURAVLEV, Anatoliy Ivanovich, researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia,
<https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com.

Citation

Okругин А.В., Земнухов А.Л., Журавлев А.И. Copper-nickel sulfide mineral occurrence in dolerites of the eastern slope of the Anabar shield // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 16–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-16-28>

Минералы ряда флогопит–киноситалит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу–Майского поля (Центральная Якутия)

Н.А. Опарин*, О.Б. Олейников

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

*nik3256-1989@yandex.ru

Аннотация. Впервые на примере среднепалеозойских трубок Хомпу–Майского поля (Центральная Якутия) обсуждаются результаты системного исследования микрозерен слюды ряда флогопит–киноситалит, присутствующей в основной массе пород Якутской кимберлитовой провинции. Рассматриваются зональность и химический состав минералов, а также проводится сравнение со слюдой мантийных ксенолитов перидотитов из кимберлитовых трубок Африки, единичных тел кимберлитов Канады, США, Китая и Якутской кимберлитовой провинции, пород карбонатитовых массивов Бразилии и мелилититов России. Установлены разновидности исследуемой слюды – флогопит, барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киноситалит. Эти разновидности могут присутствовать в пределах одного зерна, формируя его зональность. Определена позднемагматическая природа исследуемой слюды, состав которой обусловлен обогащением флюидов расплава барием. Изучение зонального строения чешуек позволило отразить характер поведения ВаО в процессе формирования кимберлитовых пород исследуемых трубок. Отличие и сходство в составах слюды из пород трубок Хомпу–Майского кимберлитового поля и ранее изученных кимберлитовых тел, карбонатитов, мантийных ксенолитов и мелилититов указывают на наличие особенностей минерала для различных магматических систем, флюиды которых обогащены ВаО. Это позволяет использовать состав слюд в сравнительном изучении кимберлитовых и других щелочно-ультраосновных пород.

Ключевые слова: флогопит, бариевый флогопит, барийсодержащий флогопит, калиевый киноситалит, кимберлитовая трубка, Хомпу–Майское поле, Якутская кимберлитовая провинция.

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

Введение

Кимберлит представляет собой ультраосновную со щелочным уклоном, петрографически сложную, гибридную горную породу [1], первичные минералы которой часто в различной степени изменены. Слюда исследуемых пород является одним из немногих магматических минералов, сохранившихся в неизменном виде в породах кимберлитовых трубок Эрэл (аномалия Thm-03-11), Турахская (аномалия Thm-10-11), им. Артемова (аномалия Thm-04-11), Манчары и Апрельская Хомпу–Майского поля. Она является концентратором бария, что позволяет использовать ее состав для изучения поведения флюида на позднемагматической стадии. Ранее слюды с повышенным содержанием бария были изучены в основной массе кимберлитовых пород, слагающих дайки Снэп Лейк [2] и Джос (Канада), тела кимберлитовых комплексов Чикен Парк, Айрон

Маунтин (США) и Бунуду (Гвинея), силлы Бенфонтейн (ЮАР), а также кимберлитовые трубки Элвин Бэй (Канада) и Шенгли (Китай) [3]. В Якутской кимберлитовой провинции такие разновидности слюды зафиксированы в единичных экземплярах в кимберлитовых породах трубок Мир, Интернациональная, Айхал и Удачная [4]. Наиболее представительно бариевые слюды основной массы пород трубки Юбилейная изучены Митчеллом [3]. Позднемагматические слюды, содержащие в своем составе барий, были описаны в айкилитах [5], мелилититах [6], лейцититах [7], совитах, раухгитах, бефорситах, якупирангитах [8], мантийных ксенолитах базанитовых лав [9] и оливиновых нефелинитах [10]. Настоящее исследование посвящено изучению микрозерен слюды, диагностированных в основной массе наименее измененных разновидностей кимберлитовых пород, слагающих трубки Хомпу–Майского поля,

расположенного в северной части Алданской антеклизы.

Общая характеристика кимберлитов

Среднепалеозойские кимберлитовые трубки Эрэл, Турахская, им. Артемова, Манчары и Апрельская установлены в пределах Хомпу-Майского кимберлитового поля, относящегося к Якутской кимберлитовой провинции [11]. Исследуемые тела прорывают карбонатные отложения верхнего кембрия и перекрыты юрскими терригенно-осадочными отложениями мощностью до 150 м (рис. 1).

Все кимберлитовые трубки являются однофазными и выполнены порфировым кимберлитом и кимберлитовой брекчией, между которыми по мере сокращения количества ксенолитов осадочных, метаморфических пород и включений серпентинитов существуют постепенные переходы. Породы верхних горизонтов карбонатизированы и гипергенно изменены на глубину до 30 м [12–14]. Во всех трубках диагностированы макро- и мегакристы пикроильменита, макрокристы хромшпинелидов [15–17] и пироба. Порфировые выделения оливина в породах каждой из исследуемых трубок нацело замещены

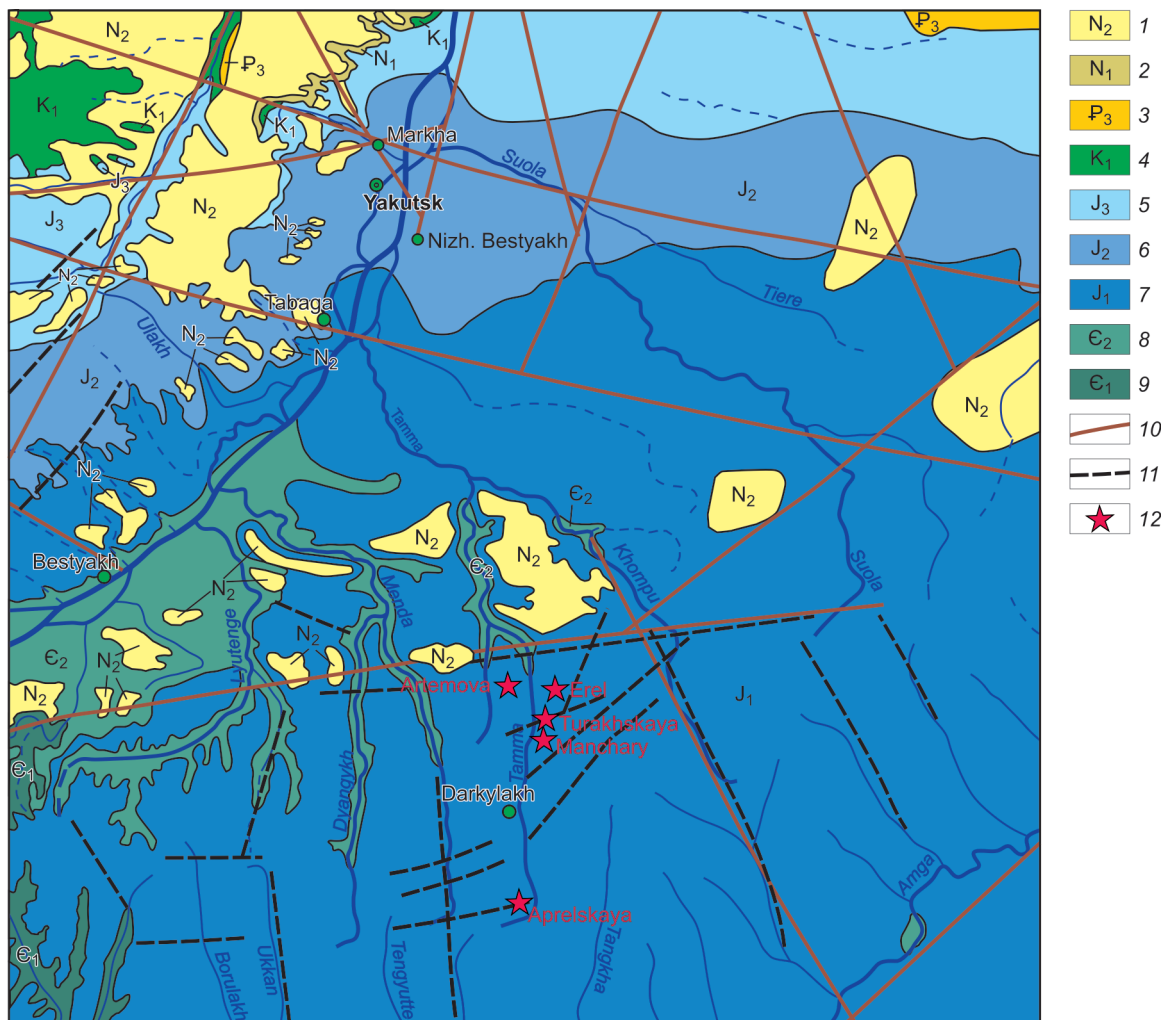


Рис. 1. Геологическая позиция Хомпу-Майского кимберлитового поля:

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.

серпентином и карбонатом. Их количество варьирует от 7 до 20 %, на отдельных участках – до 50 %. В трубке Манчары также установлены макро- и мегакристы слюды и ксенолиты слюдитов, флогопит которых содержит оксид бария [18, 19]. Мезостазис наименее измененных кимберлитовых пород сложен мелкопластинчатой слюдой, ксеноморфными выделениями серпентина, кальцита и доломита. Кроме того, в основной массе установлены перовскит, апатит [20] и минералы ряда магнетит–хромшпинелид. В целом, петрографический состав кимберлитовых пород всех изучаемых тел однотипен, а некоторые различия обусловлены наличием в трубке Манчары ранних парагенезисов флогопита и различиями в интенсивности проявления постмагматических и гипергенных процессов в пределах каждого тела.

Методика исследования

Строение зерен и зональность минералов ряда флогопит–киноситалит изучены в ИГАБМ СО РАН в шлифах на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axioscop 40 и в аншлифах на сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА. Поверхности полированных аншлифов напылялись проводящим углеродным слоем (до синего цвета). При съемке использовались следующие стандарты для линий: Ca K_{α} , Mg K_{α} , Si K_{α} – голубой диопсид, Mn K_{α} – марганцевый гранат ИГЕМ, Ti K_{α} и Fe K_{α} – пикроильменит ГФ55, K K_{α} – ортоклаз OR-1, Na K_{α} , Al K_{α} – альбит, Cr K_{α} – хромит, Ba L_{α} – барит, F K_{α} .

Морфология зерен и химический состав слюды

Минералы ряда флогопит–киноситалит (рис. 2) встречаются в основной массе кимберлитовых пород, слагающих трубки Хомпу-Майского поля, и являются одними из первичных магматических минералов. Слюда присутствует в виде разнонаправленных идиоморфных удлиненных пластинок размером от 20 до 200 мкм и в отдельных случаях до 300 мкм. В наиболее измененных вторичными процессами микроблоках породы количество чешуек слюды и рудных минералов уменьшается (рис. 3, а).

Пластины исследуемых минералов размером 20–40 мкм частично или полностью гидратированы и карбонатизированы (рис. 3, б). В пределах таких участков количество слюды варьирует

от 7 до 11 %, карбонатов – от 30 до 64 и серпентина – от 40 до 60 %.

Менее измененные разности кимберлитов содержат 12–22 % слюды, 15–30 % карбонатов, 24–40 % серпентина (см. рис. 2) и призматические кристаллы фторапатита.

В оптическом микроскопе изученные слюды выглядят однотонными (см. рис. 2), однако рентгеноспектральным методом в обратнорассеянных электронах (BSE) установлены разноокрашенные индивиды, демонстрирующие резко выраженную химическую неоднородность (рис. 3, б, ж, и; рис. 4), которая обусловлена наличием зон с различным содержанием BaO (см. таблицу).

Количество таких индивидов на отдельных участках достигает 30 %. В основной массе кимберлитовых пород исследуемых трубок флогопит представлен следующими разновидностями по содержанию BaO – флогопит, барийсодержащий флогопит (Ba < 0,1 ф.е.) [3], бариевый флогопит (Ba 0,1–0,5 ф.е.) [3] и калиевый киноситалит (Ba > 50 % от межслоевых катионов) [21] (см. таблицу). В пределах одного зерна могут присутствовать несколько разновидностей слюды. Флогопит и бариевый флогопит (BaO от 6,79 до 15,03 %) характерны для пород всех исследуемых трубок (см. таблицу). Барийсодержащий флогопит (BaO 0,86–3,34 %) фиксируется в труб-

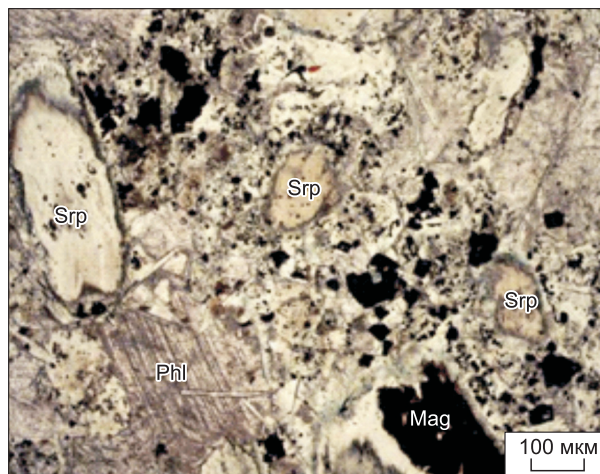


Рис. 2. Основная масса порфирового кимберлита трубки Эрэл. Резорбированная пластинка слюды и псевдоморфозы серпентина по оливину. Николи параллельны. Srp – серпентин, Phl – минералы ряда флогопит–киноситалит, Mag – магнетит.

Fig. 2. The porphyritic kimberlite groundmass of the Erel pipe. Resorbed mica plate and pseudomorphoses of serpentine by olivine. Parallel nicols. Srp – serpentine, Phl – minerals of the phlogopite-kinoshitalite series, Mag – magnetite.

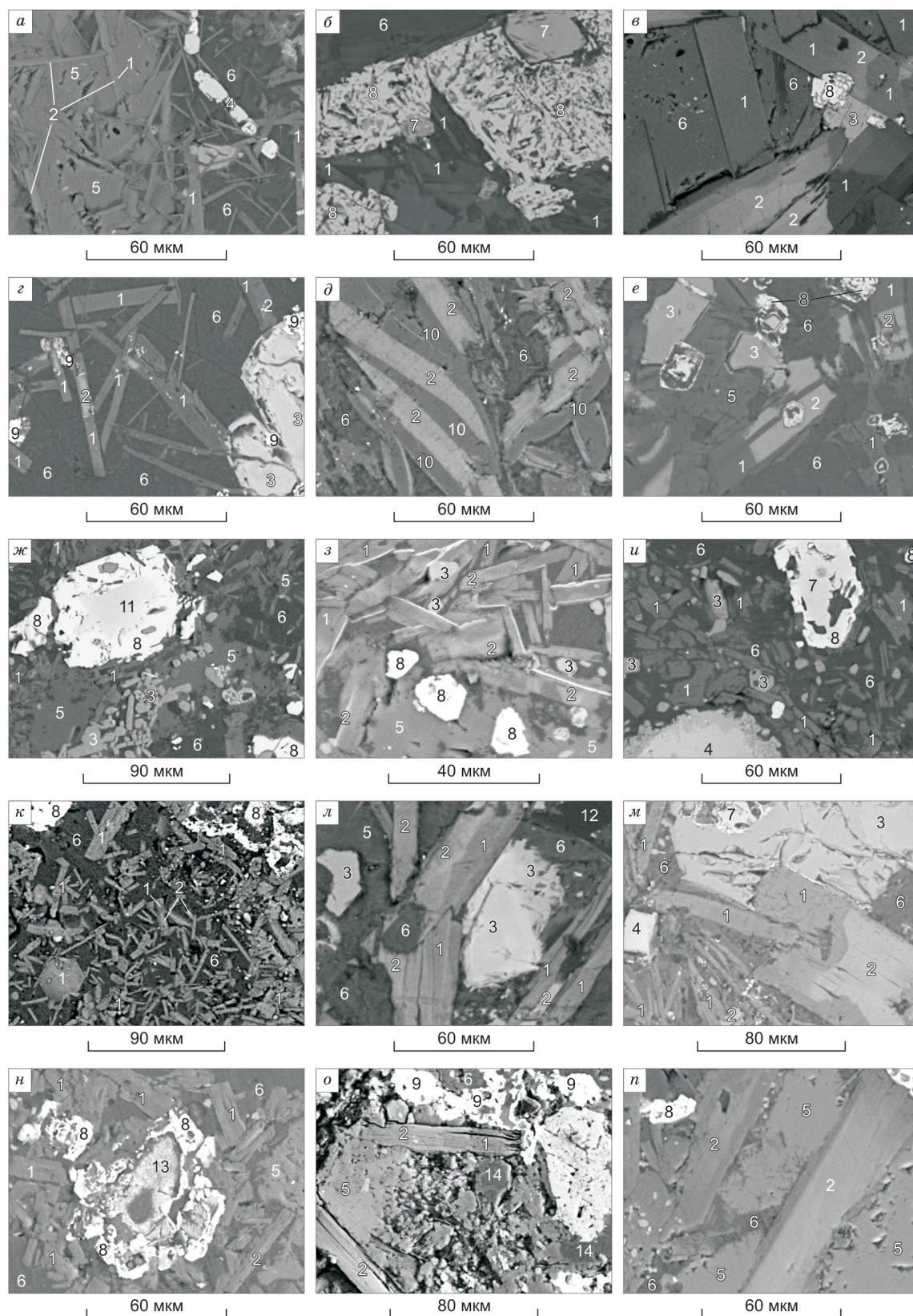


Рис. 3. Слюда из основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля:

а-в – трубка Эрэл, *г-е* – трубка Турахская, *ж-и* – трубка им. Артемова, *к-м* – трубка Манчары, *н-п* – трубка Апрельская;
 1 – флогопит, 2 – барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киношталит, 3 – апатит, 4 – перовскит, 5 –

МИНЕРАЛЫ РЯДА ФЛОГОПИТ-КИНОСИТАЛИТ ОСНОВНОЙ МАССЫ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОРОД

кальцит, 6 – серпентин, 7 – хромшпинелид, 8 – магнетит, 9 – сульфиды, 10 – доломит, 11 – ферришпинель, 12 – магнезит, 13 – пикроильменит, 14 – кварц. BSE.

Fig. 3. Groundmass mica from kimberlite rocks of Khompu-May field pipes:

a-b – Erel pipe, *г-е* – Turakhskaya pipe, *ж-и* – Artemova pipe, *к-м* – Manchary pipe, *н-п* – Aprelskaia pipe; 1 – phlogopite, 2 – barium-bearing phlogopite, 3 – apatite, 4 – perovskite, 5 – calcite, 6 – serpentine, 7 – chromspinellide, 8 – magnetite, 9 – sulfides, 10 – dolomite, 11 – ferrosphenel, 12 – magnesite, 13 – picroilmenite, 14 – quartz. BSE.

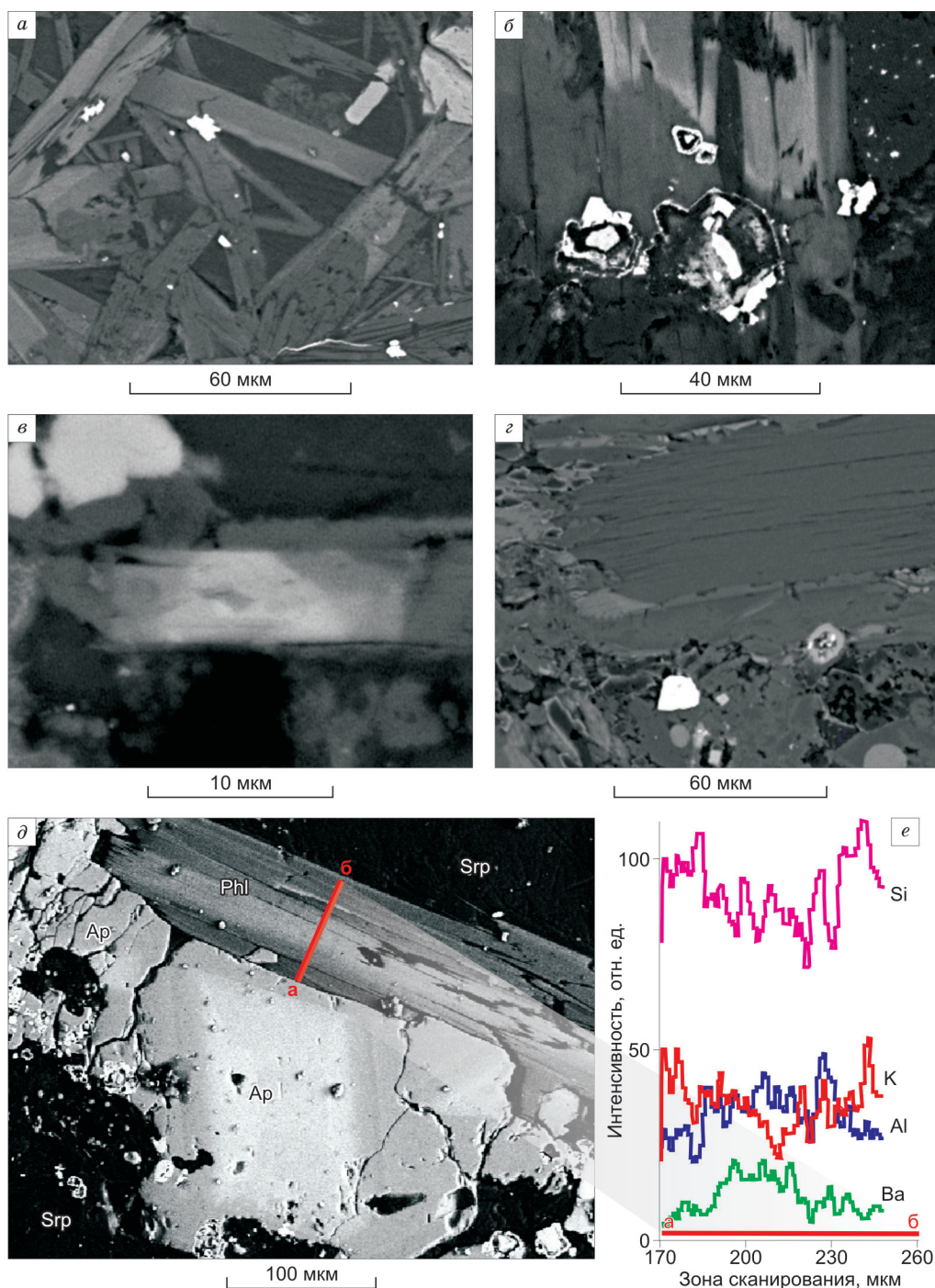


Рис. 4. Зональность слюды из основной массы кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля:

a – слюда с пятнистой обратной зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Эрэл; *б* – слюда с обратной геометрической зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Турахская; *г* – слюда с геометрической обратной зональностью из основной массы кимберлитовой трубки Турахская; *д* – слюда с прямой зональностью из основной массы

кимберлитовой трубки Турахская; *d, e* – визуализация линейного сканирования зональной слюды из основной массы кимберлитовой трубки Манчары; *Ap* – апатит, *Phl* – минералы ряда флогопит–киношталит, *Srp* – серпентин. BSE.

Fig. 4. Zoning of groundmass mica from kimberlite pipes of the Khompu-May field:

a – groundmass mica with a patchy reverse zoning from the Erel kimberlite pipe; *b* – groundmass mica with a reverse geometric zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *c* – groundmass mica with a geometric reverse zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *d* – groundmass mica with a normal zoning from the Turakhskaya kimberlite pipe; *e* – visualization linear scanning of zonal groundmass mica from the Manchary kimberlite pipe; *Ap* – apatite, *Phl* – minerals of the phlogopite-kinoshitalite series, *Srp* – serpentine. BSE.

ках Эрэл, им. Артемова и Манчары (см. таблицу). Калиевый киношталит зафиксирован в единичном случае в основной массе породы трубки Турахская (BaO 15,14 %).

Мелкие изометричные, идиоморфные и ксеноморфные зерна бариевой слюды основной массы кимберлитов даек Снэп Лейк [2] и Джос, кимберлитовых комплексов Чикен Парк, Айрон Маунтин и Бунуду, кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] также характеризуются зональным строением. По составу эти слюды являются барийсодержащими и бариевыми флогопитами. Содержания BaO в барийсодержащем флогопите мезостазиса дайки Снэп Лейк, трубки Элвин Бэй и пород комплекса Чикен Парк составляют 0,40–3,51 % [2], 2,54 и 0,78–2,05 % [3] соответственно. Бариевый флогопит основной массы дайки Снэп Лейк, трубки Элвин Бэй, трубки Шенгли, дайки Джос, пород комплексов Айрон Маунтин и Чикен Парк характеризуются содержаниями BaO 3,76–15,65 % [2], 5,82–12,63, 7,69–12,58, 3,58–6,15, 4,74–11,24 и 3,67–5,10 % [3] соответственно. Данные по зональной слюде из трубки Юбилейная представлены пятью анализами – это барийсодержащий флогопит (BaO 0,37 и 2,62 %), бариевый флогопит (BaO от 4,93 до 9,25 %) и калиевый киношталит (BaO 16,01 %) [3]. Калиевый киношталит (BaO от 16,23 до 21,22 %) также отмечается в кимберлитах дайки Джос [3] и силлов Бенфонтейн. В последнем случае минерал представлен незональными пластинками с высокими концентрациями BaO (15,9–23,8 %) [3].

Вариации состава слюды прослеживаются на графике Al–Ba/(Ba+K) Тапперта [22], иллюстрирующем изменение кристаллохимии исследуемых минералов от барийсодержащего флогопита до калиевого киношталита (рис. 5). Барийсодержащий флогопит из трубки Манчары характеризуется пониженными концентрациями оксида алюминия (см. рис. 5). Такие низкие содержания Al_2O_3 , по всей видимости, связаны с ранней кристаллизацией макро- и мегакристаллов флогопита в трубке Манчары [18].

Для слюды основной массы наблюдаются два морфологически различных типа зональности – геометрическая (см. рис. 3, *a, z, e, k-n*; рис. 4, *b, v, z*) и пятнистая (см. рис. 3, *v, z*, рис. 4, *a*). В большинстве случаев особенности зонирования зерен проявляются в хаотичном расположении ксеноморфных (пятнистая зональность) и кристаллографически оформленных (геометрическая зональность), разноокрашенных в обратнорассеянных электронах участков (см. рис. 3, 4). Формирование геометрического типа зональности связано с понижением концентрации бария от центра к краю (см. рис. 3, 4) в результате падения пересыщения [23]. Центральные части таких зональных зерен представлены барийсодержащим флогопитом (BaO 1,77–3,34 %), бариевым флогопитом (BaO 6,79–10,54 %) и в единичных случаях калиевым киношталитом (BaO 15,14 %), а периферийные – флогопитом. В этом случае речь идет об обратной зональности по содержанию бария, которая характерна для слюды основной массы всех изученных трубок. Присутствие в центральных частях отдельных зерен зон с неровными границами (см. рис. 3, *z, l, m, o*) может свидетельствовать о перерыве в кристаллизации чешуек слюды и частичном их растворении.

Прямой тип зональности выявлен только для единичных зерен слюды мезостазиса кимберлитов трубки Турахская (см. рис. 4, *z*), где наблюдаются внешние дискретные каймы бариевого флогопита (Ba 0,24 ф.е.), появление которых может быть связано либо с кристаллизацией, либо с реакционным замещением на позднемагматической стадии [3].

Локальные повышения концентраций BaO в слюде, проявляющиеся в виде пятнистой зональности кристаллов, по всей видимости, также связаны с реакционным замещением (см. рис. 3, *v, z*) [24]. Таким типом зональности характеризуются слюды из трубок Эрэл и им. Артемова.

Во флогопитах основной массы дайки Снэп Лейк также преобладает обратная зональность и в меньшей степени встречается прямая [2]. Прямой тип зональности установлен для слюды из

Представительные анализы слюды основной массы кимберлитовых пород Хомпу–Майского поля

Representative analyses of groundmass mica of kimberlite rocks of the Khompu-May field

Объект/Object	Оксиды, %/Oxides, %							Атомы, ф.е. (на 11 кислорода) / Atoms, apfu (11 oxygens)								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{общ}	MgO	BaO	K ₂ O	Сумма	Si	Ti	Al	Fe	Mg	Ba	K	Сумма
Флогопит/Phlogopite																
Эрэл/Erel	38,09	2,29	14,88	5,73	24,66	0,00	10,37	96,02	2,72	0,12	1,25	0,34	2,62	0,00	0,94	8,00
Турахская/Turakhskaya	40,56	4,05	14,11	5,75	22,88	0,00	9,72	97,07	2,84	0,21	1,16	0,34	2,38	0,00	0,87	7,80
Артемова/ Artemova	40,27	2,26	11,00	7,27	24,99	0,00	10,16	95,95	2,89	0,12	0,93	0,44	2,67	0,00	0,93	7,99
Апрельская/Аprelskaya	39,35	1,88	12,67	6,09	24,29	0,00	9,78	94,06	2,86	0,10	1,08	0,37	2,63	0,00	0,91	7,95
Манчары/Manchary	41,72	0,94	9,40	7,31	24,84	0,00	10,03	94,24	3,04	0,05	0,81	0,45	2,70	0,00	0,93	7,97
Барийсодержащий флогопит/Barium-bearing phlogopite																
Эрэл/Erel	37,35	0,00	17,36	3,47	23,22	3,34	10,29	95,03	2,68	0,00	1,47	0,21	2,49	0,09	0,94	7,89
Эрэл/Erel	37,18	1,17	17,87	4,02	23,71	0,86	10,34	95,15	2,66	0,06	1,51	0,24	2,52	0,02	0,94	7,96
Артемова/ Artemova	38,50	1,52	12,84	5,73	23,69	2,30	9,61	94,19	2,81	0,08	1,10	0,35	2,58	0,07	0,89	7,89
Артемова/ Artemova	38,60	1,65	9,32	8,97	24,94	1,77	9,78	95,03	2,85	0,09	0,81	0,55	2,74	0,05	0,92	8,02
Манчары/Manchary	39,37	0,31	9,83	5,95	27,02	3,25	9,10	94,83	2,87	0,02	0,84	0,36	2,93	0,09	0,85	7,96
Манчары/Manchary	39,73	0,00	9,15	6,50	26,01	2,87	10,38	94,64	2,92	0,00	0,79	0,40	2,85	0,08	0,97	8,02
Бариевый флогопит/Barian phlogopite																
Эрэл/Erel	33,45	0,00	19,41	3,27	21,79	9,36	7,46	94,74	2,43	0,00	1,66	0,20	2,36	0,27	0,69	7,62
Эрэл/Erel	33,29	0,00	20,37	4,43	21,87	8,64	6,90	95,50	2,40	0,00	1,73	0,27	2,35	0,24	0,63	7,63
Турахская/Turakhskaya	33,80	0,00	13,92	2,23	25,16	15,03	5,50	95,64	2,46	0,00	1,19	0,14	2,73	0,43	0,51	7,46
Турахская/Turakhskaya	34,92	2,21	17,52	3,83	22,62	8,55	7,04	96,69	2,48	0,12	1,47	0,23	2,40	0,24	0,64	7,57
Артемова/ Artemova	31,61	0,00	21,23	4,27	22,16	7,45	7,10	93,82	2,32	0,00	1,84	0,26	2,42	0,21	0,66	7,72
Апрельская/Аprelskaya	34,74	0,00	16,43	4,32	22,35	9,80	6,80	94,44	2,54	0,00	1,42	0,26	2,44	0,28	0,63	7,58
Апрельская/Аprelskaya	36,43	0,00	15,54	6,31	22,33	6,79	7,90	95,30	2,65	0,00	1,33	0,38	2,42	0,19	0,73	7,71
Манчары/Manchary	35,94	0,00	13,38	4,41	26,42	10,31	6,32	96,78	2,57	0,00	1,13	0,26	2,82	0,29	0,58	7,65
Манчары/Manchary	34,48	0,00	16,26	3,63	24,77	10,54	6,72	96,40	2,48	0,00	1,38	0,22	2,65	0,30	0,62	7,63
Калиевый кинситалит/Potassium kinoshitalite																
Турахская/Turakhskaya	32,06	0,00	14,94	2,79	25,04	15,14	4,31	94,28	2,36	0,00	1,30	0,17	2,75	0,44	0,41	7,43

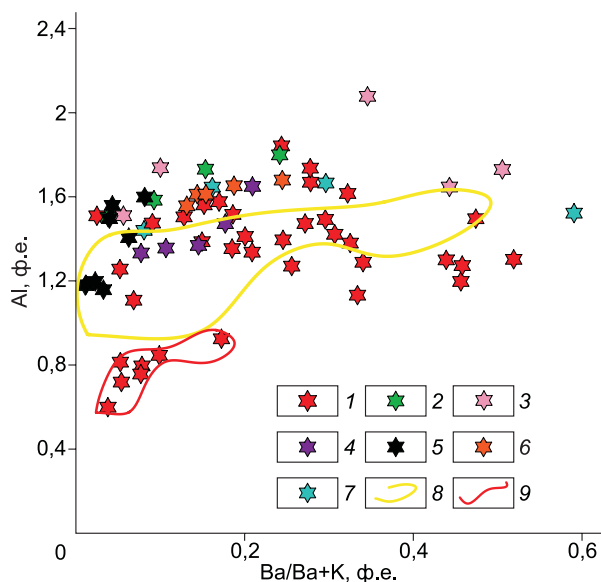


Рис. 5. Особенности состава минералов ряда флогопит–киноситалит основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах Al–Ba/(Ba+K) [21]:

1 – Хомпу-Майское поле, 2 – Элвин Бэй, 3 – Джос, 4 – Айрон Маунтин, 5 – Чикен Парк, 6 – Шенгли Бэй, 7 – Юбилейная, 8 – область составов бариевой слюды Снэп Лейк, 9 – область составов барийсодержащего флогопита трубки Манчары.

Fig. 5. Al versus Ba/(Ba+K) [21] compositional variation of groundmass minerals of phlogopite-kinoshitalite series from pipes of the Khompu-May field:

1 – Khompu-May field, 2 – Elwin Bay, 3 – Jos, 4 – Iron Mountain, 5 – Chiken Park, 6 – Shengli, 7 – Yubileynaya, 8 – composition field of barium mica from Snap Lake, 9 – composition field of barium-bearing phlogopite from the Manchary pipe.

основной массы дайки Джос [3], кимберлитовых комплексов Чикен Парк и Айрон Маунтин [3], кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3]. В слюдах мезостазиса пород трубки Шенгли установлен еще и осцилляторный тип зональности [3], связанный с периодическим обогащением расплава барием. В кимберлитовых породах поля Бунуду диагностированы слюды с пятнистой зональностью [3]. Обратная геометрическая зональность по барию ранее была выявлена в пластинках флогопита, слагающих ксенолиты слюдитов в кимберлитовой брекчии трубки Манчары [18]. Центральные части зональных зерен из ксенолитов слюдитов содержат BaO до 14,63 %, а периферийные – до 4,84 %. Наличие различных типов зональности говорит о том, что начало формирования минерала на позднемагматической стадии проходило как при высокой концентрации бария в остаточном расплаве, так и при более низких его содержаниях. Бариевые разновидности

слюды из ксенолитов слюдитов кристаллизовались на ранних стадиях магматического процесса под влиянием бариевого метасоматоза [18].

Микрозондовое сканирование по линии фиксирует различные содержания примеси BaO и свидетельствует о выдержанности его концентраций в пределах каждой отдельной зоны (см. рис. 4, д, е). На графике видно, что содержания BaO и Al_2O_3 изменяются обратно пропорционально K_2O и SiO_2 (см. рис. 4, д). Такие взаимоотношения компонентов связаны с изоморфным замещением этих элементов по схеме $Ba^{2+}Al^{3+} \rightarrow K^{+}Si^{4+}$. Наиболее темные в обратнорассеянных электронах зоны не содержат барий (флогопит). Светлые зоны характеризуются более высокими содержаниями BaO и соответствуют барийсодержащему флогопиту, бариевому флогопиту и, в единичных случаях, калиевому киноситалиту. В режиме обратнорассеянных электронов в 70 % случаев наблюдаются только темноокрашенные чешуйки. В этих пластинках, а также в темных участках зональных зерен, в пределах чувствительности метода концентрации бария установлены не были. Такие флогопиты, по всей видимости, кристаллизовались после бариевых разновидностей слюды, о чем свидетельствует преобладание обратного типа зональности в исследуемых минералах. Для слюды основной массы трубок Эрэл, им. Артемова, Манчары и Апрельская максимальные концентрации оксида бария составляют 8,64 %, 7,45, 10,54 и 9,80 % соответственно (см. таблицу) и установлены в центральных зонах, выполненных бариевым флогопитом. Максимальное содержание BaO 15,14 % (центральная светлоокрашенная зона) зафиксировано в минерале из трубки Турахская (см. таблицу). Такой кристаллохимический состав соответствует калиевому киноситалиту. Калиевый киноситалит с содержанием BaO 16,01 % ранее был также зафиксирован в мезостазисе кимберлитовых пород трубки Юбилейная [3]. Кроме того, калиевый киноситалит (BaO от 16,23 до 21,22 %) диагностирован в основной массе кимберлитовых пород дайки Джос. Как в трубке Юбилейная, так и в дайке Джос этот минерал выполняет дискретные каймы на пластинках безбариевой слюды [3]. В целом, для слюд основной массы всех изученных трубок характерны близкие диапазоны содержания бария, что может свидетельствовать о схожих механизмах позднемагматического флюидного режима.

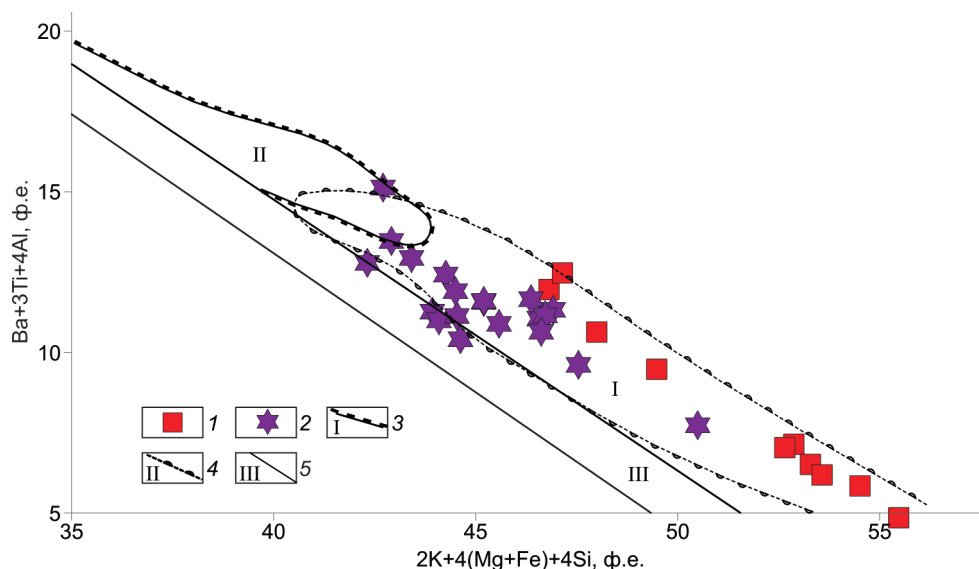


Рис. 6. Составы слюды основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах $Ba+3Ti+4Al-K+4(Mg+Fe)+4Si$ [26]. 1 – барийсодержащий флогопит, 2 – бариевый флогопит и калиевый киноситалит, 3 – поле фенокристаллов магматической слюды, 4 – поле магматической слюды основной массы, 5 – поле слюды метаморфических пород.

Fig. 6. $Ba+3Ti+4Al$ versus $K+4(Mg+Fe)+4Si$ compositional variation [26] of groundmass mica from pipes of the Khompu-May field.

1 – barium-bearing phlogopite, 2 – barium phlogopite and potassium kinoshitalite, 3 – field of magmatic mica phenocrystals, 4 – field of magmatic groundmass mica, 5 – field of mica from metamorphic rocks.

Исследуемые разновидности флогопита на диаграмме, предложенной Райтером [25], попадают в поле слюд фенокристаллов магматического генезиса, выделенное для лампроитов, лампрофиров и других щелочных лав [25] (рис. 6). Относить слюду из основной массы кимберлитов Хомпу-Майского поля к фенокристаллам исходя из петрографических данных нельзя. Таким образом, данный график иллюстрирует лишь магматическую принадлежность исследуемой слюды.

В исследуемом флогопите, не содержащем BaO , постоянно присутствует примесь TiO_2 в количестве от 0,94 до 4,05 % (см. таблицу). В единичных случаях он также установлен в бариевых разновидностях слюды основной массы пород всех исследуемых трубок. Его содержания здесь варьируют от 0,31 до 2,21 % (см. таблицу). Такое поведение титана может свидетельствовать о сложной одновременной кристаллизации слюды и оксидных титаносодержащих минералов в основной массе кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля. Полученные нами данные подтверждают сделанный ранее Р.Х. Митчеллом вывод о том, что концентрации титана в слюдах кимберлитовых пород не зависят от содержания бария [3].

В кимберлитовых породах Хомпу-Майского поля присутствующая в мезостазисе слюда на-

ходится в ассоциации с апатитом, который также имеет обратную зональность по содержанию стронция и кристаллизовался на позднемагматическом этапе [20] в присутствии флюида [26]. Барий и стронций являются типичными некогерентными микроэлементами в магматических процессах [24, 27], которые синхронно обогащают флюиды в остаточном расплаве и при кристаллизации могут входить в состав слюд и апатита, формируя зональные кристаллы.

В разновидностях слюды основной массы всех исследуемых тел в пределах чувствительности рентгеноспектрального метода концентрации фтора зафиксированы не были. Это связано, по всей вероятности, с совместной кристаллизацией слюды и фторапатита, забирающего фтор из расплава [20].

На диаграмме, предложенной Дж. Гаспаром [8], фигуративные точки составов бариевой слюды основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля образуют единое поле составов и, в целом, не попадают в область слюд из карбонатитов, мелилититов [6] и мантийных перидотитов [8]. Это связано с тем, что слюды из кимберлитов менее железистые, чем из мелилититов, и более железистые, чем из карбонатитов. Слюды основной массы пород тру-

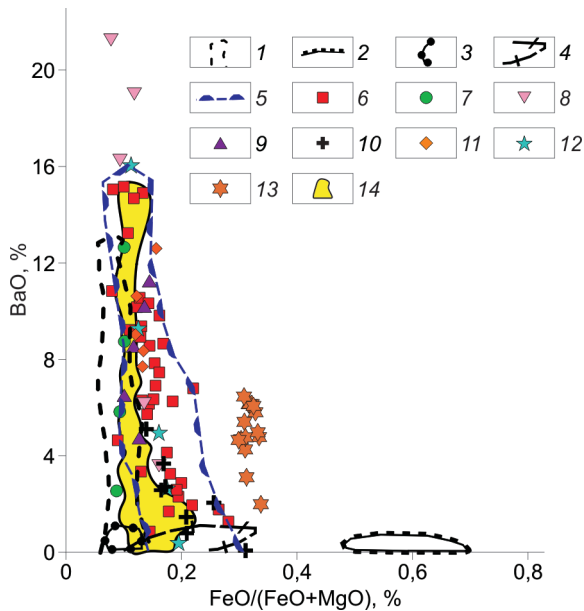


Рис. 7. Особенности состава бариевой слюды основной массы из трубок Хомпу-Майского поля в координатах FeO/(FeO+MgO)–BaO [7]:

1 – карбонатиты массива Якупиранга, 2 – кимберлиты типа I, 3 – мантийные перидотиты, 4 – кимберлиты типа II, 5 – выделенное поле составов слюды кимберлитов Хомпу-Майского поля, 6 – слюда Хомпу-Майского поля, 7 – слюда Элвин Бэй [3], 8 – слюда Джос [3], 9 – слюда Айрон Маунтин [3], 10 – слюда Чикен Парк [3], 11 – слюда Шенгли [3], 12 – слюда Юбилейной [3], 13 – слюда мелилититов [5], 14 – поле составов слюды Снэп Лейк [2].

Fig. 7. BaO versus FeO/(FeO+MgO) compositional variation of groundmass mica from pipes of Khompu-May field [7]: 1 – carbonatites of the Jakupiranga massif, 2 – kimberlites of type I, 3 – mantle peridotites, 4 – kimberlites of type II, 5 – a single field of mica compositions from kimberlites of the Khompu-May field, 6 – mica from Khompu-May field, 7 – mica from Elwin Bay [3], 8 – mica from Jos [3], 9 – mica from Iron Mountain [3], 10 – mica from Chiken Park [3], 11 – mica from Shengli [3], 12 – mica from the Yubileynaya [3], 13 – mica from melilitites [5], 14 – composition field of mica from the Snap Lake [2].

бок Хомпу-Майского поля образуют единую область составов с таковыми из кимберлитов даек Снэп Лейк [2] и Джос, кимберлитовых комплексов Чикен Парк и Айрон Маунтин, кимберлитовых трубок Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] (рис. 7). Это может свидетельствовать о универсальности режимов кристаллизации минералов ряда флогопит–киноситалит на позднемагматической стадии формирования кимберлитов. Частичное перекрытие области карбонатитовых флогопитов и фигуративных точек состава слюды из дайки Снэп Лейк связано с тем, что кимберлиты дайки Снэп Лейк имели контакт с карбонатита-

ми [28] или карбонатитовый флюид взаимодействовал с кимберлитовым расплавом [2].

Заключение

Проведенные исследования показали, что слюда из основной массы кимберлитовых пород, слагающих трубки Эрэл, Турахская, им. Артемова, Апрельская и Манчары представлена следующими разновидностями: флогопит, барийсодержащий флогопит, бариевый флогопит и калиевый киноситалит. Все эти разновидности могут присутствовать в пределах одного зерна, формируя зоны с различным содержанием оксида бария. В результате изучения зональности слюды установлены особенности поведения BaO на позднемагматической стадии формирования кимберлитовых трубок Хомпу-Майского поля. Начало кристаллизации слюды на позднемагматической стадии проходило при высокой концентрации бария в остаточном расплаве, что проявляется в виде обратного типа зональности, который наиболее распространен в слюдах пород Хомпу-Майского поля и характерен для кимберлитовых слюд в целом [2, 3]. Калиевый киноситалит редок и фиксируется в единичных случаях в метазостазисе пород, слагающих трубку Турахская. Совместная кристаллизация стронциевого фтор-апатита [19] и минералов ряда флогопит–киноситалит может свидетельствовать о том, что в их образовании на позднемагматическом этапе принимали участие флюиды, обогащенные стронцием и барием. При завершении кристаллизации слюды возможно обогащение остаточных расплавов барием, что, в редких случаях, приводит к появлению зональности прямого типа.

Анализ литературных и полученных авторами данных позволяет предположить, что появление высокобариевых слюд может быть связано с высокой долей магматического карбоната в кимберлитовых породах, т. е. с повышенными содержаниями CO₂ в расплаве [29]. Так, например, карбонатный кимберлит силлов Бенфонтейн содержит чистый незональный киноситалит [3], а обогащенные кальцитом кимберлитовые дайки Снэп Лейк и Джос содержат бариевый флогопит [2] и калиевый киноситалит [3]. Определить количество магматического карбоната в кимберлитах Хомпу-Майского поля сложно из-за наложенной постмагматической карбонатизации, однако его присутствие подтверждается данными о наличии идиоморфных включений кальцита в шпинелидах трубки Манчары [15].

Проведенный сравнительный анализ строения зональных слюд кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля с таковыми из известных кимберлитовых тел мира показал, что режим обогащения бария может быть различным, о чем свидетельствует появление в кристаллах различных типов зональности. Бариевые слюды мезостазиа Хомпу-Майского поля близки к таковым из кимберлитовых тел Снэп Лейк [2], Джос, Чикен Парк, Айрон Маунтин, Элвин Бэй, Шенгли и Юбилейная [3] и образуют с ними единое поле составов, что может свидетельствовать о типоморфизме бариевых кимберлитовых слюд и близких условиях их кристаллизации на позднемагматическом этапе.

Список литературы

1. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
2. Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // *The Canadian Mineralogist*. 2010. Vol. 48 (3). P. 549–570.
3. Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York: Plenum Press, 1995.
4. Костровицкий С.И., Спеццус З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаас Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: ООО «МГТ», 2015. 480 с.
5. Velde D. Trioctahedral micas in melilite-bearing eruptive rocks // *Carnegie Institution of Washington Year Book*. 1979. Vol. 78. P. 468–475.
6. Tappe S., Foley S.F., Stracke A., Romer R.L., Kjarsgaard B.A., Heaman L.M., Joyce N. Craton reactivation on the Labrador Sea margins: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Sr–Nd–Hf–Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. Vol. 256(3–4). P. 433–454.
7. Birch W.D. Mineralogy and geochemistry of the leucite at Cosgrave, Victoria // *J. Geol. Soc. Australia*. 1978. Vol. 25. P. 369–385.
8. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 997–1000.
9. Kogarko L.N., Kurat G., Naflos T. Carbonate metasomatism of the oceanic mantle beneath Fernondo de Naronha Island, Brasil // *Contrib. Miner. Petrol.* 2001. Vol. 140. P. 577–587.
10. Kogarko L.N., Uvarova Y.A., Sokolova E. et al. Oxykinoshitalite, a new species of mica from Fernondo de Naronha Island, Pernambuco, Brasil: occurrence and crystal structure // *Can. Miner.* 2005. Vol. 43. P. 1501–1510.
11. Сметлов А.П., Андреев А.П., Алтухова З.А., Бабушкина С.А., Бекренев К.А., Зайцев А.И., Избеков Э.Д., Королева О.В., Мишин В.М., Округин А.В., Олейников О.Б., Сурнин А.А. Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 1. С. 153–159.
12. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности состава кимберлитов Хомпу-Майского поля по результатам полуколичественного рентгенофазового анализа // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск, 2014. С. 341–345.
13. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Заякина Н.В. Особенности минерального состава кимберлитовых пород Хомпу-Майского поля // *Арктика XXI век. Технические науки*. 2015. Т. 3, № 1. С. 12–20.
14. Опарин Н.А., Мишин В.М., Андреев А.П., Олейников О.Б., Бабушкина С.А., Заякина Н.В. Особенности состава кимберлитовых пород трубок Дабан и Апрельская // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск. 2016. С. 251–254.
15. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Хромшпинелиды из трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2018. № 5. С. 35–41.
16. Опарин Н.А., Олейников О.Б. Макрокристаллы пикроильменита кимберлитовых трубок Хомпу-Майского кимберлитового поля (Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2019. № 6. С. 43–49.
17. Oparin N., Oleynikov O. Picroilmenite from Kimberlite Pipes of Central Yakutia // 2020 IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 2020. 609. 012028.
18. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Бабушкина С.А. Флогопит из трубок Манчары и Апрельская (Хомпу-Майское кимберлитовое поле, Центральная Якутия) // *Отечественная геология*. 2017. № 5. С. 37–44.
19. Oparin N., Oleinikov O. Barium phlogopite from kimberlite pipes of Central Yakutia // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018. Vol. 18, Issue 1.1. P. 19–26.
20. Опарин Н.А., Олейников О.Б., Баранов Л.Н. Апатит из кимберлитовой трубки Манчары (Центральная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25, № 3. С. 13–24.
21. Номенклатура слюд: заключительный доклад подкомитета по слюдам комиссии по новым минералам и названиям минералов международной минералогической ассоциации (КНМНМ ММА) // *Записки ВМО*. 1998. № 5. С. 55–65.
22. Tappert R., Foden J., Heaman L., Tappert M.C., Zurevinski S.Z., Wills K. The petrology of kimberlites from South Australia: Linking olivine macrocrystic and micaceous kimberlites // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2019. Vol. 373. P. 68–96.
23. Краснова Н.И., Петров Т.Г. Генезис минеральных индивидов и агрегатов. СПб.: Невский курьер, 1995. 228 с.

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

25. Richter K., Carmichael I.S. Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 123. P. 1–21.

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

27. Соловова И.П., Гирнис А.В., Рябчиков И.Д., Сумакин С.Г. Высокотемпературный карбонатитовый расплав и его взаимоотношения с щелочными магма-

ми Дункельдыкского комплекса, юго-восточный Памир // Докл. РАН. 2006. Т. 409. С. 1–4.

28. Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V. Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chemical Geology. 2008. Vol. 255. P. 317–328.

29. Castillo-Oliver M., Giuliani A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Drysdale R.N., Abersteiner A., Thomasot E., Li X. New constraints on the source, composition, and post-emplacement modification of kimberlites from in situ C–O–Sr-isotope analyses of carbonates from the Benfontein sills (South Africa) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175 (33).

Поступила в редакцию 28.09.2021

Принята к публикации 22.10.2021

Об авторах

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

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

Информация для цитирования

Опарин Н.А., Олейников О.Б. Минералы ряда флогопит–киношталит основной массы кимберлитовых пород трубок Хомпу-Майского поля (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 29–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42

Minerals of the phlogopite-kinoshitalite series from the groundmass of kimberlite rocks in pipes from the Khompu-May field (Central Yakutia)

N.A. Oparin*, O.B. Oleinikov

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

*nik3256-1989@yandex.ru

Abstract. The present paper discusses the results of a systematic study of mica microcrystals of the phlogopite-kinoshitalite group found in the main body of the Yakut kimberlite province, by the example of mid-Palaeozoic pipes of the Khompu-May kimberlite field in Central Yakutia. Chemical composition and zone distribution of minerals are reported, a comparison is provided with mica, peridotite mantle xenoliths from the kimberlite pipes of Africa, single kimberlite bodies of Canada, Africa, USA, China, and Yakutian kimberlite province, carbonatite massifs of Brazil, and melilitites of Russia. The following mica types were

identified: phlogopite, barium-bearing phlogopite, barian phlogopite, and potassium kinoshitalite. All these types can be found within one grain, defining its zone distribution. The late-stage magmatic character of the mica under investigation was specified, with its composition being caused by barium-rich fluids. Investigation of zoning in flakes allowed us to describe the behavior of BaO in kimberlite formation of the pipes. Similarities and differences in the composition of mica from the Khompu-May kimberlite pipes and kimberlite bodies studied earlier; carbonatites, mantle xenoliths, and melilitites indicate that the mineral is specific for different magmatic systems with barium-rich fluids. Thus, mica composition can be used for comparative studies of kimberlites and other alkaline ultrabasic rocks.

Keywords: phlogopite, barian phlogopite, barium-bearing phlogopite, potassium kinoshitalite, kimberlite pipe, the Khompu-May kimberlite field, Yakutian kimberlite province.

Acknowledgements. The research was carried out as part of the scientific work of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS (No. 0381-2019-0003).

References

1. Dawson J. Kimberlity i ksenolity v nih. M.: Mir, 1983. 300 p.
2. Kopylova M.G., Mogg T., Smith B.S. Mineralogy of the Snap Lake kimberlite, Northwest territories, Canada, and compositions of phlogopite as records of its crystallization // The Canadian Mineralogist. 2010. Vol. 48 (3). P. 549–570.
3. Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks. New York: Plenum Press, 1995.
4. Kostrovickij S.I., Specius Z.V., Yakovlev D.A., Fonder Flaas G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N. Atlas korenyh mestorozhdenij almazov Yakutskoj kimberlitovoj provincii. Mirnyj: OOO «MGT», 2015. 480 p.
5. Velde D. Trioctahedral micas in melilite-bearing eruptive rocks // Carnegie Institution of Washington Year Book. 1979. Vol. 78. P. 468–475.
6. Tappe S., Foley S.F., Stracke A., Romer R.L., Kjarsgaard B.A., Heaman L.M., Joyce N. Craton reactivation on the Labrador Sea margins: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age and Sr–Nd–Hf–Pb isotope constraints from alkaline and carbonatite intrusives // Earth and Planetary Science Letters. 2007. Vol. 256(3–4). P. 433–454.
7. Birch W.D. Mineralogy and geochemistry of the leucite at Cosgrave, Victoria // J. Geol. Soc. Australia. 1978. Vol. 25. P. 369–385.
8. Gaspar J.C., Wyllie P.J. Barium phlogopite from the Jacupiranga carbonatite, Brazil // American Mineralogist. 1982. Vol. 67. P. 997–1000.
9. Kogarko L.N., Kurat G., Ntaflos T. Carbonate metasomatism of the oceanic mantle beneath Fernando de Noronha Island, Brasil // Contrib. Miner. Petrol. 2001. Vol. 140. P. 577–587.
10. Kogarko L.N., Uvarova Y.A., Sokolova E. et al. Ox-kinoshitalite, a new species of mica from Fernando de Noronha Island, Pernambuco, Brasil: occurrence and crystal structure // Can. Miner. 2005. Vol. 43. P. 1501–1510.
11. Smelov A.P., Andreev A.P., Altuhova Z.A., Babushkina S.A., Bekrenev K.A., Zajcev A.I., Izbekov E.D., Koroleva O.V., Mishnin V.M., Okrugin A.V., Olejnikov O.B., Surnin A.A. Kimberlity trubki Manchary: novoe kimberlitovoe pole Central'noj Yakutii // Geologiya i geofizika. 2010. Vol. 51. No. 1. P. 153–159.
12. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Zayakina N.V. Osobennosti sostava kimberlitov Hompu-Majskogo polya po rezul'tatam polukolichestvennogo rentgenofazovogo analiza // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2014. P. 341–345.
13. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Zayakina N.V. Osobennosti mineral'nogo sostava kimberlitovyh porod Hompu-Majskogo polya // Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki. 2015. No. 1. Vol. 3. P. 12–20.
14. Oparin N.A., Mishnin V.M., Andreev A.P., Olejnikov O.B., Babushkina S.A., Zayakina N.V. Osobennosti sostava kimberlitovyh porod trubok Daban i Aprel'skaya // Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Yakutsk, 2016. P. 251–254.
15. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Hromshpinelidy iz trubok Hompu-Majskogo kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. No. 5. 2018. P. 35–41.
16. Oparin N.A., Olejnikov O.B. Makrokristally pikroil'menita kimberlitovyh trubok Hompu-Majskogo kimberlitovogo polya (Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2019. No. 6. P. 43–49.
17. Oparin N., Olejnikov O. Picroilmenite from Kimberlite Pipes of Central Yakutia // 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. 609. 012028.
18. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Babushkina S.A. Flo-gopit iz trubok Manchary i Aprel'skaya (Hompu-Majskoe kimberlitovoe pole, Central'naya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 5. P. 37–44.
19. Oparin N., Olejnikov O. Barium phlogopite from kimberlite pipes of Central Yakutia // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018. 2018. Vol. 18, Issue 1.1. P. 19–26.
20. Oparin N.A., Olejnikov O.B., Baranov L.N. Apatit iz kimberlitovoj trubki Manchary (Central'naya Yakutiya) // Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики. 2020. Vol. 25, No 3. P. 13–24.

21. *Nomenklatura slyud: zaklyuchitel'nyj doklad podkomiteta po slyudam komissii po novym mineralam i nazvaniyam mineralov mezhdunarodnoj mineralogicheskoy assotsiatsii (KNMNM MMA)* // Zapiski VMO. 1998. No. 5. P. 55–65.
22. Tappert R., Foden J., Heaman L., Tappert M.C., Zurevinski S.Z., Wills K. The petrology of kimberlites from South Australia: Linking olivine macrocrystic and micaceous kimberlites // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. Vol. 373. P. 68–96.
23. Krasnova N.I., Petrov T.G. Genezis mineral'nyh individov i agregatov. Sankt-Peterburg.: Nevskij kur'er, 1995. 228 p.
24. Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Kononkova N.N. Mekhanizmy obrazovaniya vysokobarievogo flogopita i vysokostronciyevogo apita na zaklyuchitel'nyh stadiyah evolyucii shchelochnyh magm // Geohimiya. 2009. No. 6. P. 613–627.
25. Richter K., Carmichael I.S. Phase equilibria of phlogopite lamprophyres from western Mexico: biotite-liquid equilibria and P-T estimates for biotite-bearing igneous rocks // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 123. P. 1–21.
26. Wyllie P.J., Cox K.G., Biggar G.M. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks // Journal of Petrology. 1962. Vol. 3. P. 238–243.
27. Solovova I.P., Girnis A.V., Ryabchikov I.D., Simakin S.G. Vysokotemperaturnyj karbonatitovyj rasplav i ego vzaimootnosheniya s shchelochnymi magmami Dunkel'dybskogo kompleksa, yugo-vostochnyj Pamir // Dokl. RAN. 2006. Vol. 409. P. 1–4.
28. Agashev A.M., Pokhilenko N.P., Takazawa E., McDonald J.A., Vavilov M.A., Watanabe T., Sobolev N.V. Primary melting sequence of a deep (> 250 km) lithospheric mantle as recorded in the geochemistry of kimberlite-carbonatite assemblages, Snap Lake dyke system, Canada // Chemical Geology. 2008. Vol. 255. P. 317–328.
29. Castillo-Oliver M., Giuliani A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Drysdale R.N., Abersteiner A., Thomasot E., Li X. New constraints on the source, composition, and post-emplacement modification of kimberlites from in situ C–O–Sr-isotope analyses of carbonates from the Benfontein sills (South Africa) // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2020. Vol. 175 (33).

About the authors

OPARIN, Nikolay Alexandrovich, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-3019-1245>, e-mail: nik3256-1989@yandex.ru;
 OLEYNIKOV, Oleg Borisovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1010-7592>, e-mail: olei-oleg@yandex.ru.

Citation

Oparin N.A., Oleynikov O.B. 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, Vol. 26, No. 4. P. 29–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-29-42>

Углеводороды каркасного строения в различных генетических типах нефтей и конденсатов Западной Якутии

О.Н. Чалая^{1,*}, С.Х. Лифшиц¹, В.А. Каширцев^{1,2}, И.Н. Зуева¹, Ю.С. Глязнецова¹

¹Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им.А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

*oncha@ipng.ysn.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованиям содержания, состава и характера распределения адамантановых углеводородов. Материалом послужили нафтиды различных генетических типов из месторождений Западной Якутии: нефти и конденсаты из венд-кембрийских отложений, генерированные планктонно-водорослевым органическим веществом морских фаций (I генотип), и мезозойские нефти и конденсаты, генерированные террагенным органическим веществом континентальных фаций (II генотип). Индивидуальный углеводородный состав фракций нафтидов определялся методом хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent 6890, имеющем интерфейс с высокоэффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Характерная картина распределения адамантана и его метилпроизводных получена сканированием по фрагментарным ионам m/z 135, 136, 149, 163, 177, 188. В результате проведенных исследований установлено присутствие адамантановых углеводородов состава от $C_{10}H_{16}$ до $C_{14}H_{24}$ во всех исследованных нафтидах. Показано, что адамантановые углеводороды внутри каждого генетического типа характеризуются близкими составом и распределением. Вместе с тем были установлены определенные различия их распределения в нафтидах разного генезиса. Нафтиды I генотипа отличаются от нафтидов II генотипа меньшим содержанием адамантана, его метил- и диметилпроизводных, большим содержанием три- и тетраметиладамантанов, более низкими значениями отношений C_{11}/C_{13} и C_{12}/C_{13} и этиладамантанового индекса. Полученные данные по составу адамантановых УВ могут служить дополнительными геохимическими критериями при определении генезиса нафтидов.

Ключевые слова: адамантановые углеводороды, адамантан, метиладамантаны, хромато-масс-спектрометрия, генотипы нафтидов, нефти, конденсаты.

Благодарности. Авторы благодарят коллег, принимавших участие в выполнении аналитических определений. Работа выполнена по Программе ФНИ № АААА-А21-121011490054-0.

Введение

Интерес к изучению углеводородов (УВ) каркасного строения обусловлен необычной алмазоподобной структурой адамантана и его неординарными свойствами: высокой температурой плавления (269 °С), высокой термической стабильностью, более высокой реакционной способностью по сравнению с насыщенными УВ алифатического и ациклического рядов и стойкостью к биодegradации [1–6]. Эти УВ приобретают важное значение при выяснении геохимических особенностей процессов формирования состава конденсатов, легких и сильно преобразованных нефтей в отсутствие высокомолекулярных биомаркеров [1, 2, 7–11]. Это позволяет использо-

вать данные по составу адамантанов для решения вопросов генезиса и химической эволюции нафтидов. В то же время, адамантановые УВ представляют определенный промышленный интерес как сырье для получения ценных продуктов в различных отраслях промышленности [12].

Исследованию адамантановых УВ посвящали работы российские и зарубежные исследователи: Е.И. Багрия, Г.Н. Гордадзе, М.В. Гируц, Ал.А. Петров, О.А. Арефьев, Н.С. Воробьева, Г.В. Русинова, В.А. Каширцев, К.Е. Peters, J.M. Moldovan, P.R. Schleyer и др. Установлено, что УВ каркасного строения отсутствуют в природной биомассе [1, 6, 13] и образуются в результате термического и каталитического крекинга высокомоле-

кулярных насыщенных УВ, а также смол и асфальтенов в нефтях как аквагенного, так терригенного генезиса [14–19]. По мнению Ч.М. Бадмаева [20], процесс образования длинноцепочечных алкиладамантанов скорее всего начинается на ранних стадиях катагенеза, и позднее по мере созревания ОБ они крекируются до метил- и этилзамещенных адамантанов. Отсутствие длинноцепочечных моноалкилзамещенных адамантанов (с заместителями больше этильного) обусловлено достаточно высокой степенью преобразования ОБ [1, 6, 13].

Получение адамантановых УВ связано с их выделением из природных источников, основным из которых является нефть. Содержание адамантана в нефтях составляет 0,0001–0,0300 мас.% [1, 2, 21]. Уникальное количество адамантановых УВ – до 6 мас.% содержится в сеноманских нефтях Западной Сибири (месторождение Русское) [10].

Данная работа посвящена исследованиям адамантановых УВ, их содержания, состава и характера распределения в различных генетических типах нефтей и конденсатов Западной Якутии.

Материал и методика исследования

Материалом исследований послужили нафтиды различных генетических типов Западной Якутии: нефти и конденсаты из венд-кембрийских отложений, генерированные планктонно-водородным органическим веществом (ОВ) морских фаций (I генотип), и мезозойские нефти и конденсаты, генерированные смешанным ОБ континентальных фаций с преобладанием террагенной составляющей (II генотип) [22–24].

Индивидуальный углеводородный состав фракций нефтей и конденсатов определялся методом хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent 6890, имеющем интерфейс с высокоэффективным масс-селективным детектором Agilent 5973N. Хроматограф снабжен кварцевой капиллярной колонкой длиной 30 м и диаметром 0,25 мм. Хроматограммы были получены по общему электронному току и фрагментным ионам. Характерную картину распределения адамантана и его метилпроизводных дает сканирование по фрагментарным ионам m/z 135, 136, 149, 163, 177, 188 (рис. 1).

Идентификация соединений осуществлялась сравнением полученных индивидуальных масс-спектров с уже имеющимися спектрами в би-

блиотеке системы, а также с опубликованными данными [25].

Результаты и обсуждение

Для геохимической характеристики различных генетических типов нафтидов использованы данные по их индивидуальному углеводородному составу. Генетический тип конденсатов и нефтей определен на основе распределения УВ ряда алканов, цикланов, аренов и высокомолекулярных полициклических УВ-биомаркеров (стеранов и гопанов) [22–24].

Геохимическая характеристика нафтидов Западной Якутии. УВ конденсатов и бензиновых фракций нефтей представлены н-алканами, изоалканами, цикланами и аренами. Углеводородный состав конденсатов и бензиновых фракций нефтей I генотипа характеризуется преобладанием алканов (69–87 %), невысоким содержанием цикланов (17–24 %), среди которых цикlopентаны превалируют над циклогексанами или содержатся почти в равных количествах. Арены составляют от 2 до 8 % (рис. 2).

Бензиновые фракции нефтей и конденсаты II генотипа отличаются от I генотипа более низким содержанием алканов (31–48 %), значительными концентрациями цикланов (41–59 %) с преобладанием циклогексанов над цикlopентанами и более высоким содержанием ароматических УВ (от 8 до 22 %) (рис. 2).

Вместе с тем, из приведенных данных видно, что нефти и конденсаты, относящиеся к единому генетическому типу, характеризуются близким распределением легких УВ.

По составу и распределению УВ-биомаркеров нефти I генотипа характеризуются присутствием 12- и 13-метилалканов, преобладанием относительно низкомолекулярных н-алканов с максимумами на $nC_{15,17}$, преобладанием фитана над пристаном, н-алканов над изопреноидами. Для полициклических УВ характерно присутствие гаммацера, значительное содержание трицикланов, повышенная концентрация гомогопана C_{35} по отношению к гомогопану C_{34} . В составе стеранов преобладают изостераны C_{29} , по соотношению био- и гео-стеранов все нефти являются зрелыми (табл. 1). Такое распределение УВ-биомаркеров характерно для нефтей, генерированных аквагенным ОБ морских фаций в восстановительной обстановке диагенеза [23, 24].

Нефти II генотипа характеризуются высокой концентрацией относительно высокомолекуляр-

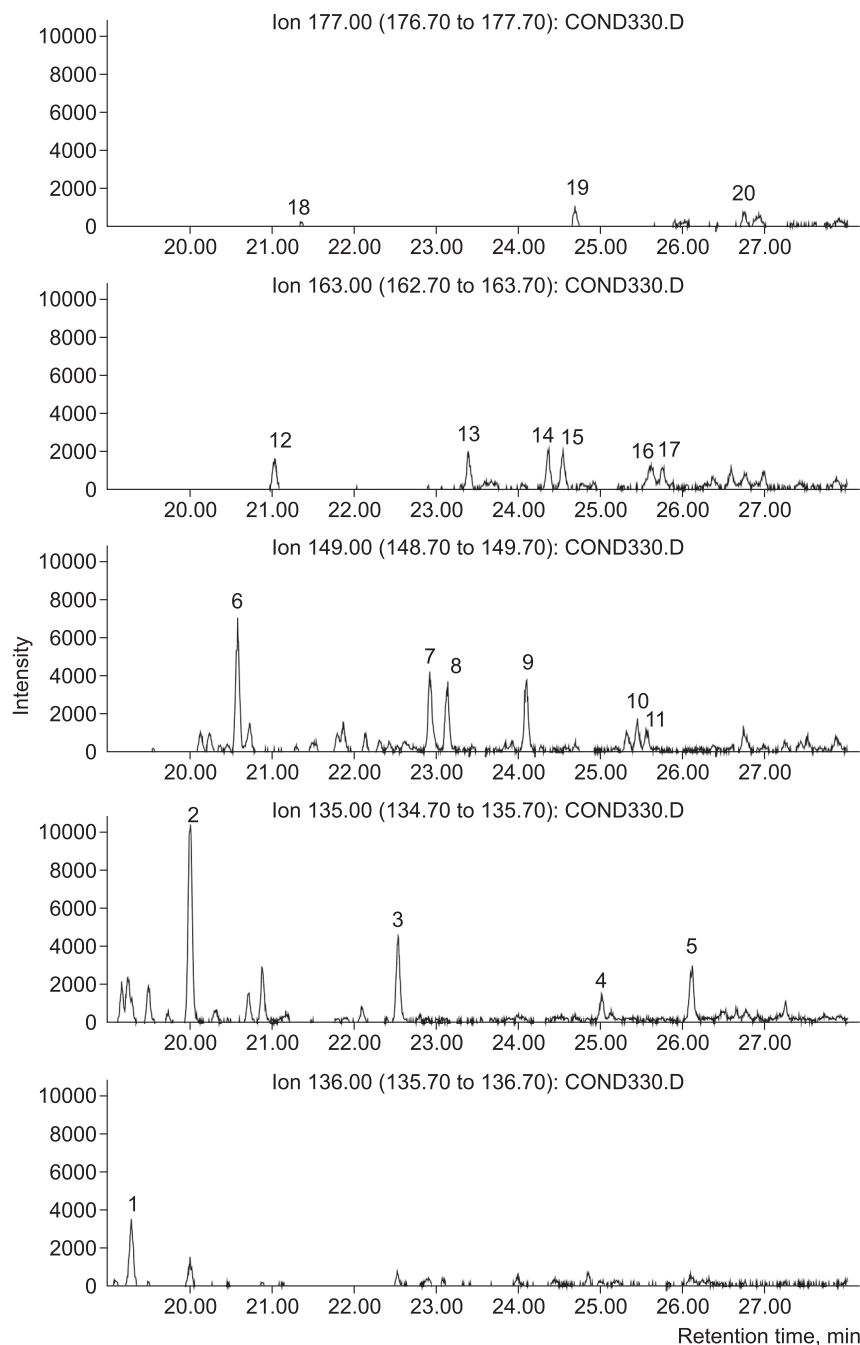


Рис. 1. Типичные масс-фрагментогаммы распределения адамантановых УВ:

1 – адамантан; 2 – 1-метиладамантан; 3 – 2-метиладамантан; 4 – 1-этиладамантан; 5 – 2-этиладамантан; 6 – 1,3-диметиладамантан; 7 – 1,4-диметиладамантан (цис); 8 – 1,4-диметиладамантан (транс); 9 – 1,2-диметиладамантан; 10 – 3-метил-1-этиладамантан; 11 – 2,4-диметиладамантан; 12 – 1,3,5-триметиладамантан; 13 – 1,3,6-триметиладамантан; 14 – 1,3,4-триметиладамантан (цис); 15 – 1,3,4-триметиладамантан (транс); 16 – 3,5-диметил-1-этиладамантан; 17 – 1,2,6-триметиладамантан; 18 – 1,3,5,7-тетраметиладамантан; 19 – 1,3,5,6-тетраметиладамантан; 20 – 1,2,3,5-тетраметиладамантан.

Fig. 1. Typical mass-fragmentograms of the distribution of adamantane hydrocarbons:

1 – adamantane; 2 – 1- methyladamantane; 3 – 2-methyladamantane; 4 – 1-ethyladamantane; 5 – 2-ethyladamantane; 6 – 1.3-dimethyladamantane; 7 – 1.4-dimethyladamantane (cis); 8 – 1.4-dimethyladamantane (trans); 9 – 1.2-dimethyladamantane; 10 – 3-metyityl-1-ethyladamane; 11 – 2.4-dimethyladamantane; 12 – 1.3.5-trimethyladamantane; 13 – 1.3.6-trimethyladamantane; 14 – 1.3.4-trimethyladamantane (cis); 15 – 1.3.4-trimethyladamantane (trans); 16 – 3.5-dimethyl-1-ethyladamantane; 17 – 1.2,6-trimethyladamantane; 18 – 1.3,5,7-tetramethyladamantane; 19 – 1.3,5,6-tetramethyladamantane; 20 – 1.2,3,5-tetramethyladamantane.

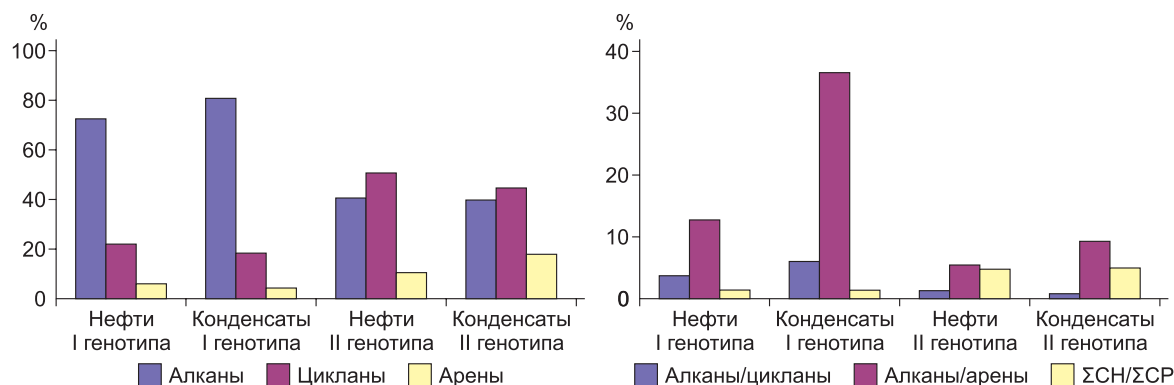


Рис. 2. Характер распределения и соотношения индивидуальных УВ в бензиновых фракциях нефтей и конденсатах разных генетических типов.

Fig. 2. The distribution and ratio of individual hydrocarbons in benzene fractions of oils and condensates of different genotypes.

ных *n*-алканов с максимумом на $nC_{23,25}$, преобладанием пристана над фитаном, высокой относительной концентрацией этилхолестанов C_{29} , сравнительно высокими концентрациями перегруппированных стеранов (диастеранов), отсутствием или низкими концентрациями трициклических хейлантанов, низкой концентрацией или отсутствием гомогепана C_{35} (см. табл. 1). Такое распределение УВ-биомаркеров характерно для нефтей, генерированных ОВ сапропелито-гумитов континентальных фаций в окислительной обстановке диагенеза [23, 24].

Адамантановые УВ нафтидов Западной Якутии различных генетических типов. Во всех исследованных нефтях и конденсатах Западной Якутии установлено присутствие адамантановых УВ, сконцентрированных во фракции 150–250 °C и представленных гомологическим рядом от $C_{10}H_{16}$ до $C_{14}H_{24}$. В нефтях и конденсате I генотипа, относящихся по химической классификации к алкановым нефтям и конденсатам, содержание этих УВ низкое и не превышает 0,04 %. В конденсатах II генотипа более нафтенного состава по сравнению с нафтидами I генотипа адамантановые УВ составляют 0,08 %. Это согласуется с данными ряда исследователей о прямой зависимости количественного содержания адамантановых УВ в нефтях и конденсатах от их химической природы [1–3]. Наиболее высоким содержанием адамантанов характеризуются нефти нафтенного типа, алкановые нефти содержат эти УВ в значительно меньшем количестве [1–3].

Следует отметить близость группового состава и распределения адамантанов C_{10} – C_{14} в нефтях и конденсатах внутри каждого генетического типа (табл. 2, рис. 3).

Как видно из приведенных данных, в нафтидах I генотипа в составе адамантановых УВ, как в нефтях, так и в конденсате, преобладают диметилзамещенные адамантаны и ниже доля метил- и триметиладамантанов. Содержание адамантана не превышает 3 % в расчете на фракцию адамантанов. Отношение адамантанов C_{12}/C_{13} выше, чем соотношение C_{11}/C_{13} .

Следует отметить, что конденсаты и нефти данного генотипа могут несколько различаться по количественному содержанию отдельных гомологов адамантана.

Относительные концентрации более устойчивых изомеров метиладамантанов состава C_{11} – C_{13} в нефтях и конденсатах I генотипа далеки от равновесных и уменьшаются с увеличением молекулярной массы. Так, в нефтях отношение 1-МА/(1+2-МА) составляет 76,9–78,4 %, 1,3-ДМА/(1,3+1,2+1,4-ДМА) – 38,2–41,6 %, 1,3,5-ТМА/(1,3,5+1,3,6+1,3,4-ТМА) – 24,8–25,0 %. В конденсате эти отношения ближе к равновесным и составляют соответственно 84,2, 52,4, 37,9 % (см. табл. 2, рис. 4).

Известно, что относительные концентрации более устойчивых изомеров адамантанов C_{11} – C_{13} в равновесном состоянии составляют 92,5–98 %. Среди диметил- и триметиладамантанов цис-изомеры преобладают над транс-изомерами, что наиболее отчетливо выражено в составе конденсата по сравнению с нефтями (см. табл. 2). Это может зависеть от условий и механизма образования этих структур из протоадамантановых УВ [16, 17, 26].

Однотипный состав и характер распределения адамантановых УВ установлены также в нефтях и конденсатах II генотипа (см. табл. 2, рис. 3).

Таблица 1

**Геохимические показатели по составу УВ-биомаркеров
различных генетических типов нефтей Западной Якутии**

Table 1

**Geochemical indicators on the composition of hydrocarbon biomarkers
of different genotypes of oils of West Yakutia**

Параметры Parameters	Нефти I генотипа Oils I genotype	Нефти II генотипа Oils II genotype
$\sum \text{н.к-н}C_{20}/\sum \text{н}C_{21}\text{-к.к.}$ $\sum \text{b.b-н}C_{20}/\sum \text{н}C_{21}\text{-e.b.}$	3,38–6,50	0,23–0,68
Максимум н-алканов Maximum n-alkanes	$\text{н}C_{15,17}$	$\text{н}C_{23,25}$
Изопреноиды/н-алканы Isoprenoids/ n-alkanes	0,24–0,33	0,02–0,04
Пристан/фитан Pristan/phytan	0,68–0,91	1,85–7,14
CPI	1,05–1,13	1,06–1,12
Пристан/ $\text{н}C_{17}$ Pristan/ $\text{n}C_{17}$	0,35–0,47	0,34–0,48
Фитан/ $\text{н}C_{18}$ Phytan/ $\text{n}C_{18}$	0,63–0,94	0,11–0,58
Гопаны Hopanes:		
Ts/Tm	0,3–0,7	0,4–0,8
Моретаны/гопаны Moretanes/hopanes	0,08–0,11	0,04–0,13
Гомогопановый индекс Homohopanes index	0,10–0,15	0,03–0,04
Трицикланы/гопаны Tricyclanes/hopanes	1,06–1,24	0,01–0,05
Стераны Steranes:		
C_{28}/C_{29}	0,21–0,34	0,34–0,52
Диастераны/регулярные стераны Diasteranes/regular steranes	0,19–0,33	0,38–0,63
$K_{\text{созр}}$ $K_{\text{maturation}}$	0,42–0,43	0,40–0,50

Примечание. н.к. – начало кипения; к.к. – конец кипения; CPI – отношение суммы нечетных н-алканов к четным; Ts/Tm – отношение неогопана C_{27} к регулярному гопану C_{27} ; гомогопановый индекс – отношение гомогопана C_{35} к сумме гомогопанов; C_{28}/C_{29} – отношение суммы метилхolestанов C_{28} к сумме этилхolestанов C_{29} ; $K_{\text{созр}}$ – отношение стеранов C_{29} (14β , 17β , $20R+20S/5\alpha$, $20R$).

Note. b.b. – beginning boiling; e.b. – end boiling; CPI – ratio of sum of odd n-alkanes to even; Ts/Tm – ratio of neohopane C_{27} to regular hopane C_{27} ; homohopanes index – ratio homohopane C_{35} to sum homohopanes; C_{28}/C_{29} – ratio sum methylcholestanes C_{28} to sum summe ethylcholestanes C_{29} ; $K_{\text{maturation}}$ – ratio steranes C_{29} (14β , 17β , $20R+20S/5\alpha$, $20R$).

По количественному содержанию метилзамещенные адамантаны составляют ряд: диметиладамантаны – метиладамантаны – триметилада-

мантаны – тетраметиладамантаны. Количество адамантана не более 7,4 %. Отношение C_{12}/C_{13} выше, чем соотношение C_{11}/C_{13} (см. табл. 2).

Таблица 2

Распределение адамантановых УВ в нефтях и конденсатах различных генотипов

Table 2

Distribution of adamantane hydrocarbons in oils and condensates of different genotypes

Параметры Parameters	I генотип I genotype		II генотип II genotype	
Тип флюида Fluid type	Нефти Oils	Конденсат Condensate	Нефть Oils	Конденсат Condensate
Содержание, % на Σ адамантанов: Адамантан C_{10} Content, % on Σ adamantanes: Adamantane C_{10}	2,5–3,1	3,1	7,37	5,91
Метиладамантаны C_{11} (МА) Methyladamantanes C_{11} (MA)	15,7–20,5	22,0	29,96	34,04
Диметиладамантаны C_{12} (ДМА) Dimethyladamantanes C_{12} (DMA)	34,4–37,0	36,70	40,55	38,30
Триметиладамантаны C_{13} (ТМА) Trimethyladamantanes C_{13} (TMA)	28,6–32,1	28,2	16,59	18,96
Тетраметиладамантаны C_{14} Tetramethyladamantanes C_{14}	12,5–13,4	10,0	5,53	3,79
C_{11}/C_{13}	0,49–0,72	0,78	1,81	1,57
C_{12}/C_{13}	1,15–1,20	1,30	2,44	2,32
1-МА/(1+2-МА), % ЭАИ=1-ЭА/(1-Э+2-ЭА), % EAI=1-EA/(1-E+2-EA), %	76,90–78,40	84,23	70,76	69,09
1,3-ДМА/(1,3+1,2+1,4-ДМА), % 1,3-DMA/(1,3+1,2+1,4-DMA), %	38,24–41,66	52,37	34,34	37,13
1,3,5-ТМА/(1,3,5+1,3,6+1,3,4-ТМА), %	24,79–25,01	37,90	22,17	20,71
цис-1,4-ДМА/транс-1,4-ДМА cis-1,4-DMA/trans-1,4-DMA	1,00–1,16	1,31	1,14	1,12
цис-1,3,4-ТМА/транс-1,3,4-ТМА cis-1,3,4-DMA/trans-1,3,4-TMA	1,07–1,08	1,20	1,00	1,11

Примечание. ЭАИ – этиладамантановый индекс, ЭА – этиладамантан.

Note. EAI – ethyladamantanes index, EA – ethyladamantane.

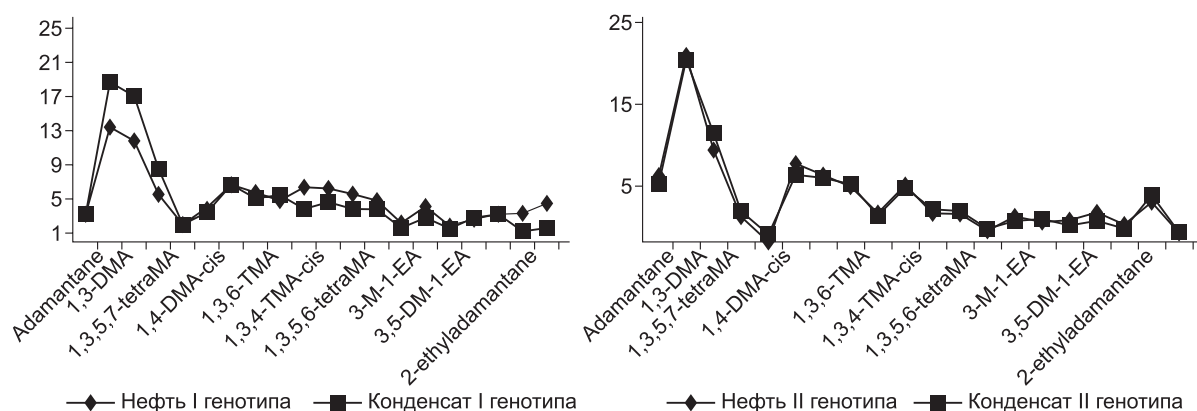


Рис. 3. Распределение адамантановых УВ в нефтях и конденсатах разных генетических типов.

Fig. 3. Distribution of adamantane hydrocarbons in the oils and condensates of different genotypes.

УГЛЕВОДОРОДЫ КАРКАСНОГО СТРОЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПАХ НЕФТЕЙ

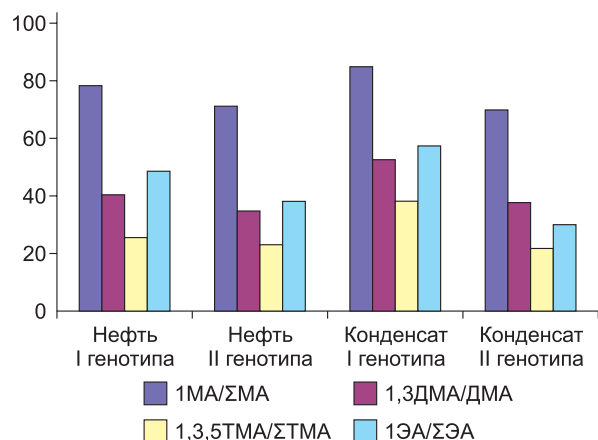


Рис. 4. Относительные концентрации более устойчивых изомеров адамантанов в нафтидах различных генотипов.

Fig. 4. Relative concentrations of more resistant adamantane isomers in naphthides of various genotypes.

Относительные концентрации более устойчивых изомеров метиладамантанов состава $C_{11}-C_{13}$ так же, как и в нафтидах I генотипа, далеки от равновесных и уменьшаются с увеличением молекулярной массы (см. табл. 2, рис. 4).

Вместе с тем были установлены определенные различия в распределении адамантановых УВ в составе нафтидов разного генезиса.

Нафтиды I генотипа отличаются от нафтидов II меньшим содержанием адамантана, его ме-

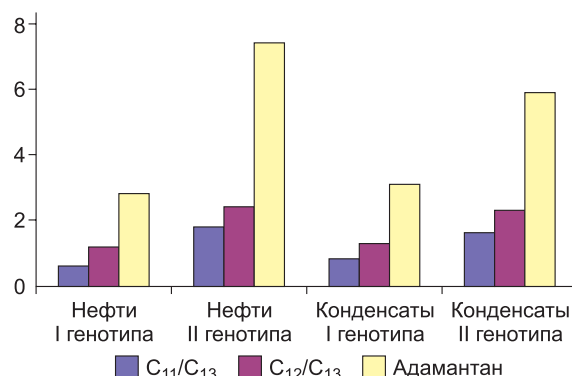


Рис.5. Сравнение распределения адамантановых УВ в различных генотипах нафтидов.

Fig. 5. Comparison of adamantane hydrocarbons distribution in different genotypes of naphthides.

тил- и диметилпроизводных, большим содержанием три- и тетраметиладамантанов, более низкими значениями отношений C_{11}/C_{13} и C_{12}/C_{13} . В них выше этиладамантановый индекс, относительные концентрации более устойчивых изомеров метиладамантанов состава $C_{11}-C_{13}$, хотя они и далеки от равновесных (см. табл. 2, рис. 4, 5).

Полученные данные по составу адамантановых УВ могут служить дополнительными геохимическими критериями при определении гене-

Таблица 3

Информативные геохимические параметры адамантановых углеводородов

Table 3

Informative geochemical parameters of adamantanes hydrocarbons

Параметры Parameters	Нефти Oils		Конденсаты Condensates	
	I генотипа I genotype	II генотипа II genotype	I генотипа I genotype	II генотипа II genotype
C_{11}/C_{13}	0,49–0,72	1,81	0,78	1,57
C_{12}/C_{13}	1,15–1,20	2,44	1,30	2,32
Триметиладамантаны, % Trimethyladamantanes, %	28,6–32,1	16,59	28,2	18,96
ЭАИ=1-ЭА/(2-ЭА+1-ЭА), % EAI=1-EA/(2-EA+1-EA), %	41,06–54,49	37,45	57,03	29,39
Адамантан Adamantane, %	2,5–3,1	7,37	3,1	5,91
Метиладамантаны, % Methyladamantanes, %	15,7–20,5	29,96	22,0	34,04

Примечание: ЭАИ – этиладамантановый индекс, ЭА – этиладамантан.

Note: EAI – ethyladamantanes index, EA – ethyladamantane.

зиса нафтидов. В генетическом плане наиболее информативными показателями могут быть: относительное содержание адамантана, соотношения адамантанов C_{11}/C_{13} и C_{12}/C_{13} , относительные концентрации более устойчивых изомеров, а также значения этиладамантанового индекса (табл. 3).

Выводы

Выполненные исследования каркасных УВ в различных генетических типах нафтидов Западной Якутии показали, что в изученных нефтях и конденсатах присутствуют адамантановые УВ состава от $C_{10}H_{16}$ до $C_{14}H_{24}$.

Показано, что адамантановые УВ внутри каждого генетического типа характеризуются близким составом и распределением.

Вместе с тем были установлены определенные различия их распределения в нафтидах разного генезиса. Нафтиды I генотипа, генерированные планктонно-водорослевым ОВ морских фаций, отличаются от нафтидов II генотипа, генерированных террагенным ОВ континентальных фаций, меньшим содержанием адамантана, его метил- и диметилпроизводных, большим — три- и тетраметиладамантанов, низкими значениями отношений C_{11}/C_{13} и C_{12}/C_{13} и этиладамантанового индекса (ЭАИ).

Полученные данные по составу адамантановых УВ могут служить дополнительными геохимическими критериями при определении генезиса нафтидов.

Литература

1. Багрий Е.И. Адамантаны: Получение, свойства, применение. М.: Наука, 1989. 264 с.
2. Гордадзе Г.Н. Геохимия углеводородов каркасного строения (обзор) // Нефтехимия. 2008. Т. 48, № 4. С. 243–255.
3. Гордадзе Г.Н., Гируц М.В., Кошелев В.Н. Органическая геохимия углеводородов. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. Кн. 1. 392 с.
4. Гордадзе Г.Н., Гируц М.В., Кошелев В.Н. Органическая геохимия углеводородов. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. Кн. 2. 303 с.
5. Петров Ал.А. Химия нафтен. М.: Наука, 1971. 388 с.
6. Петров Ал.А. Углеводороды нефти. М.: Наука, 1984. 263 с.
7. Гируц М.В., Гордадзе Г.Н., Строева А.Р., Стоколос О.А., Богатырев С.О., Кошелев В.Н. Генерация углеводородов алмазоподобного строения из биомассы бактерий // Химия и технология топлив и масел. 2014. № 4. С. 15–20.
8. Гордадзе Г.Н., Бадмаев Ч.М., Эрдниева О.Г., Кошелев В.Н., Гируц М.В. Новый гомологический ряд адамантанов C_{11} – C_{17} в продуктах термокатализа предшественников нефти // Материалы Всероссийской научной конференции «Успехи органической геохимии». 2010. С. 110–111.
9. Гордадзе Г.Н., Керимов В.Ю., Кузнецов Н.Б., Гируц М.В., Серов С.Г., Гайдук А.В. Исследование углеводородов-биомаркеров и углеводородов алмазоподобного строения рифейских, вендских и нижнекембрийских отложений Катангской седловины (южная часть Сибирской платформы) // Материалы международной научно-практической конференции «Новые идеи в геологии нефти и газа». М., 2015. С. 92–96.
10. Каширцев В.А., Нестеров И.И., Меленевский В.Н., Фурсенко Е.А., Казаков М.О., Лавренов А.В. Биомаркеры и адамантаны в нефтях из сеноманских отложений севера Западной Сибири // Геология и геофизика. 2013. Т. 5, № 8. С. 1227–1235.
11. Гируц М.В., Строева А.Р., Гаджиев Г.А., Стоколос О.А., Кошелев В.Н., Гордадзе Г.Н. Адамантаны C_{11} – C_{13} в биodeградируемых и небиodeградируемых конденсатах // Нефтехимия. 2014. Т. 54, № 1. С. 12–16. DOI: 10.7868/S0028242114010043.
12. Багрий Е.И., Маравин Г.Б. Адамантансодержащие сложные эфиры как возможные компоненты термостойких смазочных масел. // Нефтехимия. 2013. Т. 53, № 6. С. 467–472. DOI: 10.7868/S0028242113060026.
13. Peters K.E., Walters C.C., Moldovan J.M. The biomarker guide. New York: Cambridge University Press. 2007. V. 1. 471 p.; V. 2. 684 p.
14. Гируц М.В. Пути генезиса низкомолекулярных адамантанов и диамантанов в нефтях: Автореф. дисс. ... канд. хим. наук. 2006. 25 с.
15. Гируц М.В., Русинова Г.В., Гордадзе Г.Н. Генерация адамантанов и диамантанов в результате термического крекинга высокомолекулярных насыщенных фракций нефтей разного генотипа // Нефтехимия. 2006. Т. 46, № 4. С. 251–261.
16. Гируц М.В., Гордадзе Г.Н. Генерация адамантанов и диамантанов в результате термического крекинга полярных компонентов нефтей разного генотипа // Нефтехимия. 2007. Т. 47, № 1. С. 15–25.
17. Гируц М.В. Алмазоподобные углеводороды в нефтях и моделирование процессов их образования: Дисс. ... д-ра хим. наук. М., 2016. 280 с.
18. Гордадзе Г.Н., Гируц М.В. Синтез углеводородов ряда адамантана и диамантана путем высокотемпературного крекинга высокомолекулярных n-алканов. // Нефтехимия. 2008. Т. 48, № 6. С. 412–417.
19. Бадмаев Ч.М., Гируц М.В., Эрдниева О.Г., Кошелев В.Н., Гордадзе Г.Н. Генерация моноалкиладамантанов C_{11} – C_{17} в результате катализа некоторых кислородсодержащих предшественников нефтяных углеводородов // Нефтехимия. 2011. Т. 51, № 5. С. 337–341.
20. Бадмаев Ч.М. Углеводороды каркасного строения в нефтях Калмыкии: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. М., 2012. 25 с.

21. Багрий Е.И., Амосова Е.И., Санин П.И. Выделение адамантана из некоторых нефтей Балаханского и Сураханского месторождений // Нефтехимия. 1966. Т. 6, № 4. С. 665.
22. Геохимия органического вещества нефтегазовых отложений Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 1984. 113 с.
23. Изосимова А.Н., Чалая О.Н. Реликтовые углеводороды в органическом веществе и нефтях Западной Якутии. Новосибирск: Наука, 1989. 127 с.
24. Геохимия нефтей востока Сибирской платформы. Якутск. ЯНЦ СО РАН, 2009. 180 с.
25. Петров Ал.А., Головкина Л.С., Русинова Г.В. Масс-спектры нефтяных углеводородов. Справочник (атлас) / Под ред. Ал.А. Петрова. М.: Недра, 1986. 313 с.
26. Багрий Е.И., Борисов Ю.А., Колбановский Ю.А., Максимов А.Л. Теоретическое изучение механизма реакции каталитического алкилирования адамантана продуктами крекинга 2,2,4-триметилпентана // Нефтехимия. 2019. Т. 59. № 1. С. 64–68. DOI: 10.1134/S0028242119010064.

Поступила в редакцию 20.11.2020
Принята к публикации 07.09.2021

Об авторах

ЧАЛАЯ Ольга Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, Researcher ID: J-9329-2018, e-mail: oncha@ipng.ysn.ru;

ЛИФШИЦ Сара Хаимовна, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>, Researcher ID: K-1438-2018, e-mail: shlif@ipng.ysn.ru;

КАШИРЦЕВ Владимир Аркадьевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, Researcher ID: N-1655-2014, e-mail: KashircevVA@ipgg.sbras.ru;

ЗУЕВА Ираида Николаевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, Researcher ID: J-9373-2018, e-mail: inzu@ipng.ysn.ru;

ГЛАЗНЕЦОВА Юлия Станиславовна, кандидат химических наук, заведующая лабораторией, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677980, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, Researcher ID: J-9714-2018, e-mail: glyaz1408@mail.ru.

Информация для цитирования

Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Каширцев В.А., Зуева И.Н., Глязнецова Ю.С. Углеводороды каркасного строения в различных генетических типах нефтей и конденсатов Западной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 43–53. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-43-53>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-43-53

Skeleton structure hydrocarbons in different genetic types of oils and condensates in Western Yakutia

O.N. Chalaya^{1,*}, S.Kh. Lifshits¹, V.A. Kashirtsev^{1,2}, I.N. Zueva¹, Yu.S. Glyaznetsova¹

¹Institute Problems of Oil and Gas SB RAS, Yakutsk, Russia

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

*oncha@ipng.ysn.ru

Abstract. This work is devoted to the study of the content, composition and character of the distribution of adamantane hydrocarbons. The objects of investigation were naphthides of different genetic types from

the deposits in Western Yakutia: oils and condensates from the Vendian-Cambrian sediments, which were generated by planktonic algal organic matter of marine facies (I genotype), and the Mesozoic oils and condensates, which were generated by continental terrigenous organic matter (II genotype). The individual hydrocarbon composition of the fractions was determined by chromatography-mass spectrometry on the Agilent 6890 set, which had an interface with the high-effective mass-selective detector Agilent 5973N. The characteristic distribution pattern of adamantane and its methyl derivatives was obtained by scanning for fragmentary m/z ions 135, 136, 149, 163, 177, 188. As a result of the conducted research, the presence of adamantane hydrocarbons of the composition from $C_{10}H_{16}$ to $C_{14}H_{24}$ was established for the studied samples of naphthides. It was shown that adamantane hydrocarbons within each genetic type were characterized by a similar composition and distribution. At the same time, certain differences were detected in the distribution of naphthides of different genesis. The naphthides of I genotype (generated by planktonic algal organic matter of marine facies) differed from the naphthides of II genotype (generated by terrigenous organic matter of continental facies) by lower content of adamantane and its methyl- and dimethylpropionic derivatives, a high content of tri- and tetramethylguanidine, lower values of C_{11}/C_{13} and C_{12}/C_{13} ratios, and the values of ethyladamantane index. The obtained data on the composition of adamantane hydrocarbons can be used as additional geochemical criteria for determination of the genesis of naphthides.

Keywords: adamantane hydrocarbons, adamantane, methyladamantane, gas chromatography-mass spectrometry, naphthide genotypes, oils and condensates.

Acknowledgements. The authors thank all the colleagues who participated in the laboratory and analytical studies. The research was carried out within the framework of the Fundamental Scientific Research Program (Project number AAAA-A21-121011490054-0).

References

1. Bagrij E.I. Adamantany: Poluchenie, svojstva, primeneniye. Moscow: Nauka, 1989. 264 p.
2. Gordadze G.N. Geohimija uglevodorodov karkasnogo stroeniya (obzor) // Neftechimija. 2008. Vol. 48, No. 4. P. 243–255.
3. Gordadze G.N., Giruc M.V., Koshelev V.N. Organicheskaja geochimija uglevodorodov. 2012. Moscow: RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2012. Book 1. 392 p.
4. Gordadze G.N., Giruc M.V., Koshelev V.N. Organicheskaja geochimija uglevodorodov. 2013. Moscow: RGU nefiti i gaza im. I.M. Gubkina, 2012. Book 2. 303 p.
5. Petrov A.I.A. Himija naftenov. Moscow: Nauka, 1971. 388 p.
6. Petrov A.I.A. Uglevodorody nefiti. Moscow: Nauka, 1984. 263 p.
7. Giruc M.V., Gordadze G.N., Stroeva A.R., Stokolos O.A., Bogatyrev S.O., Koshelev V.N. Generacija uglevodorodov almazopodobnogo stroeniya iz biomassy bakterij // Chimija i tehnologija topliv i masel. 2014. No. 4. P. 15–20.
8. Gordadze G.N., Badmaev Ch.M., Jerdnieva O.G., Koshelev V.N., Giruc M.V. Novyj gomologicheskij rjad adamantanov C_{11} – C_{17} v produktah termokataliza predshestvennikov nefiti // Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Uspehi organicheskoy geochimii». 2010. P. 110–111.
9. Gordadze G.N., Kerimov V.Ju., Kuznecov N.B., Giruc M.V., Serov S.G., Gajduk A.V. Issledovanie uglevodorodov-biomarkerov i uglevodorodov almazopodobnogo stroeniya rifejskih, vendskih i nizhnemembrijskih otlozhenij Katangskoj sedloviny (juzhnaja chast' Sibirskoj platformy) // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Novye idei v geologii nefiti i gaza». Moscow. 2015. P. 92–96.
10. Kashircev V.A., Nesterov I.I., Melenevskij V.N., Fursenko E.A., Kazakov M.O., Lavrenov A.V. Biomarkery i adamantany v neftyah iz senomanskikh otlozhenij severa Zapadnoj Sibiri // Geologija i geofizika. 2013. Vol. 5, No. 8. P. 1227–1235.
11. Giruc M.V., Stroeva A.R., Gadzhiev G.A., Stokolos O.A., Koshelev V.N., Gordadze G.N. Adamantany C_{11} – C_{13} v biodegradirovannyh i nebiodegradirovannyh kondensatah // Neftechimija. 2014. Vol. 54, No. 1. P. 12–16. DOI: 10.7868/S0028242114010043.
12. Bagrij E.I., Maravin G.B. Adamantansoderzhashhie slozhnye jefiry kak vozmozhnye komponenty termostojkikh smazochnyh masel // Neftechimija. 2013. Vol. 53, No. 6. P. 467–472. DOI: 10.7868/S0028242113060026.
13. Peters K.E., Walters C.C., Moldovan J.M. The biomarker guide. New York: Cambridge University Press. 2007. V. 1. 471 p.; V. 2. 684 p.
14. Giruc M.V. Puti genezisa nizkomolekuljarnyh adamantanov i diamantanov v neftyah: Avtoref. diss. ... kand. chim. nauk. Moscow, 2006. 25 p.
15. Giruc M.V., Rusinova G.V., Gordadze G.N. Generacija adamantanov i diamantanov v rezul'tate termicheskogo krekinga vysokomolekuljarnyh nasyshtennyh frakcij neftej raznogo genotipa // Neftechimija. 2006. Vol. 46, No. 4. P. 251–261.
16. Giruc M.V., Gordadze G.N. Generacija adamantanov i diamantanov v rezul'tate termicheskogo krekinga poljarnyh komponentov neftej raznogo genotipa // Neftechimija. 2007. Vol. 47, No. 1. P. 15–25.
17. Giruc M.V. Almazopodobnye uglevodorody v neftyah i modelirovanie processov ih obrazovaniya: Diss. ... d-ra chim. nauk. Moscow, 2016. 280 p.

18. Gordadze G.N., Giruc M.V. Sintez uglevodorodov rjada adamantana i diamantana putem vysokotemperaturnogo krekinga vysokomolekuljarnyh n-alkanov // Neftechimija. 2008. V.48. No. 6. P. 412–417.
19. Badmaev Ch.M., Giruc M.V., Jerdineva O.G., Koshelev V.N., Gordadze G.N. Generacija monoalkiladamtanov C₁₁–C₁₇ v rezul'tate kataliza nekotoryh kislorodsoderzhashhih predshestvennikov neftjanyh uglevodorodov // Neftechimija. 2011. Vol. 51, No. 5. P. 337–341.
20. Badmaev Ch.M. Uglevodorody karkasnogo stroenija v neftjah Kalmykii: Avtoref. dis. ... cand. chim. nauk. Moscow, 2012. 25 p.
21. Bagrij E.I., Amosova E.I., Sanin P.I. Vydelenie adamantana iz nekotoryh neftej Balahanskogo i Surahanskogo mestorozhdenij // Neftechimija. 1966. Vol. 6, No. 4. 665 p.
22. Geochimija organicheskogo veshhestva neftegazonosnyh otlozhenij Zapadnoj Jakutii. Novosibirsk: Nauka, 1984. 113 p.
23. Izosimova A.N., Chalaja O.N. Reliktovye uglevodorody v organicheskom veshhestve i neftjah Zapadnoj Jakutii. Novosibirsk: Nauka, 1989. 127 p.
24. Geochimija neftei vostoka Siberskoj platformy. Yakutsk: YNC SO RAN. 2009. 180 p.
25. Petrov A.I., Golovkina L.S., Rusinova G.V. Mass-spektry neftjanyh uglevodorodov. Spravochnik (atlas). Pod red. A.I.A. Petrova. Moscow: Nedra, 1986. 313 p.
26. Bagrij E.I., Borisov Ju.A., Kolbanovskij Ju.A., Maksimov A.L. Teoreticheskoe izuchenie mehanizma reakcii kataliticheskogo alkilirovanija adamantana produktami krekinga 2,2,4-trimetilpentana // Neftechimija. 2019. Vol. 59, No. 1. P. 64–68. DOI: 10.1134/S0028242119010064.

About the authors

CHALAYA, Olga Nikolaevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-9662-2028>, Researcher ID: J-9329-2018, e-mail: oncha@ipng.ysn.ru;

LIFSHITS, Sara Khaimovna, Cand. Sci. (Chemistry), leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677980, Russia, Researcher ID: K-1438-2018, <https://orcid.org/0000-0001-5881-2720>, e-mail: shlif@ipng.ysn.ru;

KASHIRCEV, Vladimir Arkadievich, corresponding member of RAS, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), chief researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677980, Russia; Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3 Akademika Koptyuga ave, Novosibirsk 630090, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3873-1901>, Researcher ID: N-1655-2014, e-mail: KashircevVA@ipgg.sbras.ru;

ZUEVA, Iraida Nikolaevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-7576-8282>, Researcher ID: J-9373-2018, e-mail: inzu@ipng.ysn.ru;

GLYAZETSOVA, Yulia Stanislavovna, Cand. Sci. (Chemistry), head of the laboratory, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677980, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-9195-5296>, Researcher ID: J-9714-2018, e-mail: glyaz1408@mail.ru.

Citation

Chalaya O.N., Lifshits S.Kh., Kashirtsev V.A., Zueva I.N., Glyaznetsova Yu.S. Skeleton structure hydrocarbons in different genetic types of oils and condensates in Western Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 43–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-43-53>

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 622.371.1/7:504.3.054 (571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66

Реализация экологических инициатив АК «АЛРОСА» (ПАО) по достижению углеродной нейтральности

А.Ю. Масанов^{1,*}, П.С. Анисимова², А.В. Толстов³, А.Х. Шеремет¹,
М.А. Дубовичев¹, Н.С. Зимов⁴

¹Центр инноваций и технологий АК «АЛРОСА» (ПАО), Москва, Россия

²Экологический центр АК «АЛРОСА» (ПАО), Москва, Россия

³НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, Россия

⁴Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

*MasanovAYu@alrosa.ru

Аннотация. В связи с глобальными изменениями климата перед крупными промышленными компаниями встают задачи по снижению выбросов парниковых газов и реализации климатических проектов, способствующих поглощению и захоронению углекислого газа (CCS). Подробно рассмотрены разработки группы компаний «АЛРОСА» при реализации задач по достижению углеродной нейтральности, ESG-проектов, механизмов управления климатическими рисками и проектов, снижающих выбросы парниковых газов, в 2016–2020 гг. Рассмотрено участие компании в реализации масштабного проекта по созданию высокопродуктивной экосистемы в Арктике "Плейстоценовый парк", а также начало разработок уникального в мировых масштабах CCS-проекта по поглощению кимберлитовой рудой углекислого газа из атмосферного воздуха при ее добыче и переработке.

Ключевые слова: АЛРОСА, углекислота, «Плейстоценовый парк», кимберлиты, углеродная нейтральность, CCS.

Введение

Климатическая повестка в среднесрочной и, особенно, в долгосрочной перспективе стала заметным фактором, оказывающим воздействие на деятельность как государств, так и крупных компаний в любых отраслях и секторах. Сложившееся понимание причин изменения климата ведет к трансформации условий ведения бизнеса и деятельности компаний, отраслевых объединений, государств и международных организаций.

Проблема климатических изменений становится вызовом, ставящим перед мировым сообществом задачи по усилению ограничений по выбросам и принятию действий, направленных на реализацию климатических проектов, способствующих поглощению и захоронению углекислого газа [1].

Другим важным направлением работы, особенно важным для арктических и субарктических регионов, таких как Республика Саха (Якутия), является предотвращение цепных изменений, вызванных глобальным потеплением. К таковым, в первую очередь, относится противодействие (или замедление) таянию «вечной» мерзлоты, что также может привести к ускорению климатических изменений за счет высвобождения из мерзлоты углекислого газа и метана [2].

Драйвером развития выступает усиление международной повестки [3]. Россия участвует в основных международных соглашениях по климату, являясь стороной в Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Киотского протокола к ней, а также Парижского соглашения. «АЛРОСА» приступила к разработке экологиче-

ской и климатической стратегий до 2030 года с горизонтом до 2050 года. Стратегическим консультантом по проекту стала международная консалтинговая компания McKinsey & Company.

Так или иначе, мировое сообщество диктует новые стандарты устойчивого развития, важным элементом которых является глобальный переход от углеродного следа к низкоуглеродному. Регуляторы, формирующие стратегические программы развития экономики, начинают пересматривать свои приоритеты и подают стимулирующие сигналы к развитию «зеленой» экономики.

На национальном уровне в России разрабатываются стратегические документы в области противодействия и адаптации к климатическим изменениям, действуют меры, направленные на сокращение выбросов парниковых газов. Принят федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» (вступит в силу с 30.12.2021) [5], который является первым шагом в создании российского законодательства, позволяющего осуществить углеродное регулирование. Закон дает право юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям реализовывать климатические проекты, направленные на сокращение выбросов парниковых газов или увеличение их поглощения. Предполагается, что в дальнейшем будут установлены критерии отнесения проектов к климатическим и определен порядок верификации их результатов (на уровне ведомственных актов). Ожидается, что появление данного механизма позволит российским организациям снижать углеродный след производимой продукции. Кроме того, закон вводит количественные показатели – углеродные единицы, которые будут регистрироваться в специальном реестре, а их обращение фиксироваться [6].

Россия заявила о планах до 2030 г. обеспечить сокращение объема выбросов парниковых газов на 70 % относительно уровня 1990 г. с учетом максимально возможной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития – в целях реализации Парижского соглашения [7]. Кроме того, Главой государства поставлены цели обеспечения углеродной нейтральности не позднее 2060 г. Эти цели закреплены в разработанной Минэкономики РФ Стратегии низкоуглеродного развития РФ до 2050 г. [8], которая выбирает приоритетом интенсивный сценарий, предполагающий снижение

выбросов парниковых газов на 79 % к 2050 г. и связывает низкоуглеродную трансформацию с экономическим ростом.

Достижение поставленных общих целей может быть обеспечено за счет общей вовлеченности производственных компаний топливно-энергетического, обрабатывающего, машиностроительного, транспортного, химического, металлургического, горнодобывающего и др. комплексов, производственных кластеров и объединений, предприятий нефтяной, газовой и угольной промышленности, атомной энергетики и других секторов экономики, включая лесопромышленный комплекс, растениеводство и животноводство. Вклад, прежде всего, крупных предприятий перечисленных секторов экономики России будет залогом успеха в достижении поставленных целей.

Вклад «АЛРОСА» в достижение целей углеродной нейтральности

Группа компаний «АЛРОСА» — крупнейшая алмазодобывающая компания мира, на долю которой приходится порядка 28 % мирового производства алмазов. В среднем каждый четвертый камень на мировом рынке добыт в России. «АЛРОСА» является мировым лидером не только по объему производства алмазов, но и по минерально-сырьевой ресурсной базе, располагая учтенными запасами в недрах в размере более 1 млрд карат.

Бизнес компании сфокусирован на разведке, добыче и продаже алмазов. География Группы «АЛРОСА» охватывает 10 регионов России и 9 стран мира. Однако основные мощности Группы расположены в России — в Республике Саха (Якутия) и Архангельской области, т. е. районах Крайнего Севера – Арктики и Субарктики.

Производственные мощности «АЛРОСА» включают 8 карьеров, 3 рудника и 8 россыпных месторождений в России. Добыча ведется преимущественно в условиях многолетней мерзлоты и сложного резко-континентального климата, где столбик термометра показывает ниже нуля не менее 7 месяцев в году, и именно здесь изменение климата, вызванное глобальным потеплением, видится наиболее наглядно.

Цели, задачи и показатели результативности поставлены в Программе в области устойчивого развития на 2021–2025 гг. для Группы «АЛРОСА» [9], включая АК «АЛРОСА» (ПАО) и ее дочерние и зависимые организации (ДЗО) алмазно-брилли-

антового комплекса (АБК), ведущие деятельность на территории Российской Федерации, а именно: АК «АЛРОСА» (ПАО); АО «Алмазы Анабара»; ПАО «Севералмаз»; АО «ПО «Кристалл»; ООО «Бриллианты АЛРОСА» и др.

Сохранение и защита здоровой и благоприятной для жизни природной среды является неотъемлемым условием деятельности Компании. «АЛРОСА» стремится постоянно совершенствовать систему управления, внедрять современные передовые технологии и повышать экологическую осведомленность заинтересованных сторон в целях минимизации рисков негативного воздействия своей деятельности на окружающую среду.

«АЛРОСА» уделяет пристальное внимание вопросам экологии, социальной ответственности и корпоративного управления (Environmental, Social, and Corporate Governance, ESG) и соответствует самым высоким стандартам корпоративной социальной ответственности (Corporate social responsibility, CSR). Компания ежегодно реализует более 500 социальных проектов и природоохранных инициатив, направляя на них около 8 % выручки ежегодно в рамках своей глобальной программы «Алмазы помогают» (Diamonds that Care). В 2020 г. социальные и экологические инвестиции «АЛРОСА» превысили \$216 млн (около 16 млрд рублей), что сопоставимо с вложениями в техническое перевооружение, добывающие мощности и инфраструктуру на уровне 20–25 млрд рублей в год.

В «АЛРОСА» разработана и внедрена методика по количественному определению объема выбросов парниковых газов, в эквиваленте CO₂, от производственных площадок. Прослеживается устойчивая тенденция по снижению объемов выбросов, что соответствует плану мероприятий по обеспечению к 2020 г. сокращения объемов выбросов парниковых газов до уровня не более 75 % от объема выбросов в базовом 1990 г.

Охрана окружающей среды и меры по замедлению изменения климата являются неотъемлемой частью ESG-обязательств, взятых компанией. «АЛРОСА» ответственно подходит к решению глобальной проблемы изменения климата и прилагает значительные усилия по внедрению энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий добычи и производства, позволяющих сократить углеродный след. В соответствии с Программой в области устойчивого развития на 2021–2025 гг. компания приняла на себя обяза-

тельства по последовательному сокращению выбросов парниковых газов и внедрению механизмов управления климатическими рисками в течение ближайших пяти лет. Достижение этой цели предусматривает реализацию целого ряда проектов и внедрения современных технико-технологических решений. В этой связи проект по переводу автомобильного транспорта с бензинового и дизельного топлива на природный газ является одним из наиболее значимых.

Проект по переводу части автомобильного транспорта на сжатый природный газ (КПГ) – наиболее экономичное, экологичное и безопасное топливо – запущен в 2015 г. На сегодня на КПГ переведено более 300 единиц автомобильной техники в г. Мирный и пос. Айхал. К 2024 г. компания планирует расширить проект на другие активы и перевести на природный газ дополнительно 166 единиц транспорта в Удачном и Ленске. Таким образом, доля автотранспорта, работающего на газе, будет доведена до 37 % от общего размера автопарка.

Реализация данного проекта позволила «АЛРОСА» не только сократить расходы на топливо (примерно в 2,6 раза на 1 км пробега в газовом режиме), но и снизить выбросы парниковых газов в CO₂-эквиваленте по сравнению с выбросами транспорта, работающего на бензине и дизеле, – на 13 % на 1 км пробега в среднем по парку транспорта, использующего более экологичное газомоторное топливо. Инвестиции Компании на реализацию проекта до 2024 г., по оценкам Компании, превысят 650 млн рублей, из которых более 450 млн рублей было направлено за период с 2015 по 2020 г. на создание необходимой инфраструктуры, приобретение оборудования и переоборудование автотранспорта.

Расширение применения энергоэффективных видов топлива корпоративным транспортным парком является одним из приоритетных направлений деятельности «АЛРОСА» в области повышения экологичности производства и снижения антропогенной нагрузки на климат.

В настоящее время идет разработка Экологической и климатической стратегии группы «АЛРОСА», ее разработка осуществляется с учетом планируемого законодательного регулирования выбросов парниковых газов, направленного на стимулирование участников рынка к развитию климатических проектов. Утверждение стратегии ожидается в середине 2022 г., она будет содержать задачи и целевые показатели ре-

зультативности по существенным аспектам воздействия на окружающую среду, методику реагирования на изменение климата, создание механизмов оценки и управления климатическими рисками.

Основной задачей, возложенной на компанию регуляторами, является обеспечение к 2025 г. удельного показателя выбросов парниковых газов на уровне не выше 0,03 т CO₂-эквивалента на 1 карат произведенной продукции ежегодно. При этом внутренние стандарты, которыми руководствуется группа компаний «АЛРОСА», оказываются выше и жестче, чем требования, возлагаемые регуляторами. Удельные выбросы парниковых газов (score 1 + score 2) уже в 2020 году не превысили 0,022 т на карат производимой продукции [10].

Кроме того, если сравнивать этот показатель с другими мировыми алмазодобывающими компаниями (см. таблицу), то «АЛРОСА» в обозримой перспективе, когда этот показатель стал объектом мониторинга, ни разу не был превышен, в то время как другие мировые лидеры алмазодобычи превышают этот показатель в несколько раз. И это касается только мер, направленных на снижение выбросов парниковых газов, подробно рассматриваемых в настоящей статье, хотя стоит упомянуть и о других мерах, осуществляемых Экологическим центром «АЛРОСА», которые также положительно влияют на окружающую природную среду.

К ним относятся работа по сокращению к 2025 г. удельного объема воды, забираемой из поверхностных природных источников, удельного объема сточной очищенной воды, сбрасываемой в поверхностные природные источники, увеличение удельной массы утилизированных и обезвреженных производственных отходов, уменьшение годового объема отработанных земель, выполнение работ по лесовосстановлению на площади, равной площади вырубленных лесных насаждений. Обеспечение объема финансирования проектов по сохранению и восполнению биологического разнообразия предусматривается на уровне не менее 20 млн рублей ежегодно.

Полученные результаты и начатая АК «АЛРОСА» (ПАО) работа по поставленным задачам являются залогом значительного вклада компании в достижение общих задач, поставленных новыми вызовами и угрозами в части изменения климата, поэтому уже в настоящее

Таблица 1

**Удельные выбросы парниковых газов
в CO₂-экв., т/карат¹**

Table 1

**Specific greenhouse gas emissions
in CO₂-eq., T / carat¹**

Компания Company	2016	2017	2018	2019	2020
ALROSA	0,029	0,027	0,027	0,015	0,022
De Beers	0,070	0,050	0,050	0,060	н/д
Petra Diamonds	0,160	0,150	0,140	0,120	н/д
Lucara Diamond	0,090	0,150	0,110	0,060	н/д
Gem Diamonds	1,040	1,290	1,270	н/д	н/д

¹ Данные из годовых отчетов компаний.

¹ Data from annual reports of the companies.

время «АЛРОСА» занимает ведущие позиции в ESG-рейтингах в 2020 г. (рис. 1 [11]).

«Плейстоценовый парк»

В сентябре 2021 г. «АЛРОСА» стала официальным партнером «Плейстоценового парка» [12] – масштабного экологического проекта по созданию высокопродуктивной пастбищной экосистемы в Арктике, подобной экосистеме Мамонтовых степей, доминировавшей на севере Евразии в позднем плейстоцене. Согласно гипотезе отечественного ученого С.А. Зимова, которую он последовательно защищает с 1989 г. [13], пастбища с разнообразным животным миром, аналогичные тем, которые были распространены по всему Северному полушарию и Арктике более 15 тыс. лет назад, препятствуют таянию многолетней мерзлоты и через ряд экологических механизмов оказывают охлаждающий эффект на климат.

Территория России это ~60 % многолетней мерзлоты, которая имеет наибольшее распространение в Восточной Сибири и Забайкалье. Останки животных и растительности в мерзлых отложениях являются крупнейшим резервуаром органического углерода – потенциально опасного источника парниковых газов. По оценкам экспертов, в мерзлоте запасено более 1,6 трлн т углерода. В случае если мерзлота растает, углерод преобразуется в углекислый газ и метан, значительно усиливая парниковый эффект, что станет глобальной проблемой для всей планеты.

«Плейстоценовый парк», основанный в 1996 г., расположен в Нижнеколымском районе Якутии, в 30 км от пос. Черский, занимает территорию в

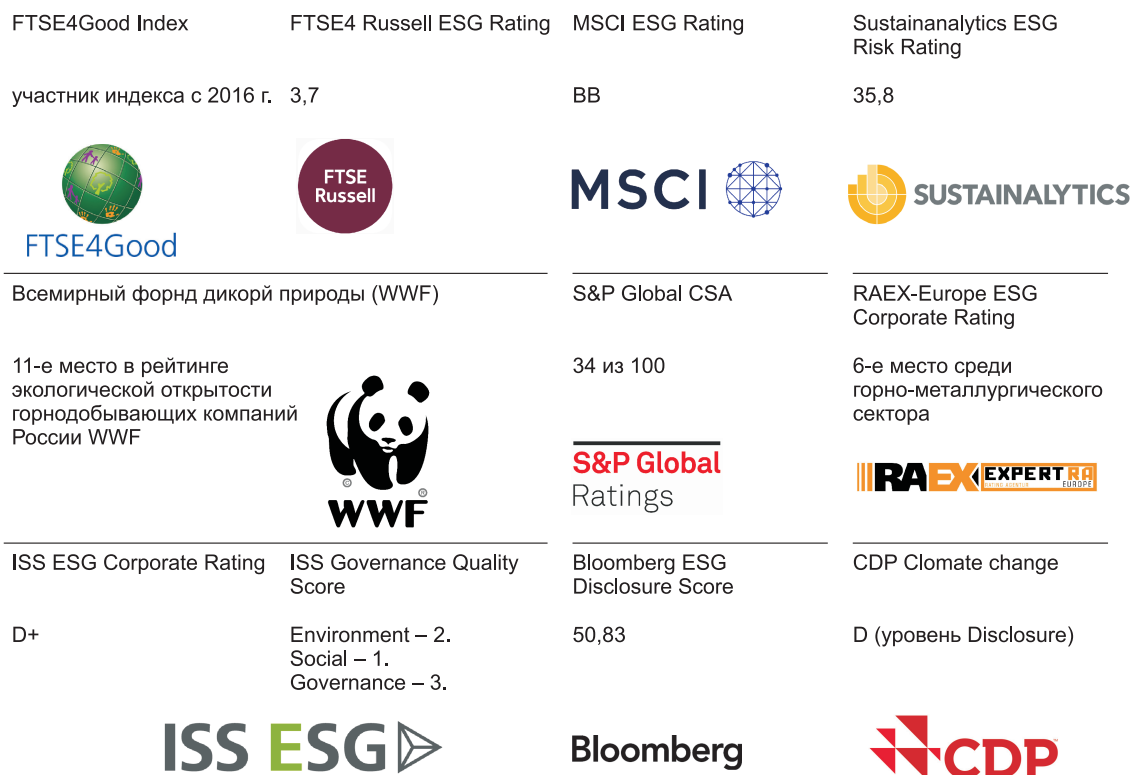


Рис. 1. Положение «АЛРОСА» в мировых ESG-рейтингах.

Fig. 1. ALROSA's position in the global ESG Ratings.

14,4 тыс. га. Это масштабный эксперимент по воссозданию экосистемы, доминировавшей в Арктике в позднем плейстоцене с высокопродуктивными пастбищами, высокой плотностью животных и высокой скоростью биокруговорота.

Создателями проекта и независимыми учеными заявляются следующие экологические механизмы [14–20]:

- зимой животные через выпас нарушают теплоизолирующий снежный покров, что позволяет сильнее промораживать почвы и мерзлоту;

- пастбищные экосистемы оказывают прямой охлаждающий эффект на климат через эффект альбедо – более светлые летние, и особенно зимние, пастбища отражают большую часть солнечной энергии, тем самым напрямую понижая температуру воздуха;

- богатая экосистема с множеством трав и злаков формирует очень большую и мощную экосистему. В отличие от мхов и лишайников травы формируют глубокую корневую систему, которая создается из углекислого газа атмосферы. Установление высокопродуктивных травяных сообществ на больших территориях может быть устойчивым механизмом поглощения пар-

никовых газов из атмосферы. В Арктике почвы имеют гораздо более высокий потенциал накопления органики по сравнению с наземной биомассой (например, в стволах деревьев), а кроме того, углерод в почве не подвергается лесным пожарам;

- пастбищные экосистемы хорошо испаряют поверхностную влагу, что приводит к постепенному уменьшению площади заболоченных участков и, соответственно, эмиссии метана.

Проект получил научное обоснование в публикациях в ведущих международных изданиях включая журнал Science [15], других [16–19], в том числе совместно с Оксфордским университетом [19]. Полученные более чем за 20 лет результаты позволяют говорить о комплексном положительном эффекте от восстановления в зоне многолетней мерзлоты. По экспертным оценкам, если таяние мерзлоты продолжится существующими темпами, то объем выбросов углекислого газа и метана из растаявшей древней почвы с «ожившими» в ней бактериями приведет к многократному усилению потепления климата и делает бессмысленным и неисполнимым Парижское соглашение.

В рамках реализации проекта «Плейстоценовый парк» за последние 12 лет были успешно интродуцированы следующие виды животных: американские бизоны, яки, якутские лошади, верблюды, северные олени и другие. В настоящий момент проводятся работы по адаптации животных к условиям Крайнего севера и через эффект зоомелиорации происходит постепенное улучшение продуктивности пастбищ, достигающееся как через увеличение плодородия трав и злаков, так и за счет изменения видового состава растительности на территории «Плейстоценового парка».

Наработанная за долгие годы практика сможет позволить масштабировать эксперимент на просторах, ограниченных только географическими границами регионов. Кроме того, парк является партнером международного эксперимента по генетическому «возрождению» мамонта. Помощь этому масштабному эксперименту, особенно сейчас, является крайне полезным действием для достижения целей общемирового уровня.

Кроме того, Экологический центр «АЛРОСА» реализует собственный схожий проект по разведению животных в регионе под названием «Живые алмазы» [21].

Поглощение CO_2 из воздуха за счет карбонизации кимберлита

В текущем году «АЛРОСА» завершила первую серию научных исследований поглощения кимберлитом углекислого газа из атмосферы [22]. Предварительные оценки результатов проведенных экспериментов подтверждают гипотезу о способности поглощения кимберлитовой рудой значительных объемов CO_2 . Способность ультраосновных пород поглощать углекислый газ из воздуха давно известна и упоминается в научной литературе. Однако это явление не имело практического интереса и изучалось только в геологическом аспекте с целью геохимических поисков алмазных месторождений по продуктам разложения кимберлитов в условиях воздействия атмосферного воздуха и воды [23]. Интерес к этому явлению вновь возник в связи с новой климатической повесткой, которую диктует запрос мирового сообщества.

В природе все системы стремятся к равновесию, поэтому всегда что-то основное (или то, что дает щелочную среду) взаимодействует с чем-то кислотным; в атмосферном воздухе это главным образом CO_2 . Кимберлит также являет-

ся типичной ультраосновной породой с переменным составом [24]. Петрогеохимические характеристики кимберлитов обуславливают специфику состава [25], при котором среди минералов, составляющих основы кимберлитовых пород, наибольшую реакционную способность для взаимодействия с углекислым газом воздуха имеют такие породообразующие минералы, как оливин, флогопит и клинопироксен [26]. Петрохимия кимберлитов, так или иначе, связана с их алмазонасностью, что является основой для принятия решения об отработке месторождения, однако на это счет имеются различные воззрения [27].

В 2021 г. Центр инноваций и технологий совместно с Научно-исследовательским геологическим предприятием (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО) и экспертами Института общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН провели химические исследования гипотезы о возможности поглощения кимберлитовой рудой углекислого газа из воздуха при ее переработке.

Объектами исследований были образцы керна исходной руды с глубоких горизонтов трубки Удачная и продуктов ее переработки, прошедших полный технологический цикл обогащения и извлечения алмазов на фабрике Удачинского ГОКа и помещенных в резервуары хвостохранилища на хранение. Химический состав проб, которые находились в хвостохранилище от 1 месяца до 10 лет, сравнивался с химическим составом исходной руды из керна скважин. Отобранные образцы исследовались с помощью ИК-спектроскопии, CHN-элементного анализа, а также рентгенодифракционной спектроскопии. В итоге были установлены следы химического преобразования исходной руды под воздействием воды и углекислого газа из атмосферы за несколько лет.

Результаты изучения полученных проб подтвердили предположение – в образцах отработанной породы из хвостохранилища были обнаружены продукты реакции карбонизации минералов, составляющих кимберлит. Такие реакции могли происходить только путем поглощения из воздуха на этапе обогащения и пребывания в хвостохранилище некоторое время. В случае ультраосновной руды – кимберлита трубки Удачная – расчетное поглощение достигает 80 кг на 1 т исходной руды за счет преобразования исходных минералов (оливина, флогопита и клинопироксена) и накопления карбонатов и гидрокарбонатов в форме кальцита и доломита.

Следует отметить, что АЛРОСА – не первая алмазодобывающая компания, которая заинтересовалась этим эффектом. В 2016–2018 гг. Anglo American и De Beers проводили подобные исследования потенциала компенсации выбросов парниковых газов за счет карбонизации переработанного кимберлита и получили схожие результаты [28]. В настоящее время подобные работы на Западе продолжает исследовательская группа CarbMinLab из Колумбийского университета [29]. Объектами исследований De Beers были алмазные рудники в ЮАР и Канаде. Их результаты показали сильную зависимость способности поглощения углекислого газа из воздуха при переработке руды от ряда факторов: первый, и самый главный, из них – химический состав исходного кимберлита. Потенциал поглощения просто ошеломляющий: если пропускать углекислый газ через водную взвесь кимберлита, то его совокупное поглощение может достигать 342 кг на 1 т для так называемого черного кимберлита (из-за наличия в составе свежего неизмененного оливина) [30].

Кимберлиты различных трубок по своему химическому составу достаточно вариативны, минеральный состав их может сильно различаться [23–27]. Ведущую роль в интенсивности процесса карбонизации играет количество кремнезема в кимберлите: чем больше в исходной породе кварца, тем более низкую основность она имеет и тем менее она сможет вступать в реакцию с углекислым газом [31]. И наоборот, чем больше в исходном кимберлите ультраосновных минералов – оливина, флогопита, пироксена и др., тем способность поглощения выше. Содержание последних в свою очередь обусловлено тем, насколько кимберлит, слагающий трубку, сохранил свой исходный химический состав за последние 300–350 млн лет с момента образования в среднем палеозое, когда она представляла собой подземную часть вулкана, возникшего на одном из протоконтинентов. За это долгое время от вулкана ни осталось и следа, а то, что осталось от протоконтинентов, стало частью современных материков. Алмазы, которые выносила лава этих вулканов, добываются сейчас главным образом в Африке, Канаде и Якутии.

Там, где кимберлитовая трубка подвергалась сильному воздействию грунтовых вод и CO_2 , который эти воды несли с поверхности, руда подвергалась сильным преобразованиям (Африка), и сегодня их потенциал поглощения невелик, в

то время как другие кимберлитовые трубки пребывали в течение длительного времени в сравнительно инертных условиях (Крайний Север) и максимально сохранили оливин и флогопит. Примером первых могут быть кимберлиты Архангельской алмазодобывающей провинции (крупнейшие в Европе коренные месторождения алмазов, которое также разрабатывает «АЛРОСА») – они представляют собой большей частью сапонитовую глину – конечную форму химического преобразования кимберлитовой руды, поэтому в них большого потенциала поглощения CO_2 ожидать не стоит. Примером вторых являются кимберлиты Якутии, – изученной нами трубки Удачная и, особенно, Верхнемунского месторождения. Полученные нами результаты для якутских кимберлитов, мало подверженных химическим преобразованиям в течение миллионов лет с момента своего образования, превзошли самые смелые ожидания.

Если сравнивать климатический проект «АЛРОСА» с другими проектами CCS (Carbon capture & Storage), заявленными и реализуемыми в мире, то у первого есть ключевое преимущество, которое выгодно отличает его от последних, и связано оно с тем, что поглощение происходит самопроизвольно и уже экономически оправдано добычей алмазов, в отличие от проектов CCS, так или иначе связанных с форсированным внедрением CO_2 из воздуха в ультраосновные породы посредством растворения в воде и закачкой в недра базальтовых пустот на глубины от 500 м [32]. Это требует значительных энергетических затрат. Самый успешный на сегодня проект Orca Carbmix, реализованный в Исландии швейцарской компанией Climeworks, даже при синергии с одной из крупнейших в мире геотермальной электростанцией Хедлисейли, требует больших операционных затрат. По признанию авторов проекта [33], стоимость утилизации CO_2 сейчас превышает 600 US\$/т, а целевой конкурентной стоимостью, к которой обращены стремления разработчиков, является 100–150 US\$ за 1 т CO_2 .

Способность кимберлитовой руды самопроизвольно поглощать углекислый газ из воздуха является естественным надежным природным способом захватывать, поглощать CO_2 и утилизировать его в виде конечных продуктов – карбонатов кальция и магния как основы осадочных пород на Земле. Причем, этот способ гораздо надежнее чем, например, поглощение CO_2 де-

ревьями, поскольку деревья накапливают углерод активно только на первых стадиях своего роста, а кроме того, случается, что деревья горят во время частых летних пожаров, с соответствующими обратным эффектом и выбросами в атмосферу CO_2 , а карбонат утилизирует его навечно.

Исходя из факторов, увеличивающих потенциал поглощения углекислого газа при переработке кимберлита по сравнению с ведущими западными алмазодобывающими компаниями, можно предположить, что во-первых, в обогатительных фабриках «АЛРОСА» предварительная подготовка добытой руды происходит в больших барабанных мельницах в присутствии большого количества воды, а вода при этом играет роль транспорта CO_2 , растворимость которого в воде гораздо больше, чем его содержание в воздухе. Во-вторых, растворимость CO_2 , как, впрочем, и других газов, в воде тем больше, чем вода холоднее, а поэтому якутский климат, отличающийся своей суровостью, идет на помощь процессу.

Для подтверждения полученных результатов начатые «АЛРОСА» исследования продолжены на действующих предприятиях Архангельской области и Якутии (Ломоносовский ГОК, Айхальский и Удачный ГОКи, включая Верхнемунское месторождение, Нюрбинский и Мирнинский ГОКи) до конца 2023 года с участием ведущих научных центров геологии и геохимии. Если на других месторождениях, разрабатываемых

Компанией, будут получены схожие результаты, то можно будет уверенно сделать вывод, что поглощение углекислого газа при разработке этих месторождений, по предварительной оценке, в 2–3 раза превышает эмиссию парниковых газов (в эквиваленте CO_2), продуцируемых АК «АЛРОСА» при добыче, обогащении и последующей работе вплоть до конечной продукции – бриллиантов, поставляемых на мировой рынок. Потенциал компенсации выбросов был изучен в [22]. Полученное значение поглощения углекислого газа в течение 10 лет жизненного цикла отходов обогащения кимберлитовой руды трубки Удачная, разрабатываемой Удачным ГОКом, позволяет в первом приближении дать оценку потенциала компенсации выбросов парниковых газов предприятиями группы компаний АК «АЛРОСА» за счет поглощения углекислого газа кимберлитовыми породами. Согласно данным Отчета об устойчивом развитии за 2020 г. [9] и показателям ESG группы «АЛРОСА» [10], количество руды, переработанной в 2017, 2018, 2019 и 2020 гг. составляет 39132, 40488, 41252 и 29686 тыс. т соответственно.

Если допустить, что поглощение углекислого газа на других рудниках, разрабатываемых предприятиями группы, имеет близкие значения (8,2 мас. %), и сравнить его с данными по эмиссии эквивалента углекислого газа, опубликованными в том же отчете, то можно вычислить

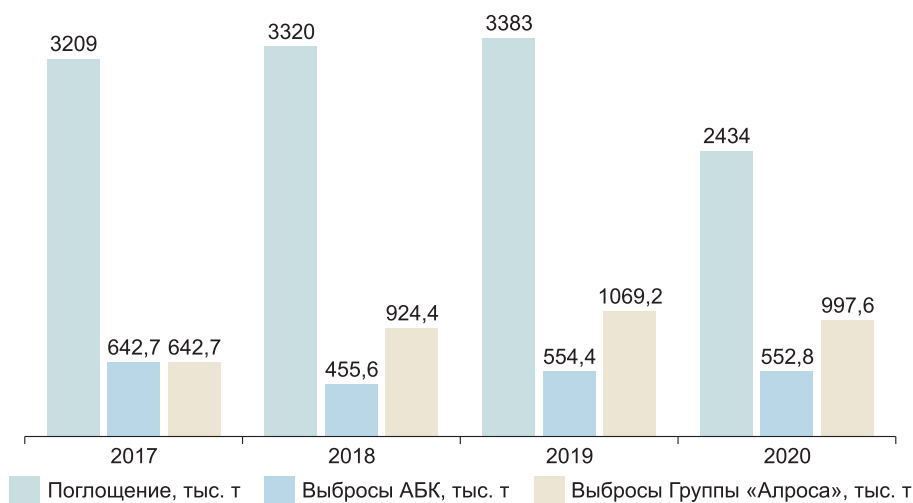


Рис. 2. Соотношения поглощения углекислого газа (CO_2) и эмиссии эквивалента CO_2 предприятий алмазно-бриллиантового комплекса (АБК) АК «АЛРОСА» (ПАО) и предприятий Группы «АЛРОСА» в 2017–2020 гг.

Fig. 2. Ratio of carbon dioxide (CO_2) absorption and CO_2 equivalent emissions by diamond complex ALROSA (PJSC) and ALROSA Group in 2017–2020.

потенциал компенсации. Потенциал поглощения углекислого газа составляет 2,4 млн т в 2020 г. и может превышать в 4,4 раза эмиссию эквивалента углекислого газа, продуцируемую алмазно-бриллиантовым комплексом (АБК) АК «АЛРОСА» (ПАО), ПАО «Севералмаз», АО «Алмазы Анабара» за этот период, и в 2,4 раза – эмиссию группы компаний «АЛРОСА» (рис. 2).

Таким образом, основываясь на первых экспериментальных данных, полученных в результате изучения кимберлитов трубки «Удачная» и отходов их обогащения, можно уже достаточно высоко оценить потенциал компенсации поглощения углекислого газа за счет естественной карбонизации перерабатываемой кимберлитовой руды, что планируется подтвердить начатыми дальнейшими масштабными исследованиями.

Заключение

Запросы на устойчивое развитие бизнеса в экологическом, социальном и корпоративном направлении становятся все более востребованными, а их влияние – более ощутимым. Именно поэтому промышленные игроки (в том числе горнодобывающие компании), способные внедрять новейшие экологические практики и снижать углеродный след своей деятельности, в последующие десятилетия получают новое восприятие в деловом и инвестиционном сообществе, а укрепление позиций в рейтингах ESG напрямую повлияет на открытость рынков для их продукции.

Поколения инвесторов меняются, а общемировые тренды приводят к тому, чтобы бизнес совершал ответственные общественно полезные поступки, в том числе участвовал в экологических и климатических проектах и следовал принципам равенства. К промышленным «гигантам» отношение еще строже: им приходится не просто участвовать в инициативах по защите окружающей среды, но и значимо снижать вредные выбросы от деятельности своих предприятий.

«АЛРОСА» – не самая крупная среди горнодобывающих компаний мира, но при этом лидирующая по добыче алмазов, с крупными производственными активами, расположенная в арктическом регионе, в котором глобальное изменение климата чувствуется гораздо сильнее, чем где бы то ни было. Именно поэтому проблемы глобального изменения климата воспринимается в Компании не как мифическая абстракция, а как види-

мая реальность, особенно наглядная там, где ведется производственная деятельность. При этом внутренние стандарты компании по эмиссии парниковых газов гораздо жестче предписываемых регулятором. Целевые показатели к 2030 г. были достигнуты Компанией уже в 2016 году. Экологические инициативы «АЛРОСА» в 2020 г. превысили \$216 млн (около 16 млрд рублей), реально снижены объемы выбросов парниковых газов за счет перевода транспорта на КПП и за счет других инициатив компании, включая создание необходимой инфраструктуры, применение энергоэффективных решений и снижение антропогенной нагрузки на климат.

Официальное партнерство «АЛРОСА» с проектом по преобразованию экосистемы Арктики «Плейстоценовый парк», включающее помощь в создании экспериментальной площадки для масштабного подтверждения «эффекта Зимова» *in situ*, является фундаментальным вкладом в борьбу с общемировыми вызовами таяния мерзлоты и предотвращения «взрывного» изменения климата на стадии, когда оно еще может быть обратимо. Важность этого мероприятия будет оценена только спустя значительное время.

Последним, по повествованию, но не по значимости, является экспериментальное подтверждение поглощения кимберлитом, перерабатываемым ГОКаами Компании, углекислого газа из атмосферы. Полномасштабные работы по исследованию этого явления будут продолжены до конца 2023 г., но уже согласно предварительным оценкам эффект от такого поглощения может в несколько раз превышать эмиссию парниковых газов со стороны Компании и ее дочерних обществ в совокупности. А само явление может лечь в основу нового Климатического проекта, реализуемого компанией и не имеющего прецедентов в мире. И это – весьма серьезный вклад алмазной компании в углеродную нейтральность.

Литература

1. Масанов А.Ю. Кимберлит поглощает CO₂: как это повлияет на рынок и реализацию ESG-стратегий компаний // Золотодобыча. 2021. № 9 (274). С. 35037.
2. Анисимов О.А., Зимов С.А., Володин Е.М., Лавров С.А. Эмиссия метана в криолитозоне России и оценка ее воздействия на глобальный климат // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 131–143.
3. Климатическая повестка России: реагируя на международные вызовы, ЦСР, январь 2021:

- [Эл. версия] <https://www.csr.ru/upload/iblock/521/521091011093dc8b5ece74cdd8552680.pdf>
4. PCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team / R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
5. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
6. <https://www.rbc.ru/opinions/economics/20/09/2021/61489ee09a79479eafb96584>
7. Указ Президента РФ от 04.11.2020 г. № 666 <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990>
8. Стратегия долгосрочного развития Российской федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс]: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf
9. Группа АЛРОСА Отчет об устойчивом развитии 2020: [Электронная версия]. http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/06/ALROSA_SR_2020_RU.pdf
10. Группа АЛРОСА Показатели ESG: [Электронный ресурс]. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/ALROSA_ESG_Databook_RUS.xlsx
11. Данные из годовых отчетов компаний. <https://www.spglobal.com/esg/csa/>; <https://www.msci.com/our-solutions/esg-investing/esg-ratings>; <https://www.sustainalytics.com/esg-rating/alrosa-pjsc/1016258005>; <https://www.ftserussell.com/products/indices/ftse4good>; <https://www.bloomberg.com/professional/solution/sustainable-finance/>; https://www.wwf.ru/upload/iblock/f66/GR_2020_rus_web.pdf
12. <https://pleistocenepark.ru/news/>
13. Зимов С.А., Чупрынин В.И. Устойчивые состояния экосистем Северо-Востока Азии // Докл. АН СССР. 1989. Т. 308, № 6. С. 1510–1514.
14. Beer C., Zimov N., Olofsson J., Porada P., Zimov S. Protection of Permafrost Soils from Thawing by Increasing Herbivore Density // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. 10.1038/s41598-020-60938-y.
15. Zimov S.A., Zimov N.S., Tikhonov A.N., Chapin F.S. Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon // Quaternary Science Reviews. 2012. Vol. 57. P. 26–45.
16. Zimov S.A., Davidov S.P., Zimova G.M., Davidova A.I., Chapin III F.S., Chapin M.C., Reynolds J.F. Contribution of Disturbance to increasing seasonal amplitude of atmospheric CO₂ // Science. 1999. Vol. 284, No. 5422. P. 1973–1976.
17. Zimov S.A. Pleistocene Park: Return of the Mammoth's ecosystem // Science. 2005. Vol. 308. No. 5723. P. 796–798.
18. Dutta K., Schuur E.A.G., Neff J.C., Zimov S.A. Potential carbon release from permafrost soils of North-eastern Siberia // Global Change Biology. 2006. Vol. 12, No. 12. P. 2336–2351.
19. <https://pleistocenepark.de/wp-content/uploads/2020/11/Pleistocene-Arctic-megafaunal-ecological-engineering-as-a-natural-climate-solution.pdf>
20. Зимов С.А. О «Плейстоценовом парке» на северо-востоке Якутии // Наука и техника в Якутии. 2008. № 1 (14). С. 44–48.
21. <http://www.alrosa.ru/алросы-продолжит-поддерживать-парк/>
22. Масанов А.Ю., Дубовичев М.А., Толстов А.В., Анисимова П.С., Гаранин К.В., Дорохов А.В., Барановская В.Б. Потенциал компенсации выбросов парниковых газов предприятий группы АЛРОСА за счет карбонизации отработанного кимберлита // Рациональное освоение недр. 2021. № 4. С. 64–73. DOI: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
23. Симоненко В.И., Толстов А.В., Васильева В.И. Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. 2008. № 4-5. С. 108–112.
24. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Геология. 2016. № 3. С. 86–94.
25. Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V. Sr and Nd isotopic compositions of Kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton // Doklady Earth Sciences. 2007. Vol. 414, No. 1. P. 557–560.
26. Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites // Geochemistry International. 2007. Vol. 45, No. 12. P. 1197–1209.
27. Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V. Petrochemical evaluation of the diamond potential of Yakutian kimberlite field // Geochemistry International. 2010. Vol. 48, No. 4. P. 346–354.
28. Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: An assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada / E.M. Mervine, S.A. Wilson, I.A.M. Power, G. Dipple // Mineralogy and Petrology. 2018. Vol. 112(36). P. 755–765. DOI:10.1007/s00710-018-0589-4. (на англ.)
22. <https://carbmin.ca>
30. Paulo C., Power I.M., Stubbs A.R., Wang B., Zeyen N., Wilson S.A. Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization // Applied Geochemistry. 2021. Vol. 129. P. 104955. <https://www.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>
31. Vasilenko V.B., Tolstov A.V., Minin V.A., Kuznetsova L.G., Surkov N.V. Normative Quartz as an indicator of the mass transfer intensity during the postmagmatic alteration of the Botubinskaya pipe kimberlites (Yakutia) // Russian Geology and Geophysics. 2008. Vol. 49, No. 12. P. 894–907.
32. <https://climeworks.com>

33. <https://meduza.io/feature/2021/09/12/v-islandii-zarabotal-kрупнейший-v-mire-zavod-kotoryy-vykachivaet-uglekislyy-gaz-iz-atmosfery-kak-eto-rabotaet-i-reshat-li-podobnye-zavody-problemu-vybrosov>

Поступила в редакцию 27.10.2021

Принята к публикации 12.11.2021

Об авторах

МАСАНОВ Алексей Юрьевич, руководитель направления, Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО), 115184, Москва, Озерковская наб., 24, Россия, e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru;

АНИСИМОВА Полина Сергеевна, зам. главного инженера, руководитель Экологического центра, АК «АЛРОСА» (ПАО), 115184, Москва, Озерковская наб., 24, Россия, e-mail: AnisimovaPS@alrosa.ru;

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, академик АН РС(Я), директор, Научно-исследовательское геолого-разведочное предприятие, АК «АЛРОСА» (ПАО), 678170, Мирный, ул. Ленина, 39, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, Scopus ID: 6603548567, ResearcherID O-2643-2013, e-mail: TolstovAV@alrosa.ru;

ШЕРЕМЕТ Альфира Халимовна, начальник отдела, Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО), 115184, Москва, Озерковская наб., 24, Россия, e-mail: SheremetAN@alrosa.ru;

ДУБОВИЧЕВ Михаил Александрович, руководитель, Центр инноваций и технологий, АК «АЛРОСА» (ПАО), 115184, Москва, Озерковская наб., 24, Россия, e-mail: DubovichevMA@alrosa.ru;

ЗИМОВ Никита Сергеевич, научный сотрудник, Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио 7, Россия; генеральный директор, товарищество на вере "Научно-экспериментальное хозяйство Плейстоценовый парк", 678830, п. Черский, ул. Малиновый Яр, 1, Республика Саха (Якутия), Нижнеколымский р-н, Россия, e-mail: NZimov@mail.ru.

Информация для цитирования

Масанов А.Ю., Анисимова П.С., Толстов А.В., Шеремет А.Х., Дубовичев М.А. Зимов Н.С. Реализация экологических инициатив АК «АЛРОСА» (ПАО) по достижению углеродной нейтральности // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 54–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66

Implementation of environmental initiatives of JSC «ALROSA» (PJSC) to achieve carbon neutrality

A.Yu. Masanov^{1,*}, P.S. Anisimova², A.V. Tolstov³, A.H. Sheremet¹,
M.A. Dubovichev¹, N.S. Zimov⁴

¹Center for Innovation and Technologies, JSC «ALROSA» (PJSC), Moscow, Russia

²Environmental Center, JSC «ALROSA» (PJSC), Moscow, Russia

³Scientific Research Geological Enterprise, JSC «ALROSA» (PJSC), Mirny, Russia

⁴Pacific Geographical Institute, Far-Eastern branch of RAS, Vladivostok, Russia

*MasanovAYu@alrosa.ru

Abstract. Due to global climate change, large industrial companies face the challenges of reducing greenhouse gas emissions and implementing climate projects that contribute to the absorption and dis-

posal of carbon dioxide (CCS). The developments of the ALROSA Group in the implementation of tasks to achieve carbon neutrality, ESG projects, climate risk management mechanisms, and projects that reduce greenhouse gas emissions in 2016–2020 are considered in detail. The company's participation in the implementation of a large-scale project to create a highly productive ecosystem in the Arctic «Pleistocene Park», as well as the beginning of the development of a unique worldwide CCS project for the absorption of carbon dioxide from the atmospheric air by kimberlite ore during its extraction and processing, was considered.

Keywords: ALROSA, carbon dioxide, Pleistocene Park, kimberlite, carbon neutralization, Carbon Capture & Storage.

References

1. Masanov A. Yu. Kimberlit pogloschaet CO₂: kak eto povliyaet na rynek i realizatsiyu ESG-strategiy kompanii // Zolotodobycha. 2021. No. 9 (274). P. 35–37.
2. Anisimov O.A., Zimov S.A., Volodin E.M., Lavrov S.A. Emissiya metana v kriolitozone Rossii i ozenka ee vozdeystviya na globalnyy klimat // Meteorologiya i gydrologiya. 2020. No. 5. P. 131–14.
3. Klimaticheskaya povestka Rossii: reagiruya na meghdunarognye vysovy, ZSR, yanvar 2021: [El. version] <https://www.csr.ru/upload/iblock/521/521091011093dc8b5ece74cdd8552680.pdf>
4. PCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team / R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
5. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031>
6. <https://www.rbc.ru/opinions/economics/20/09/2021/61489ee09a79479eafb96584>
7. Ukaz Prezidenta RF ot 04.11.2020 г. No. 666. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990>
8. Stgategiya dolgosrochnogo razvitiya RF s nizkim urovnem vybrosov parnikovych gasov do 2050 goda [Elektronnyy resurs]: https://www.economy.gov.ru/material/file/babacbb75d32d90e28d3298582d13a75/proekt_strategii.pdf
9. Gruppa ALROSA Otchet ob ustojchivom rasvitiy 2020: [El. version]. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/06/ALROSA_SR_2020_RU.pdf.
10. Gruppa ALROSA Pokazateli ESG: [El resurs]. URL: http://www.alrosa.ru/wp-content/uploads/2021/08/ALROSA_ESG_Databook_RUS.xlsx
11. Dannye iz godovyh otchetov kompanij: <https://www.spglobal.com/esg/csa/>; <https://www.msci.com/our-solutions/esg-investing/esg-ratings>; <https://www.sustainalytics.com/esg-rating/alrosa-pjsc/1016258005>; <https://www.ftserussell.com/products/indices/ftse4good>; <https://www.bloomberg.com/professional/solution/sustainable-finance/>; https://wwf.ru/upload/iblock/f66/GR_2020_rus_web.pdf
12. <https://pleistocenepark.ru/news/>
13. Zimov S.A., Chuprynin V.I. Ustojchivye sostojanie ecosystem Severo-Vostoka Asii. Dokl. AN SSSR, 1989. Vol. 308, No. 6. P. 1510–1514.
14. Beer C., Zimov N., Olofsson J., Porada P., Zimov S. Protection of Permafrost Soils from Thawing by Increasing Herbivore Density // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. 10.1038/s41598-020-60938-y.
15. Zimov S.A., Zimov N.S., Tikhonov A.N., Chapin F.S. Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon // Quaternary Science Reviews. 2012. Vol. 57. P. 26–45.
16. Zimov S.A., Davidov S.P., Zimova G.M., Davidova A.I., Chapin III F.S., Chapin M.C., Reynolds J.F. Contribution of Disturbance to ibcreasing seasonal amplitude of atmospheric CO₂ // Science. 1999. Vol. 284, No. 5422. P. 1973–1976.
17. Zimov S.A. Pleistocene Papk: Return of the Mammoth's ecosystem // Science. 2005. Vol. 308, No. 5723. P. 796–798.
18. Dutta K., Schuur E.A.G., Neff J.C., Zimov S.A. Potential carbon release from permafrost soils of North-eastern Siberia // Global Change Biology. 2006. Vol. 12, No. 12. P. 2336–2351.
19. <https://pleistocenepark.de/wp-content/uploads/2020/11/Pleistocene-Arctic-megafaunal-ecological-engineering-as-a-natural-climate-solution.pdf>
20. Zimov S.A. O «Playstozenovom parke» yf severo-vostoke Yakutii // Nauka i tehnika v Yakutii. 2008. No. 1 (14). P. 44–48.
21. <http://www.alrosa.ru/алросса-продолжит-поддерживать-парк/>
22. Masanov A. Yu., Dubovichev M.A., Tolstov A.V., Anisimova P.S., Garanin K.V., Dorohov A.V., Baranovskaja V.B. Potentsial kompensatsii vybrosov parnikovych gasov predpriyatij grupy ALROSA sa schet karbonisatsii otrabotannogo kimberlita // Ratsionalnoe osvoenie nedr. 2021. No. 4. P. 64–73. DOI: 10.26121/RON.2021.87.40.008.
23. Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilyeva V.I. Novyy podhod k geohimicheskim poiskam kimberlitov na sakrytyh territoriyah // Razvedka i ohrana nedr. 2008. No. 4-5. P. 108–112.
24. Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. Novie kimberlitovoe pole v Yakutii i tipomorfnye osobennosti ego mineralov-indikatorov // Vestnik Voron-

ezhskogo Gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geologiya. 2016. No. 3. P. 86–94.

25. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Antonov A.V.* Sr and Nd isotopic compositions of Kimberlites and associated Rocks of the Siberian craton // *Doklady Earth Sciences*. 2007. Vol. 414, No. 1. P. 557–560.

26. *Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B.* Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geokhemical heterogeneity of kimberlites // *Geochemistry International*. 2007. Vol. 45, No. 12. P. 1197–1209.

27. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Minin V.A., Tolstov A.V.* Petrochemical evaluation of the diamond potential of Yakutian kimberlite field // *Geochemistry International*. 2010. Vol. 48, No. 4. P. 346–354.

28. *Potential for offsetting diamond mine carbon emissions through mineral carbonation of processed kimberlite: An assessment of De Beers mine sites in South Africa and Canada / E.M. Mervine, S.A. Wilson, I.M. Power,*

G. Dipple // Mineralogy and Petrology. 2018. Vol. 112(36). P. 755–765. DOI:10.1007/s00710-018-0589-4. (на англ.)

22. <https://carbmin.ca>

30. *Paulo C., Power I.M., Stubbs A.R., Wang B., Zeyen N., Wilson S.A.* Evaluating feedstocks for carbon dioxide removal by enhanced rock weathering and CO₂ mineralization. *Applied Geochemistry*. 2021. Vol. 129. P. 104955. <https://www.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104955>

31. *Vasilenko V.B., Tolstov A.V., Minin V.A., Kuznetsova L.G., Surkov N.V.* Normative Quartz as an indicator of the mass transfer intensity during the postmagmatic alteration of the Botuobinskaya pipe kimberlites (Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49, No. 12. P. 894–907.

32. <https://climeworks.com>

33. <https://meduza.io/feature/2021/09/12/v-islandii-zarabotal-krupneyshiy-v-mire-zavod-kotoryy-vykachivaet-uglekislyy-gaz-iz-atmosfery-kak-eto-rabotaet-i-reshat-li-podobnye-zavody-problemu-vybrosov>

About the authors

MASANOV, Alexey Yurievich, task leader to innovation adoption, Centre for Innovation and Technologies, JSC «ALROSA» (PJSC), 24 Ozerkovskaya nab., Moscow 115184, Russia, e-mail: MasanovAYu@alrosa.ru;

ANISIMOVA, Polina Sergeevna, deputy chief engineer, head, Environmental Centre, JSC «ALROSA» (PJSC), 24 Ozerkovskaya nab., Moscow 115184, Russia, e-mail: AnisimovaPS@alrosa.ru;

TOLSTOV, Alexander Vasilievich, Dr. Sc. (Geology and Mineralogy), full member of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), director, Scientific Research Geological Enterprise, JSC «ALROSA» (PJSC), 39 Lenina str., Mirnyi 678170, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, Scopus ID: 6603548567, Researcher ID: O-2643-2013, e-mail: TolstovAV@alrosa.ru;

SHEREMET, Alfira Halimovna, head of the Department, Centre for Innovation and Technologies, JSC «ALROSA» (PJSC), 24 Ozerkovskaya nab., Moscow 115184, Russia, e-mail: SheremetAH@alrosa.ru;

DUBOVICHEV, Mikhail Alexandrovich, head, Centre for Innovation and Technologies, JSC «ALROSA» (PJSC), 24 Ozerkovskaya nab., Moscow 115184, Russia, e-mail: DubovichevMA@alrosa.ru;

ZIMOV, Nikita Sergeevich, researcher, Pacific Geographical Institute FEB RAS, 7 Radio str., Vladivostok 690041, Russia; general director, Pleistocene Park, 1 Malinovy Yar st., Chersky 678830 Republic of Sakha (Yakutia), Nizhnekolimsky district, Russia, e-mail: NZimov@mail.ru.

Citation

Masanov A. Yu., Anisimova P.S., Tolstov A.V., Sheremet A.H., Dubovichev M.A., Zimov N.S. Implementation of environmental initiatives of JSC «ALROSA» (PJSC) to achieve carbon neutrality // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 54–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-54-66>

Северо-восток Азии как температурная гиперзона и ее изменения за последние 60 лет

Сообщение 1. Температурный режим теплого сезона на северо-востоке Азии

А.В. Алфимов*, Д.И. Берман

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, Магадан, Россия

*arcalfimov@gmail.com

Аннотация. Изучено распределение на северо-востоке Азии 15 показателей теплообеспеченности, широко используемых в экологии, по данным 97 метеостанций за 1931–1960 гг. Континентальная часть и Охотское побережье были неразличимы по температурам мая ($-0,5...2,5$ °C) и датам схода снега (14.05–25.05). Варьирование еще 9 показателей в тех же субрегионах совпадало в разной мере. Более других (на 70–75 %) перекрывались диапазоны сумм температур выше 0 и 5 °C и дат перехода температур через 0 °C весной. Общие части названных диапазонов составляют 1130–1330 °C, 1066–1290 °C и 9–18.05 соответственно. Средние температуры июля и даты перехода температур через 10 °C характеризуют континентальные районы как более теплые, чем побережье, а число дней с температурой выше 0 °C и длительность периода без снега – как более холодные. Почти весь горно-лесной пояс северо-востока Азии, сформированный лиственничными редколесьями и редидами, а также зарослями кедрового стланика, в теплый сезон можно считать единой температурной гиперзоной. Однообразие ландшафтов связано как с малыми градиентами теплообеспеченности, так и с высокой экологической резистентностью доминантов растительного покрова.

Ключевые слова: гиперзона, температуры воздуха, теплый сезон, редколесья, северо-восток Азии.

Благодарности. Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (проект 19–04–00312а).

Введение

Климатическая оценка условий обитания биоты, отдельных ее групп и видов – важный элемент экологических исследований. Однако привязка района исследований к метеостанции (м/ст) не всегда возможна, а районирование, базирующееся на годовом ходе температур и увлажнения, может затушевывать важные особенности климата.

Подобная ситуация складывается, например, при описании растительности северо-востока Азии. Классификации, основанные на ее связи с климатом [1], учитывают ход зимних и летних температур, твердых и жидких осадков, рассчитанные на их основе различные индексы, что позволяет выделить в арктическом, субарктическом и умеренном поясах большое число подразделений растительности разного ранга. Однако такой подход маскирует основную особенность этой территории: доминирование в горно-лесном поясе различных вариантов редколесий и реди

из лиственницы (*Larix cajanderi*) и зарослей кедрового стланика (*Pinus pumila*). Климат горных тундр, расположенных выше 1000–1200 м н. ур. м. в континентальной части региона и выше 600–650 м на побережье Охотского моря, подобен климату зональных тундр Чукотки [2]. Слабая обеспеченность данными по климату (4–5 станций в континентальных районах и ни одной – в приморских) не позволила включить эти территории в анализ. Для оценки вклада климата в формирование ландшафтного однообразия было проанализировано распределение теплообеспеченности – одного из главных факторов дифференциации биоты в северных регионах.

Сведения более чем 180 метеостанций [3, 4] позволяют оценить варьирование показателей теплообеспеченности не только в целом по северо-востоку Азии, но и в его частях, относящихся к разным климатическим областям (рис. 1). Среди них – наиболее контрастные по условиям теплообеспеченности Охотское и Арктическое по-

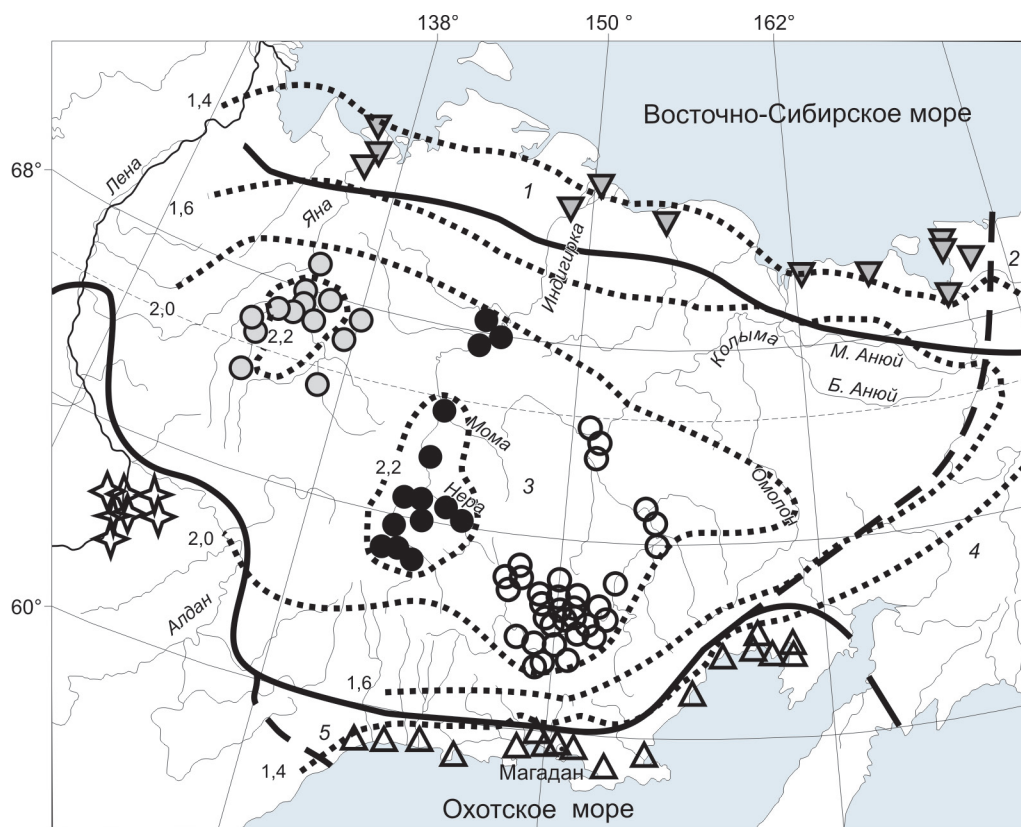


Рис. 1. Климатическое районирование северо-востока Азии [5], континентальность климата и положение м/ст, данные которых используются.

Жирные линии – границы климатических поясов, штриховые – областей, пунктирные – изолинии коэффициента континентальности [6]. 1 и 2 – сибирская и тихоокеанская области арктического пояса, 3 и 4 – субарктического, 5 – тихоокеанская область умеренного пояса. М/ст на побережьях – треугольники: на Арктическом – залитые, на Охотском – не залитые; м/ст в бассейнах рек – кружки: Колымы – не залитые, Индигирки – черные, Яны – серые; м/ст в бассейне Лены – звездочки.

Fig.1. Climatic regions of north-east of Asia [5], continentality of climate and location of w/s used in work.

Bold lines – boundaries of climatic zones, dashed lines – of climatic regions, dotted lines – climate continentality isolines [6]. Siberian and Pacific regions of the arctic (1, 2) and subarctic (3, 4) zones. Pacific region of the temperate zone (5). W/s at coasts – triangles: the Arctic – filled, the Okhotsk – empty; w/s in river basins – circles: Kolyma – empty, Indigirka – black, Yana – grey; w/s in Lena basin – asterisks.

бережья и континентальная часть – бассейны верхний Колымы, Индигирки, Яны.

Особенности используемого нами подхода состоят в следующем. Описания климата построены не на данных отдельных метеостанций, а на диапазонах показателей, полученных для групп метеостанций, характеризующих выделенные регионы северо-востока Азии. Данные метеостанций зависят не только от факторов, закономерно изменяющихся в пространстве, таких как широта, высота над уровнем моря, степень океаничности–континентальности, но и от местных особенностей (закрытость горизонта, роза ветров, положение на мезорельефе и т. п.). Несмотря на стандартные требования к расположению станций, эти особенности нельзя исключить полно-

стью, и они вносят свой вклад в формирование местных климатов. Между тем, влияние на локальную биоту оказывают именно местные климаты, а на биоту обширной территории – их совокупность, которая отражена в диапазоне данных метеостанций. Он заведомо уже рамок, в которых варьируют местные климаты, так как не учитывает, например, изменений температур воздуха на склонах южной и северной экспозиции. В целом же принятый нами подход позволяет описать теплообеспеченность разных частей северо-востока Азии полнее, чем это можно сделать, используя данные отдельных метеостанций.

Вторая особенность подхода – выбор индикаторов из множества имеющихся. В базовом источнике [3, 4] условия теплообеспеченности

северо-востока Азии описаны более чем 50 показателями, но использовались лишь имеющие очевидное экологическое значение и представленные для большинства станций. Этим условиям не отвечают, например, суточные амплитуды и число дней с температурами в указанных пределах, которые рассчитаны менее чем для трети станций. Не использовались также суммы температур выше 15 °С, отмечаемые лишь на отдельных участках долин Колымы, Индигирки и Яны, лежащих ниже 500 м н. ур. м. Даты перехода через 0, 5 и 10 °С осенью не рассматривали, так как их вклад в фенологию меньше, чем вклад дат перехода через те же рубежи весной [7, 8].

На половине арктических и 20 % станций в бассейнах Яны и Индигирки интервал между последним весенним и первым осенним заморозком чаще чем в половине лет наблюдений был короче 30 сут., что интерпретируется как отсутствие периода без мороза [3]. Для подобных станций мы приняли его длительность равной 20 сут., что, вероятно, близко к реальности [9]. Способ оценки дат начала и конца периода без мороза для таких станций нами не найден, поэтому названные даты не рассматривались. По названным условиям было отобрано 15 показателей теплообеспеченности (табл. 1).

Наиболее полный корпус сведений по климату региона содержит данные, полученные до 1961 г. [3, 4]. Сеть наблюдений на северо-востоке Азии формировалась поздно, ряды, имевшие разную длину, по специальной методике были приведены к периоду 1931–1960 гг. В издании, обобщившем результаты наблюдений до 1980 г. [10], исключены две трети станций и такие важные для биоты показатели, как суммы температур выше 0, 5, 10 и 15 °С, число дней с названными температурами и т.п. Тем самым данные за 1931–1960 гг. до сих пор служат самой полной базой для анализа дифференциации климата северо-востока Азии. В ходе глобального потепления к началу XXI в. сложилась картина, отличная от базовой, но описать ее предложенным методом невозможно, так как в конце XX в. сеть станций была резко сокращена. Этой теме посвящено отдельное сообщение.

Задача работы – анализ распределения на северо-востоке Азии показателей теплообеспеченности, широко применяемых в экологических исследованиях, и оценка их роли в формировании ландшафтной картины региона.

Материалы и методика

Работа построена на сравнении условий теплого сезона в субрегионах, занимающих большую часть северо-востока Азии, сходных по характеру господствующих ландшафтов (среднегорье с лиственничными рединами и редколесьями с кедровым стлаником), но расположенных в разных климатических поясах.

Это Охотское побережье с тихоокеанским климатом умеренного пояса и бассейны верховий крупнейших рек: Яны, Индигирки и Колымы, которые относятся к континентальному сектору субарктического пояса (см. рис. 1). Для названных территорий обсуждаются данные станций, расположенных в поясе редколесий, ниже 800 м н. ур. м.; выше, в горных тундрах, падает континентальность климата и условия теплого сезона аналогичны таковым в зональных тундрах [2]. Для представления обо всем диапазоне условий теплого сезона в анализ включены данные станций арктического пояса, находящихся на побережье морей Северного Ледовитого океана.

Границы субрегионов выбраны таким образом, чтобы данные находящихся в их пределах станции наиболее ярко отражали особенности климата. Например, теплообеспеченность в основном равнинного побережья Арктики описана данными пунктов, лежащих не далее 40–50 км от берега, а условия Охотского побережья, где преобладает горный рельеф, сужающий зону влияния моря, – только береговыми. Число станций варьировало от 9 на Арктическом побережье до 34 в бассейне верховий Колымы.

Мерой межгодовых колебаний показателей служило стандартное отклонение (SD) среднеемноголетних значений [11], мерой однородности территорий – отсутствие значений, выходящих за пределы доверительного интервала 99%-й вероятности [12]. Материалы наблюдений за отдельные годы получены на электронных ресурсах [13, 14].

Результаты и обсуждение

Распределение показателей теплообеспеченности между субрегионами

Средние температуры первого теплого месяца, даты перехода температур через 0 °С и даты схода снега описывают важный фенологический рубеж – начало теплого сезона. В бассейнах трех названных рек даты перехода через 0 °С варьируют в пределах 7–8 сут.: с 9–10 по 15–

**Варьирование показателей теплообеспеченности в выделенных субрегионах
(данные за 1931–1960 гг. [3, 4])**

Table 1

Variation of heat supply indicators in selected subregions (data for 1931–1960 yy. [3, 4])

Показатель Indicator		Континентальные районы Continental regions (1)	Побережье Coast of the sea		Общая часть диапазонов, % Common part of ranges, %		
			Охотское Okhotsk (2)	Арктическое Arctic ocean (3)	1–2	2–3	1–3
Средняя температура, °C Mean temperature, °C.	Май–июнь ¹ May–June	–1,7...2,6	–0,6...1,9	1,9...5,2	100	–	16
	Июль/July	13,1...15,5	11,0...13,0	4,9...9,5	–	–	–
Минимальная температура июля, °C Minimum temperature in July, °C		–2,7...3,0	0...5	–2,0...0,0	60	–	100
Суммы температур выше, чем... °C Sums of temperature. above..., °C	0	1133...1443	1077...1315	390...710	76	–	–
	5	1060...1375	965...1228	108...618	63	–	–
	10	754...1157	534...861		33	–	–
Дни с температурой выше чем..., сут Days with temperature. above..., day	0°	123...139	140...155	100...118	–	–	–
	5°	97...112	103...118	21...75	60	–	–
	10°	61...82	39...69		38	–	–
Даты перехода температур через..., дд.мм Temperature transition dates after..., dd.mm	0°	9.V...21.V	6.V...18.V	25.V...8.VI	75	–	–
	5°	20.V...30.V	29.V...12.VI	13.VI...15.VII	10	–	–
	10°	1.VI...16.VI	25.VI...8.VII		–	–	–
Даты схода снега, дд.мм Snow cover loss date, dd.mm		12.V...27.V	11.05...28.05	23.V...12.VI	100	29	24
Период, сут Period, day	без снега snowless	128...150	153...187	104...132	–	–	–
	без мороза frost free	26...86	56...111	20...48	55	–	79

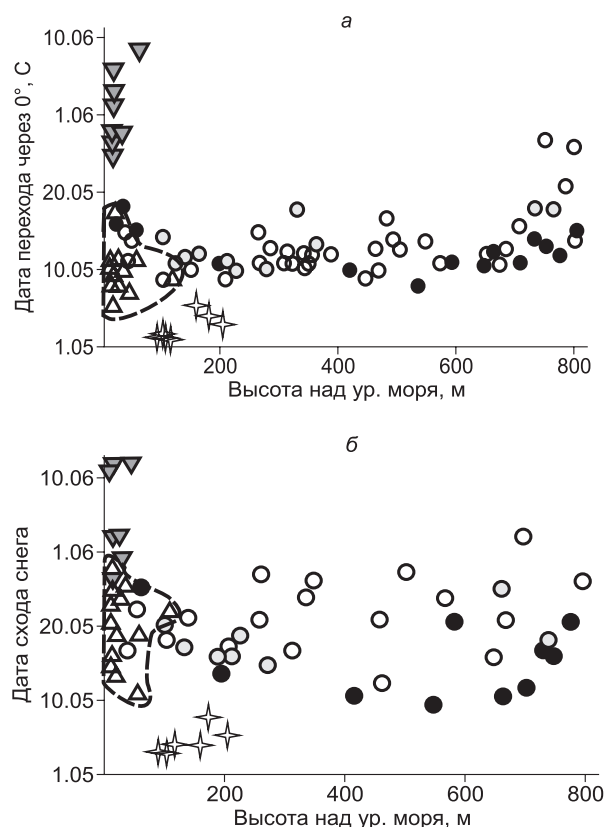
Примечание. Первый теплый месяц на арктическом побережье – июнь, в остальных субрегионах – май; прочерк – отсутствие общих частей в диапазонах.

Note. The first warm month on the Arctic coast is June, in other subregions – May; dash – absence of common parts in the ranges.

16 мая (рис. 2, а). На Охотском побережье, при таком же варьировании дат, теплый сезон наступает в среднем на 3–4 сут. раньше, а на арктическом – на 10–12 дней позже, чем в континентальных районах. Лишь на двух станциях на водоразделе Колымы и Индигирки, на высотах, близких к 800 м н. ур. м., теплый сезон наступает в те же сроки, что и на самых теплых участках арктического побережья.

Средние температуры мая, первого теплого месяца на большинстве станций в бассейнах Ко-

лымы, Индигирки, Яны и на Охотском побережье, варьируют от 0,5 до 2,5 °C (рис. 2, б). Они отрицательны (–0,2...–1,9 °C) лишь на трех-четырех станциях в верховьях названных рек и единственной станции Охотского побережья (Ямск). В первой декаде мая Охотское побережье теплее континентальных районов на 1,5–1,9 °C, температуры второй декады неразличимы, а третья теплее на 2,5–2,9 °C уже в бассейнах Колымы, Яны и Индигирки [10]. Иными словами, сходство средних температур мая определяется более



ранним переходом температур через 0°C на побережье и более быстрым ростом в континентальной части. На арктическом побережье температуры переходят через 0°C в конце мая–начале июня, когда солнце не скрывается за горизонт. Поэтому первый теплый месяц здесь июнь, когда на некоторых участках побережья температуры на $2,0\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$ выше, чем на самых теплых станциях верховий Колымы и Индигирки в мае.

Даты схода снега определяются на метеостанциях визуально, поэтому могут экстраполироваться лишь на небольшие территории. Сильные ветры перераспределяют снежный покров не только на побережьях, но и в верхней части пояса редколесий континентальных районов [2], поэтому окрестности станций могут оказаться как мало-, так и многоснежными. В результате даты схода снега в каждом из субрегионов варьируют в пределах 15–20 сут. (рис. 2, в). В рамках всего региона они формируют континуум, в котором ранние даты (начало второй декады мая) отмечаются в верховьях Индигирки, а самые поздние (начало второй декады июня) – на арктическом побережье.

Средняя температура и средние из абсолютных минимумов самого теплого месяца описывают условия на пике лета. На Арктиче-

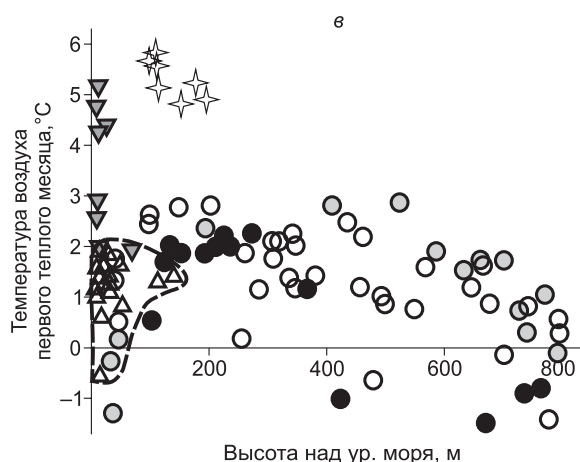


Рис. 2. Показатели начала теплого сезона. Здесь и далее данные за 1931–1960 гг. [3, 4].

Для наглядности показатели Охотского побережья обведены штриховой линией. Остальные обозначения см. рис. 1.

Fig. 2. Indicators of the beginning of a warm season. Hereinafter dates for 1931 – 1960 yy. [3, 4].

Indicators of Okhotsk sea coast are outlined by a dashed line. For others designation see Fig. 1.

ском побережье и в континентальных районах самый теплый месяц – июль, на большей части Охотского побережья температуры июля и августа одинаковы, и лишь на четырех самых западных станциях август теплее июля на $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ (рис. 3, а). Наиболее высокие температуры отмечаются в континентальных районах, хотя на их северной и высотной границах они не выше, чем на самых теплых участках Охотского побережья. Побережье Арктики холоднее континентальных районов почти вдвое ($7,5\text{--}8,5$ и $13,5\text{--}15,5^{\circ}\text{C}$ соответственно).

Формирование абсолютных минимумов зависит как от макро-, так и от местного климата. На равнинном побережье Арктики похолодания связаны с обширными вторжениями холодного морского воздуха, поэтому диапазон минимумов на большой территории составляет лишь $2,0^{\circ}\text{C}$. На Охотском побережье и в континентальных районах велика роль горного рельефа, задерживающего ночной сток холодного воздуха в долинах и котловинах. Поэтому диапазон минимумов здесь в $2,5\text{--}3$ раза шире, чем на Арктическом побережье (рис. 3, б). На отдельных станциях в долинах Яны и Индигирки средние из абсолютных минимумов в июле составляют -3°C , что на 1°C ниже, чем на побережье Арктики.

Переход температур через 5 и 10°C на северо-востоке Азии приходится на конец мая–июнь (рис. 4, а, б). Чем выше порог температур, тем

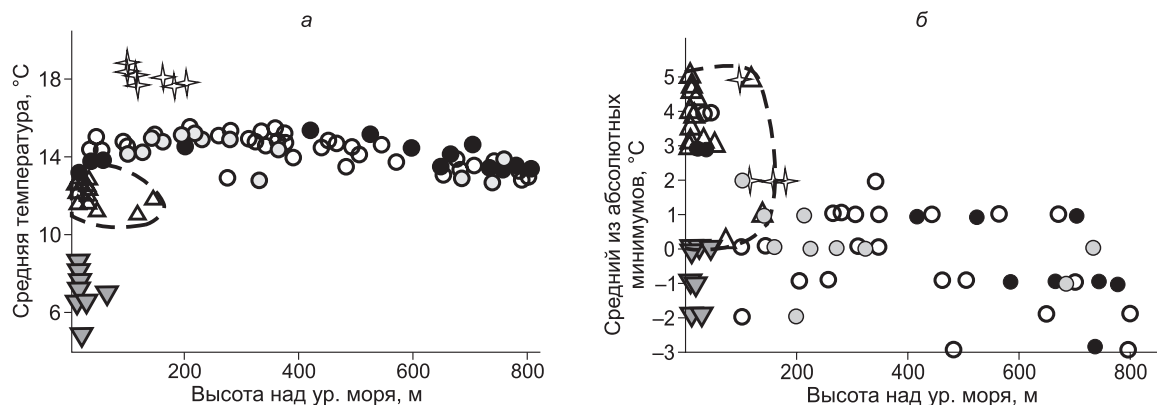


Рис. 3. Показатели пика теплого сезона.

На Охотском побережье самый теплый месяц июль или август, в остальных субрегионах – июль.

Fig. 3. Indicators of a warm season peak.

At the Okhotsk coast the warmest months are July or August, in other subregions – July.

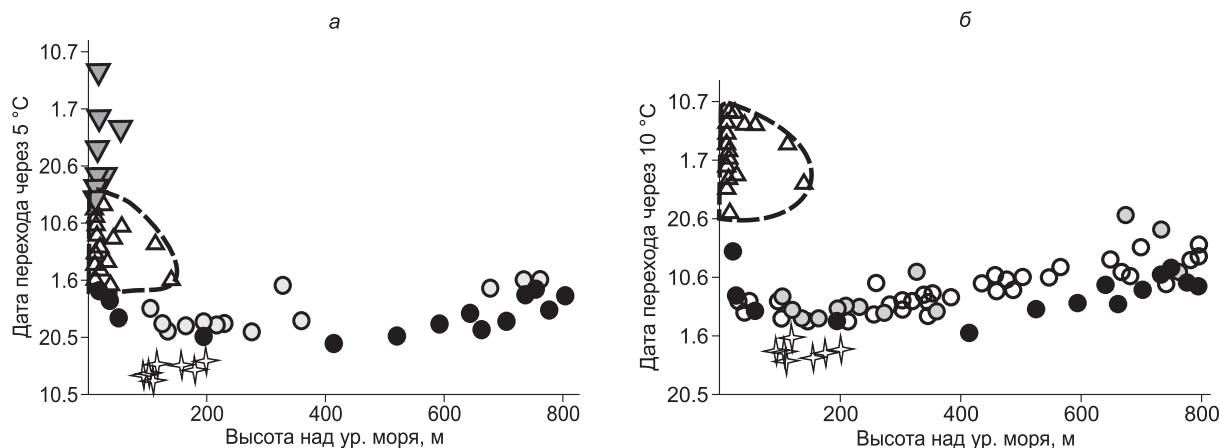


Рис. 4. Даты перехода температур через 5 и 10 °C.

Fig. 4. Dates of temperatures transition after 5 and 10°C .

больше различия между выделенными субрегионами: даты перехода через 0 °C в континентальных районах и на Арктическом побережье различаются на 15–18 сут., а через 5 °C – уже на 25–30 сут. Период же с температурами выше 10 °C на Арктическом побережье отсутствует.

Ярче всего связь дат перехода температурного порога и его высоты проявляется в паре континентальные районы–Охотское побережье. Температуры на побережье переходят через 0 °C на 3–4 дня раньше, 5 °C они достигают на 10–15 сут. позже, а 10 °C – уже на 20 сут. позже

Суммы температур выше 0, 5 и 10 °C и время их регистрации – самые распространенные оценки теплого сезона (рис. 5). Континентальные районы и Охотское побережье по суммам выше 0 и 5 °C весьма похожи, различия между

ними статистически достоверны лишь для сумм выше 10 °C. Арктическое побережье холоднее названных субрегионов в 2–2,3 раза.

Время, в течение которого регистрировались названные температуры, различается меньше, чем их суммы. Наибольшие различия отмечены для числа дней с температурами выше 0 °C, а длительность периодов выше 5 °C на Охотском побережье и в континентальных районах одинакова.

Длительность безморозного и бесснежного периодов одни из самых изменчивых показателей теплообеспеченности (рис. 6, а, б). На Охотском побережье оба периода длятся почти на месяц дольше, чем в остальных субрегионах. В верховьях Индигирки, Яны и Колымы число дней без мороза не превышает 86, на побережье

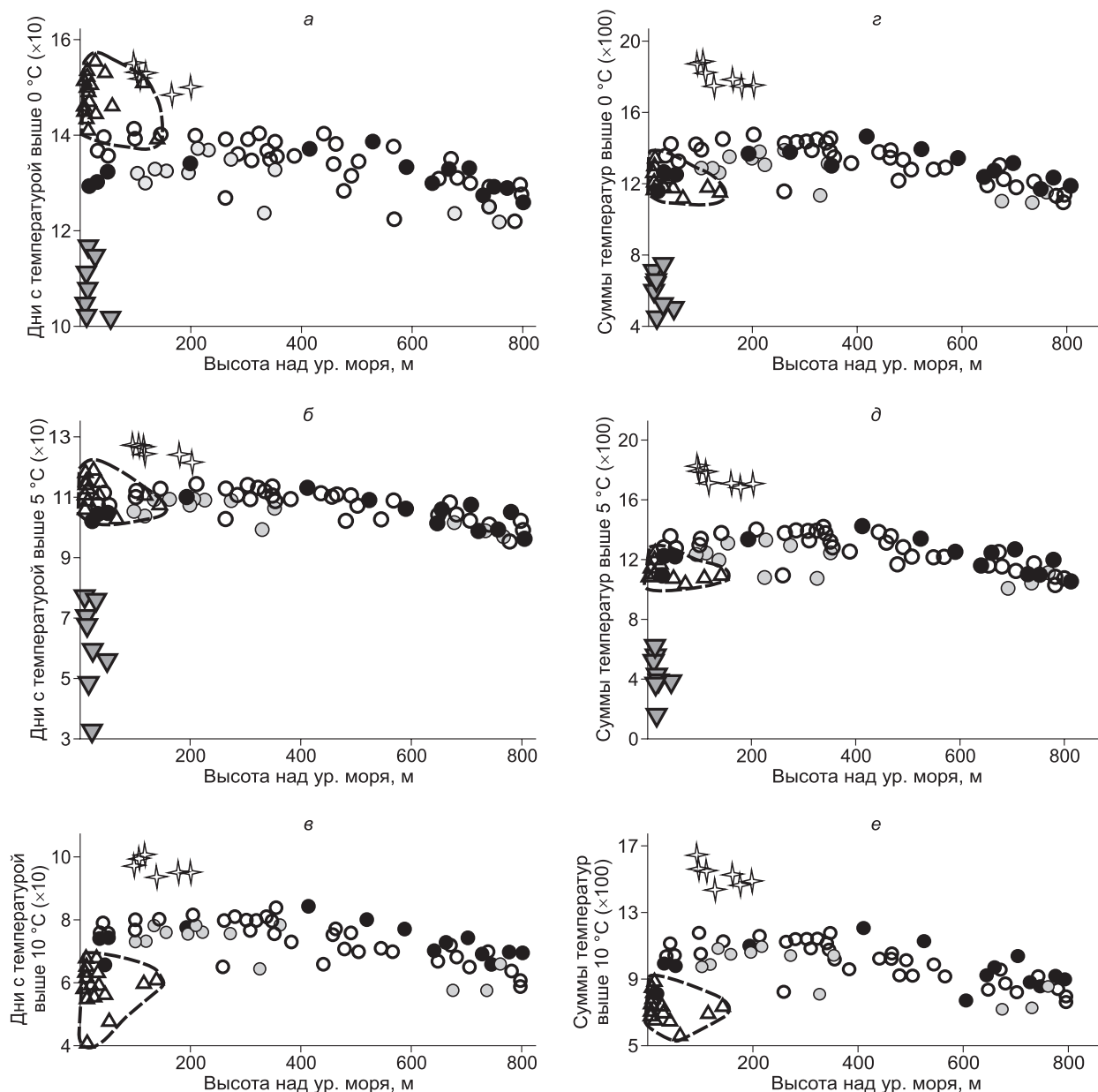


Рис. 5. Временные (а, б, в) и температурные (г, д, е) показатели теплообеспеченности за сезон.

Fig. 5. Temporal (a, б, в) and temperature (г, д, е) indicators of warm season.

Арктики – 50, а наименьшая длительность и там, и там не достигает месяца. Краткость периода без мороза в долинах названных рек определяется большой суточной амплитудой температур (12–15 °C): поздней весной и ранней осенью ночами они могут опускаться ниже 0 °C даже при высоких дневных значениях [2, 3]. На Арктическом побережье, где суточные амплитуды в 1,5–2,0 раза ниже, к тому же результату приводят ветры северных румбов, связанные с прохождением циклонов.

На Охотском побережье разница между максимальной и минимальной длительностью бесснежного периода составляет 37 сут., что в 3–4 раза больше диапазона длительности теплого сезона, и в 6–7 раз превосходит диапазон периода без мороза.

Время отсутствия снежного покрова – единственный из индикаторов, не имеющий даже слабой связи с высотой. И на высотах более 600 м н. ур. м. в верховьях Колымы, и на отметках 300–400 м н. ур. м. в многоснежных районах

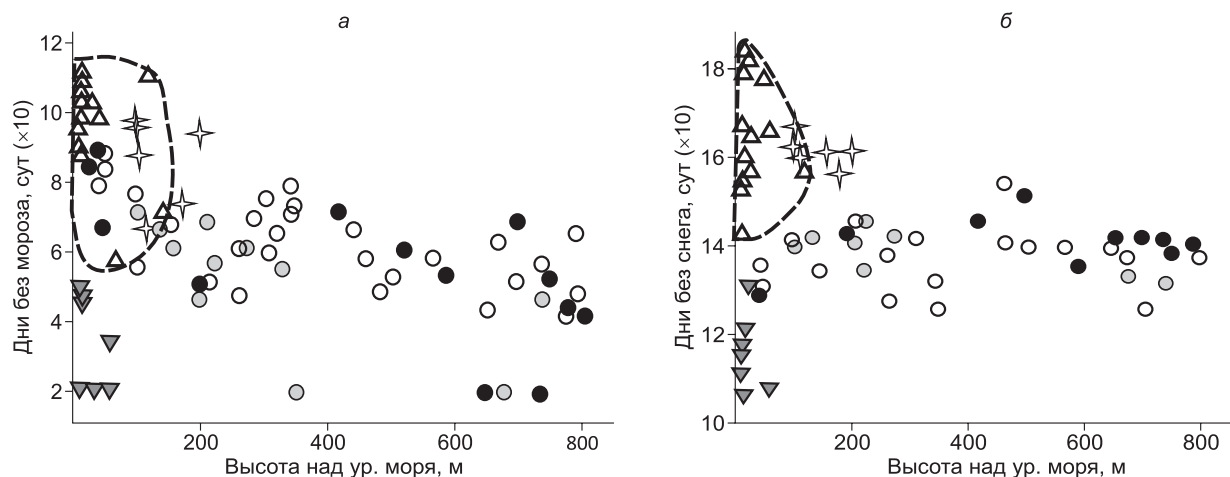


Рис. 6. Длительность периодов без мороза и без снега.

Fig. 6. Duration of frost-free and snowless periods.

при выходе Колымы из гор поверхность почвы открыта солнцу столько же времени, как на самых теплых участках Арктического побережья.

Варьирование теплообеспеченности в пределах субрегионов

На Охотском побережье интервал широт между самой северной и самой южной из рассматриваемых станций составляет $2,5^\circ$; на арктическом – $3,5^\circ$; в бассейнах Яны, Индигирки и Колымы он достигает $3-5^\circ$, а диапазон высотных отметок 700–750 м. Однако в каждом из субрегионов максимальные и минимальные значения показателей (исключение – температуры мая на побережьях) не выходят из доверительного интервала 99%-й вероятности, что позволяет считать территории однородными [12].

Выравнивание условий теплообеспеченности обеспечивается разными механизмами. На побе-

режьях это влияние морей, температура которых не меняется в рассматриваемых интервалах широт. В Охотском море стабилизации температур воды способствуют течения, направленные вдоль берега [15]. Убывание теплообеспеченности с широтой в континентальных районах невелико благодаря тому, что абсолютная высота местности к северу уменьшается и высотный и широтный градиенты температур (для сумм выше 0°C они составляют 150°C на градус широты и $0,50-0,70^\circ\text{C}$ на 100 м высоты [3,16]) в большой степени нивелируют друг друга (рис. 7). Связь высоты и теплообеспеченности проявляется лишь в горных верховьях Индигирки, Яны и Колымы на отметках выше 400–500 м н. ур. м.

Колебания теплообеспеченности в теплые и холодные годы

Принято считать, что в очень теплые и очень холодные годы показатели теплообеспеченности могут отличаться от средних многолетних значений (M) на $2SD$, а в экстремальных случаях – на $3SD$ (табл. 2). Размер этих отклонений велик, в отдельные годы они могут нивелировать различия даже между Арктическим и Охотским побережьями. На наиболее теплых арктических станциях в теплом июле ($M + SD$) температура должна составлять $10-11^\circ\text{C}$, т. е. столько же, сколько в холодном ($M - SD$) июле на берегу Охотского моря. При более сильных отклонениях ($M \pm 2SD$) даже суммы температур выше 0°C на тех же арктических станциях будут выше, чем в Охотоморье ($950-1000$ и $900-950^\circ\text{C}$ соответственно). По многолетним данным, указанные сум-

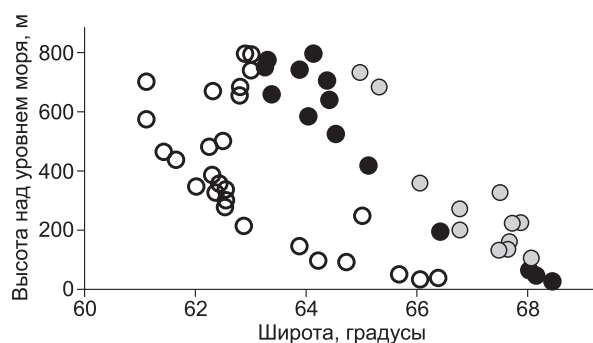


Рис. 7. Высота над уровнем моря и широта расположения м/ст в бассейнах Яны, Индигирки и Колымы.

Fig. 7. Elevation and latitude of w/s in basins of Yana, Indigirka and Kolyma rivers.

Таблица 2

**Межгодовые колебания (SD) характеристик теплого сезона
(данные за 1931–1960 гг. [11])**

Table 2

Interannual fluctuations (SD) of a warm season indicators (data for 1931–1960 [11])

Показатель Indicator		Бассейны верховий рек Watersheds of river upstream			Побережья Coastline of the seas	
		Яны Yana	Инди́гирки Indigirka	Колымы Kolyma	Охотское Okhotsk	Арктическое Arctic ocean
Средняя температура, °C Mean temperature in, °C	Май /May	2,3	2,3–2,8	2,3–2,7	1,0	2,5–3,0
	Июль/July	2,1	1,4–1,7	1,5–1,8	0,8–1,1	1,8–2,1
Суммы температур выше, чем..., °C Sums of temperature. above..., °C	0	132	88	79	119	119
	5	–	–	84	125	–
	10	204	121	113	175	67
Дни с температурой выше чем..., сут Days with temperature. above..., day	0°	5,9	8,1	6,6	8,0	7,9
	5°	–	–	7,8	8,5	–
	10°	13,1	9,5	8,0	12,3	6,9
Даты перехода температур через..., сут Temperature transition dates after..., day	0°	4,2	6,2	5,4	3,8	5,0
	5°	–	–	6,0	5,5	–
	10°	6,2	8,4	6,0	7,8	8,5
Дата схода снега, сут Snow cover loss date, day		8,2	–	9,9	10,5	–
Период, сут Period, day	без снега /snowless	17,0	9,0	9,4	13,3	–
	без мороза /frost free	9,7	–	15,4	13,5	–

Примечание. Значения SD приведены по данным м/ст: бассейн верховий Яны – Верхоянск; Инди́гирки – Дружина, Усть-Мома, Оймякон-аэропорт; Колымы – Коркодон, Аркагала, Среднекан, Сусуман; Охотское побережье – бух. Нагаева, Ола, Ямск; арктическое – Казачье, Амбарчик. Прочерк – отсутствие данных.

Note. SD values are given according to w/s data: upper Yana basin – Verkhoyansk, upper Indigirka basin – Druzhina, Ust-Moma, Oymyakon-airport; upper Kolyma basin – Korkodon, Arkagala, Srednekan, Susuman; Okhotsk area – Nagaeva bay, Ola, Yansk; Arctic coast – Kazach'e, Ambarchik. Dash – lack of data.

мы могут отклоняться на SD раз в 10–20 лет [3], вероятность наступления больших отклонений существенно ниже. Однако, за 2005–2020 гг. дважды (в 2007 и 2015 гг.) на двух арктических станциях (Чаун и Певек) июль был на 2,5–5 °C теплее, чем на Охотском побережье (м/ст бух. Нагаева) [14]. В 2007 г. бух. Нагаева уступала Чауну даже по суммам температур выше 0 °C (1350 и 1510 °C соответственно).

В отдельные годы меняют знак даже фундаментальные климатические различия, такие как разность температуры июля в континентальных районах и на Охотском побережье. В 1947 г. на самой теплой станции верховий Колымы (Сеймчан, 206 м н. ур. м.) температура июля была ниже нормы на 1,9SD, а в бух. Нагаева – выше на 1,6SD, при этом они составили 12,4 и 12,8 °C соответ-

ственно [13]. В верхней части пояса редколесий того же региона (м/ст Сусуман, 649 м н. ур. м.) температура июля была ниже, чем на Охотском побережье, 17 раз за 81 год наблюдений.

Для ряда субрегионов различия средних многолетних значений показателей сравнимы с величиной их SD. В верховьях Инди́гирки и Колымы средние даты схода снега различаются на 6 сут., что меньше SD этих величин. Такое же соотношение характерно и для дат перехода через 10 °C: средние даты разнятся на 3–5 сут, а SD составляет 6–8 сут.

При сходе среднегдолетних показателей континентальных районов и побережья большие отклонения могут существенно изменять ситуацию. Наибольшие отрицательные отклонения температур мая за период с 1937 по 2018 г.

на м/ст Сусуман и бух. Нагаева составили $-1,5SD$ (1948 г.) и $-1,8SD$ (1968 г.), а сами температуры $-2,6$ и $-0,7$ °C соответственно [13]. Влияние указанных различий на экосистемы оценить трудно, но, например, для перелетных птиц такая ситуация может оказаться важна.

*Северо-восток Азии
как температурная «гиперзона»*

Таким образом, в пяти наиболее климатически контрастных субрегионах северо-востока Азии диапазоны большинства индикаторов теплообеспеченности совпадают в разной степени (см. табл. 1). В частности, бассейны верховий Колымы, Индигирки и Яны, несмотря на различие широты и средней высоты над уровнем моря, идентичны друг другу по всем рассмотренным показателям.

От Охотского побережья названные районы неотличимы по температуре мая и датам схода снега, а перекрытие еще 9 индикаторов варьирует от 10 до 76 %. Безусловно различны 4 из 15 рассмотренных показателей (температуры июля, даты перехода через 10 °C, длительность теплого и бесснежного периодов), которые иллюстрируют классическое различие морского и континентального климатов: в первом в разгар лета температуры ниже, но теплый период длиннее, чем во втором.

Ранжировать индикаторы по их экологической роли трудно, так как на разные группы организмов (и даже на отдельные виды) влияют могут разные показатели. Возможна лишь самая общая оценка вклада различающихся показателей в условия существования биоты. У двух из них (длительности теплого и бесснежного периодов) различия формируются осенью за счет более позднего установления снежного покрова и перехода температур через 0 °C на побережье. Как отмечено выше, связь этих событий с фенологией много слабее, чем у дат схода снега и начала теплого сезона [7, 8].

Различие двух других индикаторов (дат перехода температур через 10 °C в фазе роста и температур июля) важно, так как описывает пик теплого сезона в континентальных районах как более благоприятный для биоты. Однако, ресурс активных температур чаще оценивается по их суммам выше 10 °C за сезон, диапазоны которых в континентальных районах и на Охотском побережье перекрываются на треть. Такое соотношение говорит о сходстве условий в двух частях гиперзоны даже в середине теплого сезона.

Наконец, 4 из 15 показателей наиболее холодной части северо-востока Азии – Арктического побережья частично совпадают с диапазонами тех же показателей в других субрегионах (см. табл. 1). Больше других схожи июльские минимумы температур, варьирование которых не выходит за рамки, характерные для бассейнов Яны, Индигирки и Колымы.

Необычное распределение теплообеспеченности на северо-востоке Азии обязано уникальности его расположения. Соседство с востока и юга с холодными морями, активная циклоническая деятельность и горы в южной части понижают температуру воздуха на юге и в центре региона, что маскирует влияние Арктики и формирует на большей его части малые, а у ряда показателей – инверсионные широтные градиенты.

Выравниванию теплообеспеченности способствует также высокая мезоклиматическая изменчивость показателей в континентальных районах. В верховьях Колымы различия сумм температур выше 0 °C между днищем долины, где обычно располагаются метеостанции, и склонами северной и южной экспозиций могут составлять $\pm 6-7$ %, а различия сезонных минимумов 0,9–1,0 °C [17]. Суточные амплитуды температур воздуха от днища долины к водоразделам могут убывать с градиентом 4,5 °C на 100 м высоты, а длительность периода без мороза – возрастать на 20 сут. [2, 18]. Таким образом, действие местных факторов увеличивает диапазоны названных, а, вероятно, и всех обсуждаемых показателей в каждом субрегионе, как в теплую, так и в холодную сторону. В результате перекрытие условий теплообеспеченности между континентальными районами и побережьем для сумм температур выше 0 °C возрастает в 1,2 раза (с 76 до 93 %), для минимальных температур – в 1,3 раза (с 66 до 80 %), а для длительности периода без мороза – в 1,6 раза (с 55 до 90 %).

Подводя краткий итог, отметим, что по широкому кругу показателей теплообеспеченности большую часть горно-лесного пояса северо-востока Азии в теплый сезон можно считать однородной областью или «гиперзоной». На юге она ограничена побережьем Охотского моря, на севере – не доходит 60–100 км до побережья Арктики. По большинству характеристик к ней относятся также долины Колымы, Индигирки, Яны и их притоков ниже 400–500 м н. ур. м. Эти долины отличаются от остальной части гиперзоны лишь в пик теплого сезона: в течение 20–25 сут. здесь

держится температура более 15 °С, что поднимает суммы температур выше 10 °С до 1100 °С.

Определение восточной границы гиперзоны представляет собой отдельную задачу. По одним показателям теплообеспеченности территории к востоку от бассейна Колымы (см. рис. 1) соответствуют Охотскому побережью, по другим – бассейнам верховий Яны, Индигирки и Колымы, по третьим – занимают промежуточное положение между континентальными районами и Арктическим побережьем [2, 3, 4].

Западная граница гиперзоны совпадает с принятой границей северо-востока Азии: по среднему течению Лены, находящемуся на одной широте с верховьями Индигирки и Колымы, теплообеспеченность много выше, чем в самых теплых частях долин этих рек (см. рис. 2–6).

Таким образом, в теплый сезон на северо-востоке Азии формируется зона протяженностью 8–9° широты, в которой градиенты большого числа индикаторов теплообеспеченности много меньше, чем у тех же показателей в том же интервале широт в других долготных секторах Евразии. От 60° с. ш. (Магадан) до 68° с. ш. (м/ст Верхоянск, Янск, Абый) температуры июля растут с 12–13 до 14–15 °С, а суммы температур выше 0 °С – с 1100–1200 до 1300–1350 °С. На «холодной» южной границе располагаются лиственничные редкостойные леса и редколесья, а на «теплой» северной – предтундровые редколесья [19], различия между которыми видны лишь специалистам.

В европейской части России в том же поясе широт те же показатели изменяются в 2–4 раза сильнее и с противоположным знаком: от 17–18 до 7–8 °С и от 2100–2150 до 800–850 °С, а границы (верховья Камы и побережье Баренцева моря) лежат в южной тайге и типичных тундрах. Важно отметить, что градиент теплообеспеченности при «нормальной» смене природных зон в этом, как и в других долготных секторах субарктических и арктических широт России, возрастает при приближении к побережью морей Северного Ледовитого океана на расстояние 250–300 км [5].

*Температурная гиперзона
и ландшафтное районирование
северо-востока Азии*

Подход к Охотскому побережью и бассейнам верховий Колымы, Индигирки и Яны как к температурной гиперзоне, казалось бы, подтверждается

весьма близкой растительностью фоновых ландшафтов пояса редколесий этих территорий. Однако названное сходство связано не только с выравниваемостью летних температурных условий.

Чрезвычайно важен состав доминантов древесных ярусов растительности (лиственница и кедровый стланник в разных сочетаниях). Господство лишь двух доминантов связано с их выдающейся экологической резистентностью, проявляющейся и в протяженности ареалов с севера на юг [20, 21], и в колонизации биотопов с резко различными режимами температур почв [22]. В тех случаях, когда большинство показателей температуры воздуха, измеряемой на высоте 2 м над поверхностью земли, неизменно, теплообеспеченность верхних слоев почвы, на которую влияет множество факторов (экспозиция, влажность, льдистость мерзлоты, сомкнутость растительности и т. д.), варьирует очень широко. В свою очередь, разнообразие условий в почве с лишвой компенсирует различия температур воздуха, возможные в пределах гиперзоны, что также ведет к выравниванию условий [23]. Подчеркнем, что сходство диапазонов теплообеспеченности верхних слоев почв в континентальной и приморской частях гиперзоны формируется на фоне различий мерзлотной обстановки, определяемой среднегодовыми температурами воздуха [24]. На побережье они составляют –3...–4 °С, и мерзлые породы имеют вид островов среди немерзлых территорий. В континентальных районах, где среднегодовые температуры воздуха опускаются до –15...–17 °С, мерзлота повсеместна. Однако, наряду с ландшафтным единообразием существует ряд важных отличий растительности, позволяющих уверенно разделять северо-восток Азии на континентальную часть и побережья.

На Охотском побережье шире, чем в бассейнах верховий Колымы, Индигирки и Яны, распространены тундро- и лесотундроподобные ландшафты, формируемые не связанными с теплообеспеченностью факторами. К ним относятся более высокие суммы летних осадков, которые поднимают показатель увлажнения (ГТК Селянинова) до значений, обычных для перехода от зональных тундр к лесотундре, тогда как в континентальных районах они ближе к показателю лесной зоны [25]. На обширных морских террасах и в приустьевых расширениях долин велика роль сильных зимних ветров северных румбов. Они

удаляют снежный покров с выпуклых участков рельефа, уничтожая подрост лиственницы и способствуя формированию мерзлоты даже при среднегодовой температуре воздуха $-3...-4^{\circ}\text{C}$.

Еще одно характерное отличие Охотского побережья от континентальной части – широкое распространение в непосредственной близости от береговой линии каменноберезняков (*Betula ertmani*), тогда как в континентальной части их ареал имеет черты реликтовости [26], что также, вероятно, не связано с температурным режимом теплого сезона.

Важная ландшафтная характеристика – подъем верхней границы леса от Охотского побережья (600–650 м н. ур. м.) к верховьям Колымы и далее к Индигирке (до 800–1000 и до 1200–1300 м н. ур. м. соответственно). Названные изменения не связаны с вертикальным градиентом летних температур [16, 17, 22], так как к температурному пределу лиственница приближается лишь в верховьях Индигирки [27]. Главная причина формирования верхней границы леса – зимние ветры: их скорость падает от побережья к верховьям Яны и Индигирки, над которыми располагается отрог Сибирского антициклона. Ветер губителен для выступающих из-под снега растений, т. е. имеющих высоту более 5–10 см на наветренных и 50–80 см на подветренных склонах.

В приморской и континентальной частях гиперзоны различаются площади ксероморфных сообществ. На побережье они редки и встречаются на малоснежных склонах южной экспозиции; реликтовых степных видов беспозвоночных животных на них не найдено. В верховьях Колымы площади термофитных сообществ на южных склонах растут, появляются степные и лугово-степные виды растений и беспозвоночных. Наконец, в бассейне Индигирки термофитные сообщества становятся важным элементом ландшафта, а число реликтовых степных видов растений и животных – максимальным для северо-востока Азии. Названные степи приурочены к долинам крупных рек на высотах не более 500–600 м н. ур. м., где в течение 3–4 дек. среднесуточные температуры превышают 15°C .

Таким образом, кедрово-стланиковые заросли и лиственничные редколесья в силу широкой резистентности доминантных видов и шлейфа видов-спутников, с одной стороны, и выровненных на огромном пространстве температурных условий, с другой, формируют гигантскую ландшафтную гиперзону.

Заключение

Соседство с востока и юга с холодными морями, характер рельефа и циклоническая деятельность на большей части северо-востока Азии формируют небольшие широтные градиенты теплообеспеченности. Из 15 показателей в бассейнах верховий Колымы, Индигирки и Яны различаются только средние многолетние даты схода снега (что объясняется разным количеством зимних осадков) и перехода температур через 10°C , причем различия этих показателей меньше, чем их межгодовая изменчивость.

Пояса редколесий в континентальной части и на Охотском побережье идентичны по датам схода снега и температурам мая. Эти показатели вместе с датами перехода температур через 0°C (они совпадают на 75 %) свидетельствуют о значительном сходстве условий в начале теплого сезона в названных субрегионах. Длительность периода вегетации и суммы температур выше 5°C в приморской и континентальной частях гиперзоны совпадают на 60–63 %, а интегральные показатели теплого сезона (суммы температур выше 0° и 10°C) – на 76 и 33 % соответственно.

В наибольшей степени различаются индикаторы пика теплого сезона, коррелирующие между собой: средние и максимальные температуры июля и даты наступления температур выше 10°C . Оценивая названные цифры, надо помнить, что они получены сравнением среднемноголетних данных метеостанций. Учет же вариаций местных климатов увеличивает перекрытие диапазонов и этих показателей теплообеспеченности.

Таким образом, существование гигантской ландшафтной гиперзоны, занятой лиственничными редколесьями и кедрово-стланиковыми зарослями, обязано как широкой валентности доминантных видов и немногочисленного шлейфа видов-спутников, так и условиям теплообеспеченности, выравненным на огромном пространстве. Отмеченные ландшафтные различия Охотского побережья и континентальных районов (выраженность ксероморфных и тундроподобных сообществ и каменноберезняков, высотное положение границы леса) не связаны с летними температурными условиями.

В гиперзону не входит холодная полоса, шириной около 60–100 км, примыкающая к арктическому побережью. Лишь 4 из 15 рассмотренных климатических характеристик этой территории частично совпадают с бассейнами верховий Яны, Индигирки, Колымы и Охотским побережьем.

Проведенный анализ подчеркивает, что при оценке условий обитания биоты на Охотском побережье и в континентальных районах северо-востока Азии следует обращать внимание не только на различия, но на сходство показателей их теплообеспеченности.

Литература

1. Nakamura Y, Krestov P, Omelko A. Bioclimate and zonal vegetation in Northeast Asia: first approximation to an integrated study // *Phytocoenologia*. 2007. Vol. 37 (3–4). P. 443–470. DOI: 10.1127/0340-269X/2007/0037-0443/.
2. Прикладной климатологический справочник Северо-Востока СССР / Под ред. Н.К. Ключкина. Магадан, 1960. 400 с.
3. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1966. Вып. 24, 25, 33. Ч. 2.
4. Справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1968. Вып. 24, 25, 33. Ч. 4.
5. Алисов Б.П. Климат СССР. М.: МГУ, 1956. 127 с.
6. Иванов Н.Н. Пояса континентальности земного шара // Изв. ВГО. 1959. Т. 91, вып. 5. С. 410–423.
7. Васильевский А.П. Календарь природы Северо-Востока СССР. Магадан: Книжное изд-во, 1962. 64 с.
8. Синельникова Н.В., Пахомов М.Н. Сезонная жизнь природы Верхней Колымы. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 329 с.
9. Караушева А.И. Климат и микроклимат района Кодар–Чара–Удокан. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 129 с.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1989–1992. Сер. 3. Вып. 24, 25, 33.
11. Справочник по климату СССР. Устойчивость и точность климатических характеристик. Л.: Гидрометеоздат, 1976. Т. 1. 388 с; Т. 2. 364 с.
12. Васнев С.А. Статистика. М.: МГУП, 2001. 170 с.
13. ВНИИГМИ-МЦД. Температура воздуха (Электронный ресурс). URL: <http://meteo.ru/data/156-temperatura> (дата обращения: 20.02.2019).
14. Расписание погоды RP5 (Электронный ресурс). URL: http://rp5.ru/arkhiv_pogody (дата обращения: 20.02.2019).
15. Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря. М.: Наука, 1966. 66 с.
16. Васильев И.С., Васильев А.И., Торговкин Я.И. Суммы отрицательных и положительных значений температур воздуха и их картографирование на территории Якутии // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 3. С. 35–45.
17. Алфимов А.В. Термический режим верхних слоев почв в экосистемах пояса редколесий бассейна Верхней Колымы // *Пояс редколесий верховий Колымы*. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1985. С. 9–29.
18. Алфимов А.В., Берман Д.И. Климат и микроклимат // *Холодные степи северо-восточной Азии*. Магадан: ИБПС ДВО РАН, 2001. С. 12–32.
19. Атлас СССР / Под ред. Л.Н. Месяцовой. М.: ГУГК, 1984. 256 с.
20. Vasilyeva G.V., Goroshkevich S.N. Crossability of *Pinus sibirica* and *P. pumila* with their hybrids // *Silvae Genetica*. 2013. Vol. 62, Iss. 1–6. P. 61–67. DOI: 10.1515/sg-2013-0008.
21. Abaimov A.P. Geographical distribution and genetics of siberian larch species // *Permafrost Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Dordrecht: Springer. 2010. Vol. 209. P. 41–58. DOI:10.1007/978-1-4020-9693-8_3.
22. Берман Д.И., Алфимов А.В., Мажитова Г.Г. Гидротермические условия существования основных компонентов экосистем северо-востока СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1990. № 6. С. 15–28.
23. Алфимов А.В. Мерзлота и теплообеспеченность почв на северо-востоке Азии // *Вестник СВНЦ*, 2017. № 3. С. 63–72. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(124-131)
24. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. 515 с.
25. Берман Д.И., Алфимов А.В., Мажитова Г.Г., Прокопец М.Е. Роль ветра в дивергенции экосистем с мерзлотными и сезонномерзлыми почвами в северном Охотоморье // *Почвоведение*. 1998. № 5. С. 593–599.
26. Шемберг М.А. Береза каменная. Систематика, география, изменчивость. Новосибирск: Наука, 1986. 174 с.
27. Огуреева Г.Н. Структура высотной поясности растительности гор северо-востока Сибири // *География и природные ресурсы*. 1998. № 2. С. 5–11.

Поступила в редакцию 05.04.2021

Принята к публикации 23.08.2021

Об авторах

АЛФИМОВ Аркадий Васильевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, 685000, ул. Портовая, 18, Магадан, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6493-8183>, e-mail: arcalfimov@gmail.com;

БЕРМАН Даниил Иосифович, профессор, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, 685000, ул. Портовая, 18, Магадан, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2137-1324>, e-mail: dberman@mail.ru.

Алфимов А.В., Берман Д.И. Северо-Восток Азии как температурная гиперзона и ее изменения за последние 60 лет. *Сообщение 1. Температурный режим теплого сезона на северо-востоке Азии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021, Т. 26, № 4. С. 67–81. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-67-81>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-67-81

North-East of Asia as the temperature hyperzone and its alteration over the past 60 years

Communication 1. Temperature regime of a warm season in the North-East of Asia

A.V. Alfimov*, D.I. Berman

Institute of Biological Problems of the North, FEB RAS, Magadan, Russia

**arcalfimov@gmail.com*

Abstract. Distribution of 15 warm season indicators, extensively studied in ecology over the North-East of Asia was studied based on the data from 97 weather stations (w/s) during the years from 1931 to 1960. The continental part of the North-East of Asia and the Okhotsk sea are indistinguishable by May temperature ($-0,5...2,5^{\circ}\text{C}$) and the dates of snowloss (14.05–25.05). Variation of other 9 indicators in the same regions coincided to different extents. The ranges of temperature sums above 0° and 5°C and the dates of temperature transition over 0°C in spring coincided to a higher extent (by 70–75 %) than other parameters. The common parts of the named ranges are 1130–1330 $^{\circ}\text{C}$, 1066–1290 $^{\circ}\text{C}$, and 9–18.05, respectively. The mean July temperatures and the dates of temperature transition over 10°C characterize the continental areas as warmer than coastal ones, while the number of days with temperatures higher than 0°C and the duration of snowless periods characterize the continental areas as colder ones. Almost the entire mountain-forest belt of the North-East of Asia, which is dominated by open larch forest and dwarf pine communities, may be considered as a uniform temperature hyperzone during the warm season. The landscape monotony is explained by the weak gradients of heat supply and by the outstanding ecological resistance of the dominants of vegetation cover.

Keywords: hyperzone, air temperature, warm season, open woodland, North-East of Asia.

Acknowledgements. The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project № 19–04–00312a).

References

1. Nakamura Y., Krestov P., Omelko A. Bioclimate and zonal vegetation in Northeast Asia: first approximation to an integrated study // *Phytocoenologia*. 2007. Vol. 37 (3–4). P. 443–470. DOI: 10.1127/0340-269X/2007/0037-0443/.
2. *Prikladnoy klimatologicheskii spravochnik Severo-Vostoka SSSR* /Pod red. N.K. Klyukina. Magadan, 1960. 400 p.
3. *Spravochnik po klimatu SSSR*. L.: Gidrometeoizdat, 1966. Vyp. 24, 25, 33. Ch. 2.
4. *Spravochnik po klimatu SSSR*. L.: Gidrometeoizdat, 1968. Vyp. 24, 25, 33. Ch. 4.
5. Alisov B.P. *Klimat SSSR*. M.: MGU, 1956. 127 p.
6. Ivanov N.N. Poyasa kontinentalnosti zemnogo shara // *Izv. VGO*. 1959. Vol. 91, Iss. 5. P. 410–423.
7. Vaskovskiy A.P. *Kalendar prirody Severo-Vostoka SSSR*. Magadan: Kn. izd-vo, 1962. 64 p.
8. Sinelnikova N.V., Pakhomov M.N. *Sezonnaya zhizn prirody Verkhney Kolymy*. M.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2015. 329 p.
9. Karausheva A.I. *Klimat i mikroklimat rayona Kodar–Chara–Udokan*. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 129 p.
10. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR*. L.: Gidrometeoizdat, 1989–1992. Ser. 3. Iss. 24, 25, 33.
11. *Spravochnik po klimatu SSSR. Ustoychivost i tochnost klimaticheskikh kharakteristik*. L.: Gidrometeoizdat, 1976. Vol. 1. 388 p; Vol. 2. 364 p.

12. *Vasnev S.A.* Statistika. M.: MGUP, 2001. 170 p.
13. *VNIIGMI-MCD.* Temperatura vozdukha (Elektronnyy resurs). URL:<http://meteo.ru/data/156-temperatura> (data obrascheniya 20.02.2019).
14. *Raspisanie pogody RP5* (Elektronnyy resurs). URL:http://rp5.ru/arkhiv_pogody (data obrascheniya 20.02.2019).
15. *Moroshkin K.V.* Vodnye massy Okhotskogo morya. M.: Nauka, 1966. 66 p.
16. *Vasilev I.S., Vasilev A.I., Torgovkin Ya.I.* Summy otritsatelnykh i polozhitelnykh znacheniy temperatur vozdukha i ikh kartografirovaniye na territorii Yakutii // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2012. No. 3. P. 35–45.
17. *Alfimov A.V.* Termicheskiy rezhim verkhnikh sloev pochv v ekosistemakh poyasa redkolesiy basseyna Verkhney Kolymy // *Poyas redkolesiy verkhoviy Kolymy*. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1985. P. 9–29.
18. *Alfimov A.V., Berman D.I.* Climate i microclimate // *Kholodnye stepi severo-vostochnoy Azii*. Magadan: IBPS DVO RAN, 2001. P. 12–32.
19. *Atlas SSSR* / Pod red. L.N. Mesyatcevoi. M.: GUGK, 1984. 256 p.
20. *Vasilyeva G.V., Goroshkevich S.N.* Crossability of *Pinus sibirica* and *P. pumila* with their hybrids // *Silvae Genetica*. 2013. Vol. 62, Iss. 1–6. P. 61–67. DOI: 10.1515/sg-2013-0008.
21. *Abaimov A.P.* Geographical distribution and genetics of siberian larch species // *Permafrost Ecosystems. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Dordrecht: Springer. 2010. Vol. 209. P. 41–58. DOI:10.1007/978-1-4020-9693-8_3.
22. *Berman D.I., Alfimov A.V., Mazhitova G.G.* Gidrotermicheskie usloviya sushchestvovaniya osnovnykh komponentov ekosistem severo-vostoka SSSR // *Izv. AN SSSR. Ser. geogr.* 1990. No. 6. P. 15–28.
23. *Berman D.I., Alfimov A.V., Mazhitova G.G., Prokopenko M.Ye.* Rol vetra v divergentsii ekosistem s merzlotnymi i sezonnomerzlymi pochvami v severnom Okhotomore // *Pochvovedenie*. 1998. No. 5. P. 593–599.
24. *Alfimov A.V.* Merzlota i teploobespechennost pochv na severo-vostoke Azii // *Vestnik SVNC*. 2017. No. 3. P. 63–72. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-2(124-131).
25. *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir i Dalniy Vostok*. M.: Nedra, 1989. 515 p.
26. *Shemberg M.A.* Bereza kamennaya. Sistematika, geografiya, izmenchivost. Novosibirsk: Nauka, SO. 1986. 174 p.
27. *Ogureeva G.N.* Struktura vysotnoy poyasnosti rastitelnosti gor severo-vostoka Sibiri // *Geografiya i prirodnaya resursy*. 1998. No. 2. P. 5–11.

About the authors

ALFIMOV, Arkady Vasilievich, Cand. Sci. (Geography), leading researcher, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, 18 Portovaya st., Magadan 685000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-6493-8183>, e-mail: arcalfimov@gmail.com;

BERMAN, Daniil Iosifovich, professor, Dr. Sci. (Biology), chief researcher, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, 18 Portovaya st., Magadan 685000, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-2137-1324>, e-mail: dberman@mail.ru.

Citation

Alfimov A.V., Berman D.I. North-East of Asia as the temperature hyperzone and its alteration over the past 60 Years. *Communication 1*. Temperature regime of a warm season in the North-East of Asia // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 67–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-67-81>

Фитоценотическая характеристика сообществ с участием *Alyssum lenense* в долине Средней Лены

Н.С. Данилова, В.В. Семенова*

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

*vvsemenova-8@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена фитоценотическая характеристика степных сообществ с участием весеннецветущего вида *Alyssum lenense* в долине среднего течения р. Лена. Объектами исследования служили 11 сообществ, описанных в 4 точках в разном удалении от г. Якутск в 2019 г. Район исследования характеризуется резко-континентальным климатом, проявляющимся в низких зимних, высоких летних температурах и высокой засушливости (среднее количество осадков за год 192 мм). *Alyssum lenense* является компонентом ковыльных, житняковых, типчаковых, простреловых, замещаюценольных, холоднополюнных степей, развитых на южных склонах коренного берега Лены, а также травянистого яруса разреженных сухих сосновых лесов и их опушек, распространенных в долине реки. Сообщества с участием *Alyssum lenense* отличаются низким видовым разнообразием и включают от 9 до 18 таксонов, относящихся, преимущественно, к степному комплексу видов. В спектре географических элементов преобладают виды с восточными генетическими связями. Среди биоморф наиболее устойчиво представлены стержнекорневые растения и дерновинные злаки, характерные для сухих местообитаний. В сообществах с участием *Alyssum lenense* произрастают виды, занесенные в Красную книгу Республики Саха (Якутия), – находящийся под угрозой исчезновения *Gagea pauciflora*, сокращающие численность популяций *Ephedra monosperma*, *Allium prostratum*, *A. ramosum*, *Krascheninnikovia lenensis* и узколокальный эндем долины Средней Лены *Astragalus lenensis*.

Ключевые слова: *Alyssum lenense*, Центральная Якутия, степи, видовое разнообразие сообществ, Красная книга.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках проекта VI.52.1.8. Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии (0376–2018–0001; рег. номер АААА–А17–117020110056–0).

Введение

Своеобразием растительного покрова Якутии является распространение в зоне тайги изолированных участков степной растительности. Один из наиболее крупных ее очагов расположен на склонах коренного берега и надпойменных террасах р. Лена в среднем течении. Особый интерес здесь представляют степи с участием *Alyssum lenense* Adams – бурачка ленского, яркими желтыми соцветиями которого в весенний период определяется недолговечный аспект сообществ.

Alyssum lenense – весеннецветущий степной вид, реликт плейстоценовых лесостепных ландшафтов, местообитания которого приурочены к степным склонам коренных берегов рек, сухим сосновым лесам и их опушкам. В Якутии встречается довольно широко, в Центральной, Южной и Юго-Западной Якутии, а также на северо-

востоке – в долинах рек Яна и Индигирка. Общий ареал вида охватывает Восточную Европу, Сибирь, Монголию и Северный Китай [1]. В западной части ареала вид встречается реже, в России охраняется и внесен в Красные книги 10 регионов [2, 3].

Цель данной статьи – дать фитоценотическую характеристику сообществ Центральной Якутии с участием *Alyssum lenense*.

Район исследований. Объекты и методы

Полевые работы были проведены 20–25 мая 2019 г. в долине Средней Лены. Климат района исследований резко-континентальный, проявляющийся в низких зимних (средняя в январе –43 °С), высоких летних (средняя в июле +18,8 °С) температурах и высокой засушливости (среднее количество осадков за год 192 мм). Годовая амплитуда

минимальных и максимальных температур в Якутске составляет 102 °С [4].

Объектами исследования служили 11 сообществ с участием *Alyssum lenense*, описанных в 4 точках в разном удалении от г. Якутск вверх по течению. В окр. г. Якутск описаны 6 сообществ, в местности Шестаковка (в 20 км) – 1 сообщество, в окр. с. Улах-Ан (в 50 км) и в окр. с. Немюгюнцы (в 80 км) – по 2.

Видовое сходство сообществ (коэффициент Сёренсена K_s) определено по формуле

$$K_s = \frac{2c}{a + b} \cdot 100,$$

где c – число видов общих для двух сообществ; a , b – число видов в одном и другом. Значения коэффициента Сёренсена оценены по шкале Л.И. Малышева [5].

Результаты исследований

В пределах Центральной Якутии сообщества с участием *A. lenense* распространены в основном на склонах коренного берега р. Лена, чаще южных и юго-восточных, реже их можно встретить на надпойменных террасах, на пологих склонах. Ниже приводим описания изученных сообществ.

1. Верониково-типчакково-ковыльное сообщество, расположено на южном склоне (40°) коренного берега р. Лена в окр. г. Якутск на высоте 15–20 м от подножья. Общее проективное покрытие (далее ОПП) травостоя – 30 %. Проективное покрытие (далее ПП) *Alyssum lenense* – 5 %. Травостой двухъярусный, I ярус (25 см) – *Stipa capillata*, *Pulsatilla angustifolia*, II ярус – (5 см) – *Veronica incana*, *Festuca lenensis*, *Alyssum lenense*. Почва плотная. В состав сообщества входят 16 видов.

2. Житняковая степь в окр. г. Якутск, произрастает на верхнем осыпающемся откосе дороги, пролегающей по южному крутому склону (60°) коренного берега на высоте 7 м от подножья. ОПП травостоя – 60 %, ПП *Alyssum lenense* – 12–15 %. Травостой двухъярусный, I ярус (15–20 см) – *Agropyron cristatum*, *Galium verum*, II ярус (5 см) – *Alyssum lenense*. В состав сообщества входят 14 видов

3. Простреловая степь, расположена в окр. г. Якутск на пологом южном склоне (25°) коренного берега р. Лена на высоте 15–20 м от подножья. ОПП травостоя – 50 %, ПП *Alyssum lenense* – 1–2 %. Травостой двухъярусный, I ярус (25–30 см) – *Pulsatilla angustifolia*, II ярус (5 см) –

Carex duriuscula, *Alyssum lenense*. Почва плотная. В состав сообщества входят 17 видов.

4. Типчакково-простреловая степь, расположена на южном склоне коренного берега р. Лена в окр. г. Якутск, на высоте 80–85 м от его подножья. Участок сверху ограничен соснами, растущими полосой вдоль верхнего края склона. ОПП травостоя – 30 %, ПП *Alyssum lenense* – 10–15 %. Травостой двухъярусный, I ярус (25–30 см) – *Pulsatilla angustifolia*, II ярус (5 см) – *Alyssum lenense*, *Carex duriuscula*. Грунт песчаный, осыпаясь. В состав сообщества входят 11 видов.

5. Замещающеполынная степь, расположена на южном склоне (40°) коренного берега р. Лена в окр. г. Якутск, на высоте 15–20 м от подножья. ОПП травостоя – 30–40 %, ПП *Alyssum lenense* – 7–10 %. Травостой двухъярусный, I ярус (25 см) – *Artemisia commutata*, II ярус (7 см) – *Alyssum lenense*, *Carex duriuscula*. Почва уплотненная. В состав сообщества входят 14 видов.

6. Типчакковая степь, расположена на юго-восточном склоне коренного берега в окр. г. Якутск, на высоте 30 м. Угол наклона 40°. ОПП – 25 %, ПП *Alyssum lenense* – 5 %. Травостой двухъярусный, I ярус (30–35 см) – *Festuca lenensis*, II ярус (5 см) – *Alyssum lenense*, *Astragalus lenensis*. В состав сообщества входят 10 видов.

7. Холоднополынная степь, расположена в окр. р. Шестаковка (район дачного поселка) на южном склоне (20°) коренного берега р. Лена на высоте 3–5 м от подножья. ОПП – 35–40 %, ПП *Alyssum lenense* – 10 %. Травостой двухъярусный, I ярус (30–40 см) – *Artemisia frigida*, *Leymus chinensis*, II ярус (7 см) – *Androsace maxima*, *Alyssum lenense*. В состав сообщества входят 18 видов.

8. Холоднополынная степь, расположена на южном склоне (25–30°) коренного берега р. Лена в окр. с. Немюгюнцы. на высоте 5–25 м от подножья. Травостой разреженный, ОПП травостоя – 16 %, ПП *Alyssum lenense* – 2 %. Травостой двухъярусный, I ярус (20 см) – *Artemisia frigida*, *Festuca lenensis*, II ярус (7 см) – *Androsace septentrionalis*, *Alyssum lenense*. Почва плотная. В состав сообщества входят 11 видов.

9. Замещающеполынная степь, расположена в окр. с. Немюгюнцы (*Artemisia commutata*) на восточном склоне (35°) коренного берега на уровне 15 м. ОПП – 12–18 %; ПП *Alyssum lenense* – 4 %. Травостой двухъярусный, I ярус (25 см) – *Artemisia commutata*, II ярус (7 см)

Carex duriuscula, *Alyssum lenense*. В состав сообщества входят 9 видов.

10. **Сухой сосновый лес**, расположен на расстоянии 100–150 м от автомобильной междугородной трассы Якутск–Покровск в окр. с. Улах-Ан. ОПП травостоя 50 %, ПП *Alyssum lenense* – 1–2 %. Травостой одноярусный. Почва умеренно плотная, под опадом хвои влажная. В состав сообщества входят 16 видов.

11. **Опушка соснового леса**, переходящая на береговой северный склон (10°) озера в окр. с. Улах-Ан. ОПП травостоя – 40 %, ПП *Alyssum lenense* – 10 %. Почва плотная. Травостой одноярусный. В состав сообщества входят 16 видов.

Alyssum lenense – многолетний, стержнекорневой полукустарничек, размножающийся только семенным путем. Подобная биоморфа характерна для сухих степных сообществ. Пик цветения *A. lenense* приходится на конец мая–первую пятидневку июня. Травянистый покров сообществ с участием бурачка в это время весьма разрежен, характеризуется небольшим покровом, так как большинство сопутствующих видов только начинает отрастать. ОПП травостоя сообществ колеблется от 10 до 60 % на разных участках и в среднем составляет 25–30 %. При этом доля ПП бурачка в ОПП составляет от 4 до 50 %, в среднем он формирует около 20 % общего покрытия, что является значительной его частью. Травостой в этот период обычно сложен двумя ярусами, но в период весеннего отрастания растений, когда идет интенсивный их рост и развитие, показатели ярусности динамичны и быстро меняются.

Характеристикой условий местообитания является видовой состав сообществ. Степи с участием *A. lenense* флористически небогаты, видовое разнообразие в конкретных сообществах невысокое и включает по 9–18 видов. Общее число видов во всех описанных сообществах составляет 48, относящихся к 22 семействам и 39 родам (табл. 1). На долю четыре ведущих семейств (*Asteraceae*, *Рoaceae*, *Rosaceae*, *Fabaceae*) приходится 22 вида, что составляет 44,0 % всего ботанического состава сообществ. Насчитывается большое количество семейств (11) и родов (36), представленных в сообществах по одному виду, что свидетельствует об экстремальности условий. Родов, представленных максимальным числом видов – тремя, – всего два, *Artemisia* и *Potentilla*.

Наиболее часто встречается *Artemisia comutata*, вид отмечен в 9 сообществах из 11 опи-

санных, в семи–восьми фитоценозах – отмечены три вида (*Potentilla bifurca*, *Carex diriuscula* и *Pulsatilla angustifolia*), что связано с их конкурентным преимуществом в сухих степных сообществах. Большое количество видов – 29 – отмечены лишь в одном–двух сообществах. Сообщества с участием *A. lenense* разнообразны и не обнаруживают большого видового сходства, в целом коэффициент Сёренсена колеблется от слабого до среднего, от 11,7 до 60,0, что характерно для сухих степей. Наибольшее сходство среди них проявили сообщества 7 и 8 ($K_s = 55,1$) – одноименные холоднополюнные в окр. Шестаковки и с. Немюгюнцы, а также сообщества, произрастающие в относительно одинаковых условиях, в окр. с. Немюгюнцы это сообщества 8 и 9 ($K_s = 60,0$) и в окр. с. Улах-Ан сообщества 10 и 11 ($K_s = 56,2$). Высокую степень сходства ($K_s = 68,0$) проявили только сообщества 5 и 9 – это одноименные замещающеполюнные ассоциации, произрастающие в окр. г. Якутск и с. Немюгюнцы.

Об экстремальности условий свидетельствуют и показатели систематического разнообразия сообществ – соотношения количества видов и семейств, количества родов и семейств [6]. Значения их в изученных сообществах невысоки и составляют соответственно 2,23 и 1,77, что обусловлено жесткими условиями, проявляющимися в сочетании высоких летних температур и крайней засушливости.

Особенностью весенних сообществ является присутствие в них эфемеров и эфемероидов. Эфемеры *Androsace maxima*, *A. septentrionalis*, *Draba nemorosa* в конце июня заканчивают свою жизнедеятельность и самый жаркий и засушливый период в Центральной Якутии переживают в виде семян. Эфемероиды представлены *Gagea pauciflora*, луковичным геофитом, вегетация которого ограничивается также 50–60 днями. Его развитие начинается с освобождением участка от снега (конец апреля–начало мая) и продолжается до середины июня. После вегетации жизненные процессы в подземной части растений не приостанавливаются, в летние месяцы интенсивно идет формирование замещающего побега будущего года.

Значительную часть ботанического состава ранневесенних сообществ (41 %) составляют виды с зимующими зелеными листьями. Явление зимнезелености листьев довольно распространено в якутской флоре, и многие авторы

Таблица 1

 Видовой состав сообществ с участием *Alyssum lenense*

Table 1

 Species composition of the communities with the participation of the *Alyssum lenense*

Вид Species	Сообщества Communities										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Beauv.		+				+					
<i>Agrostis trinii</i> Turcz.				+	+						+
<i>Allium prostratum</i> Trev.							+				
<i>Allium ramosum</i> L.	+										
<i>Alyssum lenense</i> Adams	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Androsace maxima</i> L.	+						+				
<i>Androsace septentrionalis</i> L.	+			+				+		+	+
<i>Artemisia commutata</i> Bess.		+	+	+	+	+	+		+	+	+
<i>Artemisia frigida</i> Willd.	+		+	+	+	+	+	+			
<i>Artemisia pubescens</i> Ledeb.	+	+									
<i>Aster alpinus</i> L.										+	
<i>Astragalus lenensis</i> Shemetova, Schaulo et Lomonosova						+		+	+		
<i>Astragalus syriacus</i> L.			+				+				+
<i>Betula pendula</i> Roth.		+									
<i>Campanula rotundifolia</i> L.										+	
<i>Carex diriuscula</i> C.A. Mey.		+			+	+	+		+	+	+
<i>Carex pediformis</i> C.A. Mey.			+							+	
<i>Dianthus versicolor</i> Fisch. ex Link	+										
<i>Draba nemorosa</i> L.				+							
<i>Ephedra monosperma</i> C.A. Mey.											+
<i>Eritrichium sericeum</i> (Lehm.) DC.			+							+	
<i>Euphorbia esula</i> L.	+			+	+		+				
<i>Festuca lenensis</i> Drob.	+		+	+		+		+			
<i>Gagea pauciflora</i> (Turcz. ex Trautv.) Ledeb.							+				
<i>Galium verum</i> L.	+	+	+		+					+	
<i>Goniolimon speciosum</i> (L.) Boiss.		+			+			+	+		+
<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers.	+					+	+	+	+		
<i>Krascheninnikovia ceratoides</i> (L.) Gueldenst.								+			
<i>Lappula squarrosa</i> (Retz.) Dumort.					+			+	+		
<i>Leymus chinensis</i> (Trin.) Tzvel.							+				
<i>Linaria acutiloba</i> Fisch. ex Reichenb.	+		+		+						
<i>Mulgedium sibiricum</i> Cass. ex Less.		+									
<i>Onobrychys arenaria</i> (Kit.) DC.			+			+	+				+
<i>Peucedanum baicalense</i> (Redow. ex Willd.) W. Koch.										+	+
<i>Phlox sibirica</i> L.		+								+	
<i>Pinus sylvestris</i> L.				+						+	+
<i>Potentilla bifurca</i> L.		+	+	+	+		+	+	+		+
<i>Potentilla multifida</i> L.					+						

Вид Species	Сообщества Communities										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>Potentilla nivea</i> L.	+		+							+	+
<i>Pulsatilla angustifolia</i> Turcz.	+	+	+	+	+	+	+			+	
<i>Rosa acicularis</i> Lindl.			+								
<i>Scorzonera radiata</i> Fisch. ex Ledeb.			+				+				
<i>Serratula marginata</i> Tausch.							+	+			
<i>Silene amoena</i> L.		+									
<i>Stipa capillata</i> L.	+										
<i>Taraxacum dissectum</i> (Ledeb.) Ledeb.		+					+				+
<i>Thymus sibiricus</i> (Serg.) Klok. et Des.-Shost.			+		+				+	+	+
<i>Veronica incana</i> L.	+		+				+			+	+
Число видов в сообществе Total number of species in the community	16	14	17	11	14	10	18	11	9	16	16

рассматривают его как приспособительный признак к условиям короткого вегетационного периода [7–9], благодаря которому удлиняется срок ассимиляции за счет ранневесенних и позднелетних периодов.

Крайними аридными условиями Центральной Якутии обусловлен экологический спектр видового состава сообществ с участием *Alyssum lenense*, основную часть которого занимают ксерофиты и мезоксерофиты – 47,9 % и 39,6 % соответственно (табл. 2).

Биоморфологический анализ растений изученных сообществ показал богатый состав жизненных форм. Наиболее представлены стержнекорневые, плотнодерновинные и короткокорневищные растения. Но если рассматривать по отдельным сообществам, то представленность короткокорневищных видов в них колеблется от полного отсутствия (сообщества 4 и 9) до 25 %. В отличие от этого, стержнекорневые растения и дерновинные злаки устойчиво присутствуют во всех сообществах, составляя, соответственно, 18–31 и 12–50 % их видового состава. Эти биоморфы характерны для сухих местообитаний, благодаря их способности использовать влагу из разных горизонтов почвы, в том числе и более глубоких. Также в сообществах отмечены луковичные растения, полукустарники и полукустарнички, способные хорошо переносить засуху (см. табл. 2).

В сообществах с участием *Alyssum lenense* достаточно высоко разнообразие географических элементов (см. табл. 2). В целом, в фитоценозах представлены виды, обладающие 10 типами ареа-

лов. Среди них наиболее многочисленна евразийская группа (27,4 %), достаточно азиатских (13,7) и восточно-сибирских видов (14,5), ощущается доля видов с сибирско-монгольским ареалом (9,8), а также с евразийско-американскими и азиатско-североамериканскими связями (10,4). Но в целом наблюдается преобладание видов с восточными генетическими связями. Эндемичный вид – 1, это *Astragalus lenensis*, эндем степных сообществ Центральной Якутии (см. табл. 2), реликт, о чем свидетельствуют небольшой ареал и приуроченность его местообитаний к древним субстратам.

Что касается поясно-зонального спектра видов, то вполне логично, что преобладающая часть видов изученных сообществ (77,1 %) относится к степному комплексу видов, основу которых составляют виды, принадлежащие к собственно степной, лесостепной горно-степной и пустынно-степной группам. Из них первые две группы наиболее многочисленны, и всего одним–тремя видами представлены горно-степная, пустынно-степная. Доля видов лесного комплекса видов – 22,9 % (см. табл. 2).

Значительную долю (6 видов, 12,5 %) всего ботанического разнообразия сообществ с участием *Alyssum lenense* составляют виды, нуждающиеся в охране. Наиболее уязвимый из них – плейстоценовый реликт *Gagea pauciflora*, находящийся под угрозой исчезновения, якутская часть ареала которого изолирована от основного [10]. Большой интерес представляет третичный реликт *Krascheninnikovia ceratoides*, про-

Таблица 2

Эколого-морфологический спектр видового состава сообществ с участием *Alyssum lenense*

Table 2

Ecological and morphological spectrum of the species composition of the communities with the participation of the *Alyssum lenense*

Группы растений Groups plants	Общее число видов Total number of species	Число видов в сообществах Number of species in communities										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Экологический спектр Ecological spectrum												
Ксерофиты / Xerophytes	23	10	9	8	5	7	8	12	9	8	7	8
Мезоксерофиты / Mesoxerophytes	19	7	3	9	9	6	2	6	2	1	7	6
Ксеромезофиты / Xeromesophytes	4	—	1	—	2	1	—	—	—	—	2	2
Мезофиты / Mesophytes	2	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—
Биоморфологический спектр Biomorphological spectrum												
Деревья / Trees	2	—	1	—	2	—	—	—	—	—	1	1
Кустарники / Shrubs	2	—	—	1	2	—	—	—	—	—	—	1
Полукустарники, полукустарнички/ Semi-shrubs	6	1	1	3	2	2	2	3	4	2	—	2
Травы многолетние: Perennial herbs:												
длиннокорневищные / long-rhizome	5	2	3	2	—	2	—	1	—	—	1	—
ползучие/creeping	2	—	—	2	—	1	—	—	—	1	2	1
короткокорневищные / short rhizome	9	4	3	4		1	1	3	1		4	3
плотнoderновинные / dense sod	7	3	2	2	3	3	5	3	2	2	3	2
стержнекорневые/ taproot	8	3	4	3	3	4	2	5	2	3	3	5
луковичные/ bulbous	3	1	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—
Травы однолетние / Annual herbs	4	2	—	—	—	1	—	1	2	1	1	1
Ареалогический спектр Arealogical spectrum												
Голарктический / Holarctic	6	2	2	2	4	2	1	1	2	—	1	2
Евразийский /Eurasian	13	7	3	8	3	6	1	5	3	4	6	6
Евросибирский / Eurosiberian	3	—	2	1	1	1	1	1	—	1	2	1
Азиатскоамериканский/ Asian American	3	1	1	1	—	1	1	1	—	—	3	2
Азиатский / Asiatic	8	—	2	—	—	2	4	6	1	1	2	2
Восточноазиатский / East Asian	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—
Сибирско-монгольский/ Siberian-Mongolian	5	2	1	1	1	1	1	4	1	—	—	—
Сибирский / Siberian	8	4	3	4	2	1	—	—	3	1	2	2
Якутский / Yakut	1	—	—	—	—	—	1	—	1	1	—	—

Группы растений Groups plants	Общее число видов Total number of species	Число видов в сообществах Number of species in communities										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Поясно-зональные группы Belt-zone groups												
Собственно степные / Steppe proper	12	4	5	2	2	5	3	5	3	4	3	6
Горностепные / Mountain steppe	3	1	–	1	–	1	–	1	–	–	1	–
Пустынно-степные / Desert-steppe	2	–	–	–	–	–	1	–	2	1	–	1
Лесостепные / Forest-steppe	20	9	5	11	6	6	6	10	6	3	9	7
Светлохвойные лесные/ Light coniferous forest	10	2	3	3	3	2	–	2	–	1	3	2
Пребореальные / Preboreal	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Всего / Total	48	16	14	17	11	14	10	18	11	9	16	16

никший в Якутию в ксеротермический период, и в настоящее время на склонах древних надпойменных террас, сложенных кембрийскими гипсоносными глинами, вид формирует опустыненные терескеновые степи [11]; компонентом этих степей является эндемичный полукустарник *Astragalus lenensis*. Занесен в Красную книгу РС(Я) [10] и представитель монотипного семейства Ephedraceae *Ephedra monosperma*, предки которого были широко представлены в палеогене на северо-востоке Азии. Дальнейшее ухудшение климата способствовало их замещению холодостойкими видами, и в результате гибридизации видов секций *Monosperma* и *Ephedra* возник *E. monosperma*, выживший в суровых условиях Якутии [12]. Также подлежат охране два вида лука *Allium prostratum* и *A. ramosum* [10].

Выводы

1. *Alyssum lenense* является компонентом ковыльных, житняковых, типчаковых, простреловых, замещающеполынных, холоднополынных степей, развитых на южных склонах коренного берега р. Лена в среднем ее течении, а также вид встречается под пологом разреженных сухих сосновых лесов и их опушек. Сообщества с участием *A. lenense* разнообразны и не обнаруживают большого видового сходства, в целом коэффициент Сёренсена колеблется от слабого до среднего, от 11,7 до 60,0.

2. Видовой состав степных сообществ с участием *Alyssum lenense* в долине р. Лена отличается невысоким разнообразием и, в целом, включает 48 видов, объединенных в 39 родов и 29 се-

мейств. Ботаническое разнообразие конкретных сообществ составляет от 9 до 18 видов.

3. Биоморфологический спектр растений изученных сообществ показал разнообразие составляющих его жизненных форм. Наиболее устойчиво представлены во всех изученных сообществах стержнекорневые растения и плотнотерновинные злаки, характерные для сухих местообитаний.

4. Ботанический состав изученных сообществ сложен преимущественно видами степного комплекса; среди географических элементов преобладают виды с восточными генетическими связями.

5. Изученные сообщества богаты реликтовыми видами, значительная часть которых (6 видов, 12,5 %) нуждается в охране и внесена в Красную книгу РС(Я).

Литература

1. Флора Сибири. Berberidaceae–Grossulariaceae. Т. 7. Новосибирск: Наука, 1994. 312 с.
2. Ефимик Е.Г., Зенкова Н.А. Бурачок ленский (*Alyssum lenense* Adams, Brassicaceae) в Пермском крае // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2016. Вып. 1. С. 7–11.
3. Лысенко Т.М., Иванова А.В., Трантина Е.В., Васюков В.М. Новые флористические находки в Самарской, Саратовской и Ульяновской областях // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2018. № 3. С. 71–77.
4. Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. Якутск: Кн. изд-во, 1973. 120 с.
5. Малышев Л.И. Флористические спектры Советского Союза // История флоры и растительности Евразии. Л.: Наука, 1972. С. 17–40.

6. Бурдуковская Г.В., Аненхонов О.А. Флора бассейна реки Иволги и ее антропогенные изменения (Западное Забайкалье). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2009. 267 с.

7. Тихомиров Б.А. Очерки по биологии растений Арктики. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 154 с.

8. Гаврилюк В.А. К биологии растений юго-востока Чукотского полуострова // Приспособление растений Арктики к условиям среды. М: Наука, 1966. С. 226–266.

9. Серебрякова Т.И. Некоторые итоги ритмологических исследований в разных ботанико-географиче-

ских зонах СССР // Проблемы экологической морфологии растений. М.: Наука, 1976. С. 216–239.

10. Красная книга Республика Саха (Якутия). Т. 1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / Отв. ред. Н.С. Данилова. М.: Реарт, 2017. 412 с.

11. Караваев М.Н. Новые данные о терескене *Eurotia lenensis* Kumin. // Бот. мат. Гербария БИН им. В.Л. Комарова. Л.: Изд. АН СССР, 1955. Т. 17. С. 112–121.

12. Пешкова Г.А. К происхождению рода *Ephedra* L. (Ephedraceae) // Turczaninowia, 2005. № 8 (2). С. 54–68.

Поступила в редакцию 17.08.2021

Принята к публикации 07.10.2021

Об авторах

ДАНИЛОВА Надежда Софроновна, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, профессор, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,

<http://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, e-mail: nad9.5@mail.ru;

СЕМЕНОВА Варвара Васильевна, старший научный сотрудник, кандидат биологических наук, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,

<http://orcid.org/0000-0002-1473-3614>, e-mail: vvsemenova-8@yandex.ru.

Информация для цитирования

Данилова Н.С., Семенова В.В. Фитоценотическая характеристика сообществ с участием *Alyssum lenense* в долине Средней Лены // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 82–90. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-82-90>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-82-90

Phytocenotic characteristics of the communities with participation of the *Alyssum lenense* in the Lena River valley

N.S. Danilova, V.V. Semenova*

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

*vvsemenova-8@yandex.ru

Abstract. The phytocenotic characteristic of the steppe communities with the participation of the spring-blooming species *Alyssum lenense* in the middle reaches of the Lena River valley is considered. The objects of the study were 11 communities, described at 4 locations at different distances from Yakutsk in 2019. The species similarity of the communities (Sørensen coefficient K_s) was determined by the formula $K_s = 2c / (a+b) \cdot 100$. The study area is characterized by a sharply continental climate, which manifests itself in low winter, high summer temperatures and high aridity (average annual rainfall is 192 mm). The *Alyssum lenense* species is a component of feather stipas, agropyrons, festucas, pulsatillas, artemisiacommutatas, artemisiafrigidas, developed on the southern slopes of the Lena River valley, as well as the grassy layer of the sparse dry pinus forests and their edges, common in the river valley. Communities with the

Alyssum lenense participation are of low diversity and include 9 to 19 species. The species diversity of the studied communities is predominantly represented by species of the steppe complex; species with oriental genetic ties predominate. In the biomorph spectrum, rooted plants and turfy cereals, characteristic of dry habitats, are most steadily represented. In the communities with the participation of *Alyssum lenense*, species listed in the Red Book of the Republic of Sakha (Yakutia) grow – endangered species *Gagea pauciflora*, reducing the number of populations – *Ephedra monosperma*. *Allium prostratum*, *A. ramosum*, *Krascheninikovia lenensis*, and the narrow-local endemic of middle reaches of the Lena River valley – *Astragalus lenensis*.

Keywords: *Alyssum lenense*, Central Yakutia, steppes, the species diversity of the communities, the Red Book.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of project VI.52.1.8. Fundamental and applied aspects of studying the diversity of the flora of North and Central Yakutia (0376–2018–0001; registration number AAAA–A17–117020110056–0).

References

1. *Flora Sibiri. Berberidaceae-Grossulariaceae*. Vol. 7. Novosibirsk: Nauka, 1994. 312 p.
2. Efimik E.G., Zenkova N.A. Burachok lenskij (*Alyssum lenense* Adams, Brassicaceae) v Permskom krae // Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Biologiya. 2016. Iss. 1. P. 7–11.
3. Lysenko T.M., Ivanova A.V., Trantina E.V., Vasyukov V.M. Novye floristicheskie nakhodki v Samarskoj, Saratovskoj i Ulyanovskoj oblastyakh // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. 2018. No. 3. P. 71–77.
4. Gavrilova M.K. Klimat Tsentralnoj Yakutii. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1973. 120 p.
5. Malyshev L.I. Floristicheskie spektry Sovetskogo Soyuza // Istoriya flory i rastitelnosti Evrazii. L.: Nauka, 1972. P. 17–40.
6. Burdukovskaya G.V., Anenkhonov O.A. Flora bassejna reki Ivolgi i ee antropogennye izmeneniya (Zapadnoe Zabajkale). Ulan-Ude: Izd-vo BNTS SO RAN, 2009. 267 p.
7. Tikhomirov B.A. Ocherki po biologii rastenij Arktiki. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1963. 154 p.
8. Gavriljuk V.A. K biologii rastenij yugo-vostoka Chukotskogo poluostrova // Prispособlenie rastenij Arktiki k usloviyam sredy. M: Nauka, 1966. P. 226–266.
9. Sepebryakova T.I. Hekotorye itogi ritmologicheskikh issledovanij v raznykh botaniko-geograficheskikh zonakh SSSR // Problemy ekologicheskoy morfologii rastenij. M.: Nauka, 1976. P. 216–239.
10. Krasnaya kniga Respubliki Sakha (Yakutiya). Vol. 1: Redkie i nakhodyashchiesya pod ugrozoy ischeznoveniya vidy rastenij i gribov / Otv. red. N.S. Danilova. M.: Reart, 2017. 412 p.
11. Kapavaev M.N. Novy'e dannye o tereskene *Eurotia lenensis* Kumin. // Bot. mat. Gerbariya BIN im. V.L. Komarova. L.: Izd. AN SSSR, 1955. Vol. 17. P. 112–121.
12. Peshkova G.A. K proiskhozhdeniyu roda *Ephedra* L. (Ephedraceae) // Turczaninowia, 2005. No. 8 (2). P. 54–68.

About the authors

DANILOVA, Nadezhda Sofronovna, chief researcher, Dr. Sci. (Biology), professor, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-6532-7977>, e-mail: nad9.5@mail.ru;

SEMEANOVA, Varvara Vasiljevna, senior researcher, Cand. Sci. (Biology), Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1473-3614>, e-mail: vvsemenova-8@yandex.ru.

Citation

Danilova N.S., Semenova V.V. Phytocenotic characteristics of the communities with participation of the *Alyssum lenense* in the middle reaches of the Lena River valley // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 82–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-82-90>

К вопросу разработки теста отбора вахтовиков для работы на Севере на основе определения метаболомного профиля плазмы крови, на примере работников водного транспорта

О.Н. Колосова^{1,*}, Е.З. Засимова², И.В. Слепцов¹, А.С. Гольдерова³, Б.М. Кершенгольц¹

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

²Институт физической культуры и спорта Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

³Клиника Мединститута Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

*kololgonik@gmail.com

Аннотация. Проведено проспективное когортное исследование влияния длительного навигационного периода на метаболомный профиль плазмы крови вахтовых работников (речников) в условиях Крайнего Севера. На основе добровольного письменного информированного согласия в исследовании приняло участие 53 работника водного транспорта Республики Саха (Якутия), прибывших из других регионов России и СНГ. Обследование проведено до навигации (весна) и после (осень). Идентификацию и определение концентрации метаболитов в образцах плазмы крови проводили методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС). Анализ данных метаболомного профиля плазмы крови проводили на базе платформы MetaboAnalyst (V5.0). Результаты исследований метаболомного профиля плазмы крови у речников выявили достоверные различия как в качественном, так и в количественном составе метаболитов до начала навигации (весна) и после ее окончания (осень). Осенью, после длительной навигации в 1,81 раза увеличивается доля речников со срывом адаптации, что указывает на значительное снижение адаптационных резервов во время навигации. В крови в этой группе речников повышается уровень 5-оксипролина. Повышенное содержание рибоновой кислоты в сыворотке крови весной является свидетельством высокого адаптивного потенциала человека, способности организма отработать длительную вахту на северном речном флоте без истощения адаптационного резерва, т. е. без ущерба для здоровья. Полученные результаты позволяют предложить метаболомный тест, в первую очередь, содержание рибоновой кислоты в плазме крови, в качестве теста отбора вахтовиков для работы в условиях Арктики и Субарктики.

Ключевые слова: Сибирская платформа, адаптация, экстремальные условия, вахтовый труд, водный транспорт, метаболомный профиль плазмы крови, метод главных компонент, Арктика, ГХ-МС.

Благодарности. Исследование было проведено в рамках проектов: «Исследование хронофизиологических, молекулярных механизмов адаптации и психоэмоционального напряжения человека в условиях сочетанного действия экстремальных климатических, техногенных факторов в Арктике и Субарктике и пандемии, постпандемии, разработка способов повышения адаптивного потенциала» (№ FWRS-2021-0043 регистрационный номер 121021600269-0) ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»; «Физиолого-биохимические механизмы адаптации растений, животных, человека к условиям Арктики/Субарктики и разработка биопрепаратов на основе природного северного сырья, повышающих эффективность адаптационного процесса и уровень здоровья человека в экстремальных условиях среды» (№ 0297-2021-0025 регистрационный номер АААА-А21-121012190035-9) Института биологических проблем криолитозоны «ФИЦ ЯНЦ СО РАН»; проекта № 6 КНИ-2 «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 экоформ растений и аборигенных видов животных»; технологического проекта НОЦ Мирового

уровня: Север: территория устойчивого развития № 8 «Биотехнологии глубокой переработки уникального северного, экологически чистого, воспроизводимого биосырья».

Введение

В последние годы растет количество исследований метаболического профилирования биологических жидкостей с целью поиска новых биомаркеров заболеваний, в том числе социально-значимых болезней, включая сердечно-сосудистые, онкологические, нейродегенеративные, раннего риска невынашивания беременности и изучения развивающихся при этом в организме патологических процессов [1–3]. Так, например, сравнительный анализ метаболитов крови до и после физической нагрузки пациентов, 50 % из которых страдали ишемией, показали достоверные различия в уровне 6 метаболитов цикла лимонной кислоты [1]. При сравнении метаболомного профиля здоровых людей и пациентов с острой почечной недостаточностью наблюдали различия в уровне ацилкарнитинов, аминокислот и лизофосфатидилхолинов [2]. Результаты такого рода проведенных исследований позволяют сделать вывод о высокой диагностической чувствительности и специфичности метаболомного профиля плазмы крови.

Вместе с тем, кроме диагностики уже развившихся заболеваний метаболомный профиль плазмы крови может служить для оценки риска развития болезни в будущем за счет снижения адаптационных резервов организма при влиянии на него экологических факторов различной природы.

С целью идентификации и количественного измерения всех детектируемых метаболитов человеческого организма в 2004 г. был начат Human Metabolome Project (HMP) (<http://www.hmdb.ca>). Позднее была создана база данных метаболитов сыворотки крови (Serum Metabolome Database (SMDb), <http://www.serummetabolome.ca>). Метаболом – это совокупность низкомолекулярных веществ (метаболитов) организма (интермедиатов, субстратов, продуктов биохимических реакций), которые служат «строительным материалом» для синтеза макромолекул, биоэнергетическим сырьем, являются конечными продуктами обмена веществ в организме. Внутриклеточные метаболиты находятся в постоянном динамическом равновесии с метаболитами биологических жидкостей, которые омывают клетки. Поэтому любые изменения метаболизма, в том числе те, которые обеспечивают адаптивный ответ на дей-

ствие внешних факторов, отражаются в изменяющемся составе крови. Анализируя полученные метаболические профили плазмы крови, можно получить специфический «отпечаток», отражающий физиологическое состояние организма.

Важное значение приобретают метаболомные исследования при изучении механизмов адаптации человека к новым экологическим условиям. Стрессогенность природных северных климато-геофизических факторов может повышаться по отношению к тем людям, которые приезжают на Север из регионов с умеренным климатом и работают в специфических условиях, в частности, на водном транспорте. Труд всех членов экипажа корабля характеризуется высоким психоэмоциональным напряжением, монотонностью и нерегулярной сменностью. К факторам внешней среды, которые вызывают психоэмоциональное стрессирование человека, находящегося длительное время в плавании на корабле, относятся длительное пребывание в замкнутом пространстве, качка, смена климатических поясов, долгий суточный световой период летнего «полярного дня», перепады барометрического давления. Круглосуточно, поскольку зоны труда и отдыха совпадают, действуют на организм такие неблагоприятные условия, как шум, вибрации, создаваемое корпусом судна постоянное действие магнитного поля и др. [4–6]. Показано, что с увеличением возраста и стажа работы в организме специалистов водного транспорта, работающих в северном регионе, снижается активность этерификации холестерина, увеличивается дисбаланс показателей транспортной системы липидов и углеводного обмена [7, 8]. Усиление липидного обмена, необходимого для адаптации к климатогеографическим условиям Севера, при недостаточном восполнении резервов организма может приводить к предпатологическим изменениям в организме [9–12].

Таким образом, изучение особенностей метаболических процессов у пришлого населения, работающего в отрасли водного транспорта Якутии, является актуальной задачей для разработки критериев отбора лиц для вахтовой работы в условиях Арктики и Субарктики, профилактических мероприятий по раннему выявлению групп риска.

Целью настоящей работы является исследование влияния длительного навигационного периода (весна–осень) на метаболомный профиль плазмы крови вахтовых работников (речников) в условиях Крайнего Севера.

Материалы и методы

Проведено проспективное когортное исследование, в котором на основе добровольного письменного информированного согласия приняло участие 53 работника водного транспорта Республики Саха (Якутия), прибывших из других регионов России и СНГ. Обследование проведено до (весна) и после (осень) рейса во время плановых периодических медицинских осмотров. Средний возраст обследуемых составил $46,08 \pm 1,35$ года. В зависимости от стажа проживания в Якутии они распределились следующим образом: до 1 года – 3,8 %; до 5 лет – 1,9; от 10 до 15 лет – 1,9; от 15 до 20 лет – 13,5; 20 лет и более – 78,9 %. Кровь для исследования забирали из локтевой вены в утренние часы натощак. Исследование проводилось в полном соответствии с этическими рекомендациями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации и «Основами законодательства РФ об охране здоровья граждан» (1993 г.) на основании одобренного Комитетом по биомедицинской этике ЯНЦ КМП СО РАН Протокола исследования.

Идентификацию и определение концентрации метаболитов в образцах плазмы крови проводили методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС) [13]. Для метаболомного анализа 100 мкл сыворотки крови экстрагировали в 1 мл метанола в течение суток. Полученный экстракт выпаривали при 40 °С на роторном испарителе, сухой остаток растворяли в 50 мкл раствора трикозана в пиридине. Для получения летучих триметилсилил-производных (ТМС) проводили дериватизацию с использованием 50 мкл N,O-бис-(триметилсилил)трифторацетамида (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 °С до 320 °С со скоростью 4 °С/мин при потоке газа (гелий) 1 мл/мин. Сбор данных осуществляли с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation. Количественную интерпретацию хроматограмм прово-

дили методом внутренней стандартизации по углеводороду C23. Обработка и интерпретация масс-спектрометрической информации проводилась с использованием стандартной библиотеки NIST 2011.

Анализ данных метаболомного профиля плазмы крови проводили на базе платформы MetaboAnalyst (V5.0) <https://www.metaboanalyst.ca>. Были использованы многомерные методы: анализ главных компонент (PCA – principal component analysis) и частичный дискриминантный анализ методом наименьших квадратов (PLS-DA). Метод PCA, или многофакторный анализ, основанный на методах проекции, был использован для оценки статистической дифференциации между группами в различные сезоны (весна/осень) и для биохимической интерпретации. Этот метод позволяет увидеть систематические изменения во всех образцах крови и выявляет основные выбросы, которые, в свою очередь, отображают взвешенную разность между наблюдаемыми группами. Эти выбросы являются уникальными для исследуемых групп. Статистическую обработку результатов также проводили с использованием программы «StatPlus 2007». При оценке всей совокупности вычислялись средние значения (M) и значения средних ошибок средних арифметических (m). Оценку значимости различий средних величин сравнивали по критерию Стьюдента. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез принимали при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования метаболома крови человека методом ГХ-МС в плазме крови обследованных речников было идентифицировано 64 низкомолекулярных соединения (см. таблицу). Показано, что в течение длительного навигационного периода (весна–осень) 25 метаболитов крови работников водного транспорта статистически достоверно отличались друг от друга (см. таблицу).

Проведен метаболомный анализ плазмы крови людей перед прибытием весной на вахту и осенью после ее завершения. Для статистического анализа полученных метаболомных данных была создана матрица, в которой отражены метаболомные профили сыворотки крови людей в исследованные периоды. Она включает 100 наблюдений по 64 метаболитам.

В результате проведенного анализа метаболитов методом главных компонент (PCA) и дискри-

**Содержание некоторых метаболитов в плазме крови речников
до (весна) и после (осень) плавательного сезона, мкг/мл**

**The content of some metabolites in the blood plasma of river workers
before (spring) and after (autumn) the swimming season, mcg / ml**

Метаболит	Name of the metabolite	Сезон / Season	
		Весна/Spring	Осень/Autumn
Валин	Valine	6,8±0,1	25,1±3,1*
6-амино-1-гексанол	6-Amino-1-hexanol	9,3±0,1	5,6±0,1*
Мочевина	Urea	152±3	297±11*
Лейцин	Leucine	1,9±0,1	2,8±0,1*
Подокарпа-5,8,11,13-тетраен-7-он, 13-гидрокси-14-изопропил	Podocarpa-5,8,11,13-tetraen-7-one, 13-hydroxy-14-isopropyl	2,6±0,1	13,3±0,6*
Глицериновая кислота	Glyceric acid	47±6	60±3**
Дигидроурацил	Dihydrouracil	6,8±1,6	15,6±2,4*
3-дезокситетрановая кислота	3-Deoxytetronic acid	6,0±0,9	11±2,1**
3,4-дигидроксипентановая кислота	3,4-Dihydroxybutanoic acid	9,3±0,5	13,8±1,3*
Аспарагиновая кислота	Aspartic acid	5,2±1,3	12,2±2,5**
5-оксипролин	5-Oxoproline	13,3±1,2	28,2±2,3*
цис-4-аминоциклогексанкарбоновая кислота,	cis-4-Aminocyclohexanecarboxylic acid,	4,6±0,5	8,5±1,7**
4,6-диоксогептановая кислота	4,6-Dioxoheptanoic acid	5,0±1,2	10,3±1,6*
2-аминогептандиовая кислота	2-Aminoheptanedioic acid	1,7±0,2	4,2±1,2**
Глютаминовая кислота	Glutamic acid	1,8±0,6	7,8±2,2*
2,3,4,5-тетрагидроксипентановая кислота	2,3,4,5-Tetrahydroxypentanoic acid	2,5±0,4	4,3±0,7**
Рибоновая кислота	Ribonic acid	11,9±2,5	3,0±1,9*
Фосфорная кислота	Phosphoric acid	284±65	541±32*
D-фруктоза	D-Fructose	3,3±0,5	6,7±0,8*
α-D-маннопираноза	α-D-Mannopyranose	12,1±2,3	5,9±1,7**
Простагландин D	Prostaglandin D	2,7±0,8	8,6±1,4*
Глюконовая кислота	Gluconic acid	13,1±4,2	30,7±6,1**
Глюкопираноза	Glucopyranose	54±9	21±8*
7,10,13-эйкозатриеновая кислота	7,10,13-Eicosatrienoic acid	5,5±1,6	11,5±2,2**
Простагландин E2	Prostaglandin E2	16,5±2,2	22,9±1,3**

* Различия статистически значимы по сравнению с контролем при $p \leq 0,01$, $n = 53$.

** Различия статистически значимы по сравнению с контролем при $p \leq 0,05$, $n = 53$.

* Differences are statistically significant compared to control at $p \leq 0.01$, $n = 53$.

** Differences are statistically significant compared to control at $p \leq 0.05$, $n = 53$.

минантного анализа с использованием частных наименьших квадратов (PLS-DA) были выявлены (рис. 1) достоверные различия в метаболомном профиле плазмы крови до начала навигации (весной) и в конце вахтового периода (осень), т. е. метаболомный профиль тесно связан с периодом навигации.

Для выяснения того, по каким основным метаболитам выявлено наибольшее различие в

исследуемые периоды, был использован метод PLS-DA-vip (рис. 2).

Весной до начала навигации в крови обнаруживается высокий уровень рибоновой кислоты, которая появляется в результате окисления рибозы. Рибоза, будучи структурной основой аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ – источника энергии в организме, необходимой для всех жизненных процессов, включая мышечные сокраще-

ния, распространение нервных импульсов и др.), участвует в синтезе белков, способствует повышению адаптивного потенциала, физической активности, снижению утомляемости [14].

Осенью после длительного плавательного сезона в плазме крови выявляется высокий уровень аминокислоты валин, которая, наряду с лейцином и изолейцином, может служить резервным источником энергии в мышечных клетках, а также препятствовать снижению уровня серотонина [15–18]. Ранее исследования, проведенные на лабораторных крысах, показали, что валин повышает координацию при выполнении мышечной работы, снижает чувствительность организма к боли, холоду и жаре и т. д. [18].

После долгого периода пребывания на судне осенью у речников в крови повышается уровень ортофосфорной и глутаминовой кислот. Последняя выполняет важные функции в организме: играет роль медиатора с высокой метаболической активностью в головном мозге, стимулируя окислительно-восстановительные процессы и обмен белков [19]; нормализует обмен веществ, изменяя функциональное состояние нервной и эндокринной систем; стимулирует передачу возбуждения в синапсах ЦНС; способствует

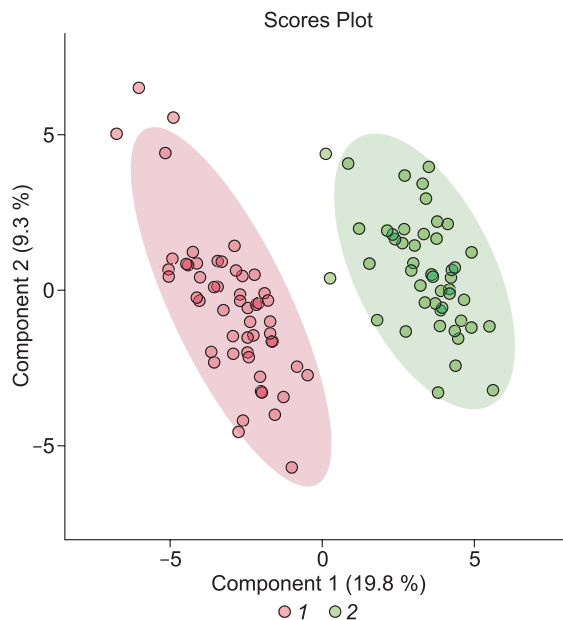


Рис.1. Распределение метаболитов в сыворотке крови речников в различные периоды (весна (1), осень (2)), рассчитанное методом дискриминантного анализа с использованием частных наименьших квадратов (PLS-DA).

Fig. 1. Distribution of metabolites in the blood serum of river workers in different periods (spring (1), autumn (2)), calculated by the method of discriminant analysis using partial least squares (PLS-DA).

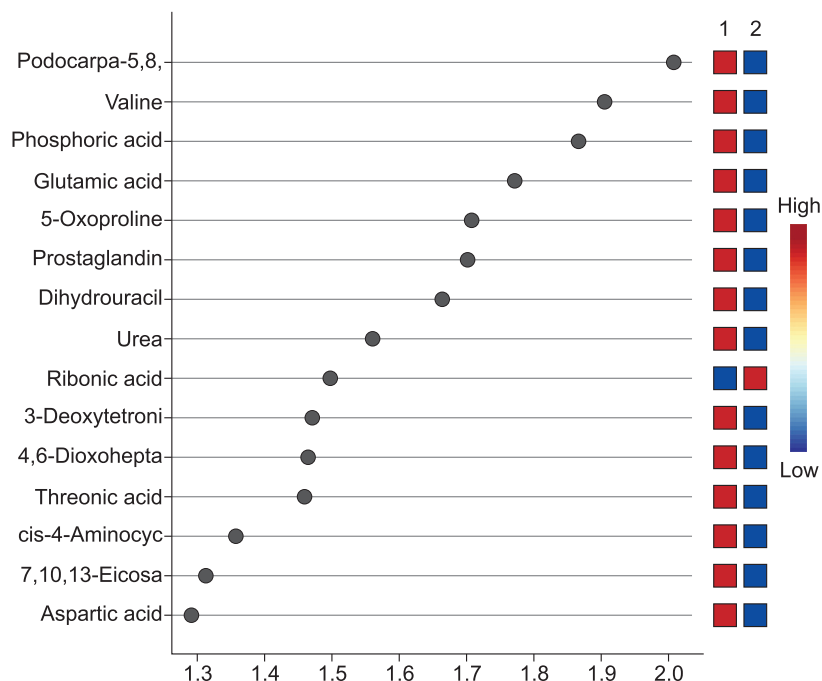


Рис. 2. Содержание в плазме крови речников основных метаболитов, наиболее различающихся в периоды исследования (весна, осень), рассчитанное методом PLS-DA-vip. 1 – осень; 2 – весна.

Fig. 2. The content of the main metabolites in the blood plasma of river workers, the most differing during the study periods (spring, autumn), calculated by the PLS-DA-vip method. 1 – autumn; 2 – spring.

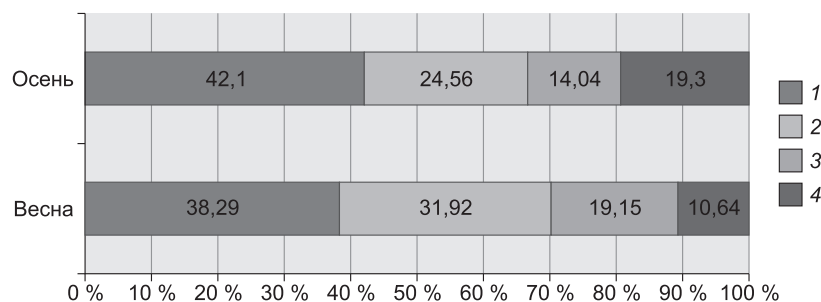


Рис.3. Процентное соотношение речников в различные сезоны в зависимости от уровня адаптационных резервов: 1 – удовлетворительная адаптация организма, 2 – напряжение механизмов адаптации, 3 – неудовлетворительная адаптация, 4 – срыв адаптации.

Fig. 3. The percentage of the river workers in different seasons, depending on the level of adaptation reserves: 1 – satisfactory adaptation of the organism, 2 – stress of adaptation mechanisms, 3 – unsatisfactory adaptation, 4 – failure of adaptation.

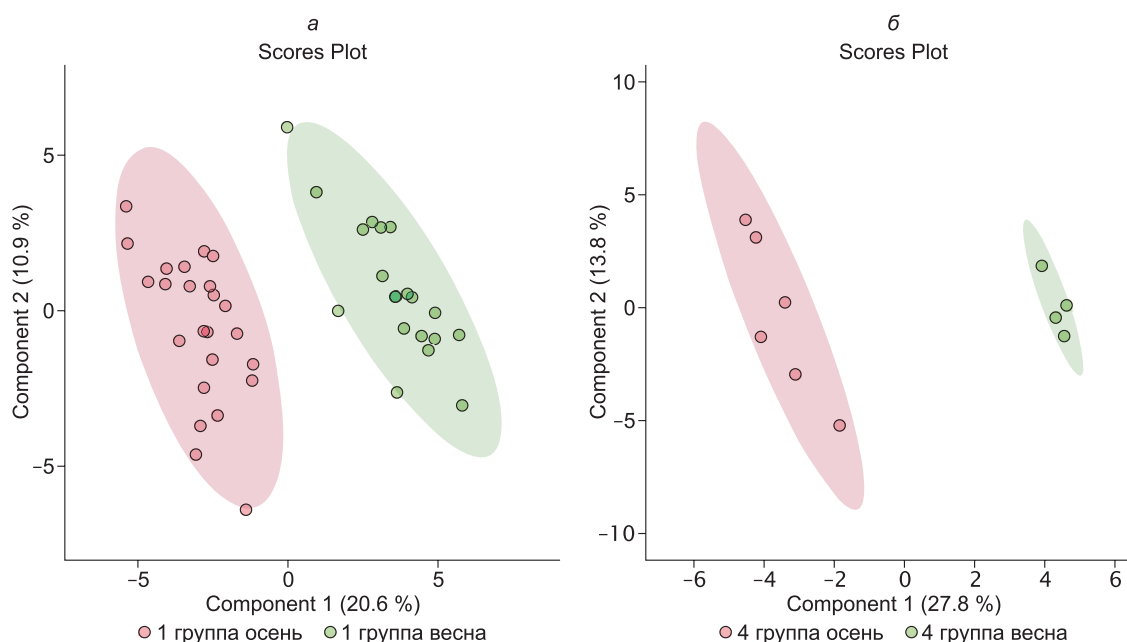


Рис. 4. Сезонные различия метаболомного профиля плазмы крови (метод PLS-DA) исследуемых в группах 1 (а) и 4 (б)

Fig. 4. Seasonal differences in the metabolomic profile of blood plasma (PLS-DA method) of the subjects studied in groups 1 (а) and 4 (б)

ет нейтрализации и выведению из организма аммиака; повышает устойчивость организма к гипоксии; является одним из компонентов миофибрилл; участвует в синтезе других аминокислот, ацетилхолина, АТФ, мочевины; способствует переносу и поддержанию необходимой концентрации ионов калия в мозге; служит связующим звеном между обменом углеводов и нуклеиновых кислот; нормализует содержание показателей гликолиза в крови и тканях; оказывает гепатопротекторное действие; угнетает секреторную функцию желудка [15, 20–22].

Повышение в осенний период в плазме крови 5-оксипролина может вызывать метаболический ацидоз, что может обуславливать снижение умственной и физической работоспособности, быструю утомляемость и т. д. К факторам, обуславливающим накопление 5-оксипролина, относятся недоедание, снижение или отсутствие мясной пищи, сепсис, хроническая почечная недостаточность и/или нарушение функции печени, особенно заболевания печени, возникающие в результате хронического употребления алкоголя [23].

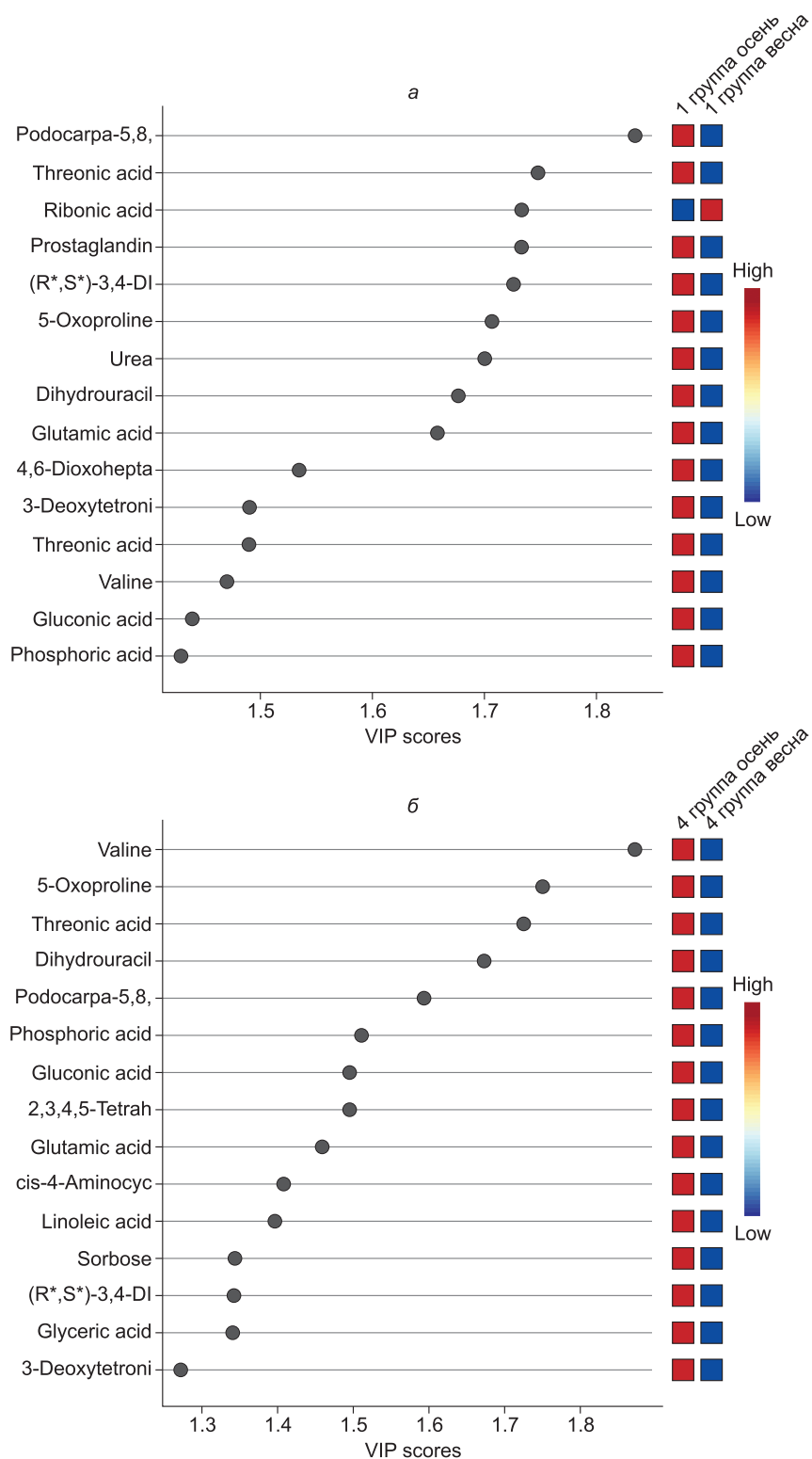


Рис. 5. Содержание в плазме крови речников в группах 1 (а) и 4 (б) основных метаболитов, наиболее различающихся в периоды исследования (весна, осень), анализа частичных наименьших квадратов PLS-DA-vip.

Fig. 5. The content of the main metabolites in the blood plasma of the river workers in groups 1 (а) and 4 (б), the most differing during the study periods (spring, autumn), analysis of partial least squares PLS-DA-vip.

Способность благополучно переносить стресс у человека зависит от уровня адаптации. Поэтому на основании интегральной оценки адаптационных резервов организма все обследованные были разделены на четыре группы: 1 – лица с высокими или достаточными функциональными возможностями системы кровообращения, с удовлетворительной адаптацией организма к условиям окружающей среды; 2 – лица с напряжением механизмов адаптации; 3 – лица со снижением функциональных возможностей системы кровообращения, с неудовлетворительной адаптацией организма к условиям окружающей среды; 4 – лица с резко сниженными функциональными возможностями системы кровообращения, с явлениями срыва адаптации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в осенний период после длительного навигационного сезона в 1,81 раза повышается доля речников со срывом адаптации (рис. 3).

При использовании статистического метода PLS-DA в двух группах (1 и 4) были получены достоверные по сезонам различия метаболомного профиля сыворотки крови (рис. 4, 5).

В группе 1 у речников с высоким уровнем адаптационного резерва первый главный компонент составляет более 20 % всех метаболитов, второй главный компонент – 10 %. В группе 4 (речники со срывом адаптации) эти цифры еще выше – 27,0 и 13,8 % соответственно, что является свидетельством высокой достоверности полученных результатов. В группах 2 и 3 достоверных сезонных различий обнаружено не было. Более подробное рассмотрение уровня отдельных метаболитов в этих группах речников выявило межгрупповые различия (см. рис. 5).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наиболее благополучное состояние адаптационных механизмов весной определяется высоким уровнем рибоновой кислоты (см. рис. 5, а), наименее благополучное осенью связано с высоким уровнем валина, 5-оксипролина (см. рис. 5, б).

Это позволяет предложить данный метаболомный тест, в первую очередь, содержание рибоновой кислоты в плазме крови, в качестве теста отбора вахтовиков для работы в условиях Севера.

Заключение

Результаты исследований метаболомного профиля плазмы крови у речников выявили досто-

верные различия как в качественном, так и в количественном составе метаболитов до начала навигации (весна) и после ее окончания (осень). Осенью, после длительной навигации в 1,81 раза увеличивается доля речников со срывом адаптации, что указывает на значительное снижение адаптационных резервов во время навигации. В крови в этой группе речников повышается уровень 5-оксипролина.

Повышенное содержание рибоновой кислоты в сыворотке крови весной является свидетельством высокого адаптивного потенциала человека, способности организма отработать длительную вахту на северном речном флоте без истощения адаптационного резерва, т. е. без ущерба для здоровья.

Полученные результаты позволяют также предположить, что использование адаптогенных биоактивных добавок в рационе питания вахтовиков в условиях Севера, с учетом индивидуального метаболомного профиля, будет способствовать сохранению их работоспособности, уровня внимания и здоровья в течение всего длительного навигационного периода, позволит снизить риски аварийности, связанные с человеческим фактором.

Литература

1. *Fiehn O.* Metabolomics – the link between genotypes and phenotypes. // *Plant Mol. Biol.* 2002. Vol. 48. P. 155–171.
2. *Wishart D.S.* Quantitative metabolomics using NMR // *Trends Anal. Chem.*, 2008. Vol. 27. P. 228–237.
3. *Колосова О.Н., Хлебный Е.С., Баишева Н.В.* Жирнокислотный профиль сыворотки крови беременных женщин г.Якутска как биомаркер риска невынашивания. // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* 2020. № 4. С. 100–111.
4. *Симонова Н.Н.* Адаптация к работе вахтовым методом в экстремальных условиях Крайнего Севера: учеб. пособие. Архангельск: ИД САФУ, 2014. 170 с.
5. *Трансковский Д.Е.* Условия труда и профессиональная заболеваемость работников водного транспорта в Приморском крае // *Здоровье. Медицинская экология. Наука.* 2013. № 4(58). С. 111–113.
6. *Евстафьев В.Н.* Эргономическая оценка рабочих мест и психофизиологическая характеристика функции зрительного анализатора у плавсостава // *Актуальные проблемы транспортной медицины.* 2008. № 2(12). С. 65–69.
7. *Хугаева С.Г.* Особенности адаптации моряков рыбопромыслового флота к экстремальным услови-

ям плавания в условиях арктического Севера // Военно-медицинский журнал. 2012. Т. 333, № 2. С 64–65.

8. Мамаенко Ю.В., Черненко Е.В. Психофизиологические корреляты профессиональной адаптации моряков // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2010. № 1(19). С. 31–36.

9. Петрова Т.Б., Бичкаев Я.И., Бичкаева Ф.А., Власова О.С., Третьякова Т.В., Жилина Л.П. Изменение параметров углеводного обмена у плавсостава Северного водного бассейна // Экология человека. 2009. № 8. С. 12–18.

10. Людина А.Ю., Потолицына Н.Н., Есева Т.В., Солонин Ю.Г., Осадчук Л.В., Васильковский В.Е., Бойко Е.Р. Влияние образа жизни и характера питания на профиль жирных кислот плазмы крови уроженцев Европейского Севера // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. № 5(2). С. 557–560.

11. Ефимова Л.П., Кудряшова В.Е. Показатели липидного обмена у аборигенов Севера Сибири // Профилактическая и клиническая медицина. 2009. № 1 (30). С. 66–69.

12. Севостьянова Е.В. Особенности липидного и углеводного метаболизма человека на Севере (литературный обзор) // Бюллетень сибирской медицины. 2013. № 1 (12). С. 93–100.

13. Петрова Н.В., Сазанова К.В., Медведева Н.А., Шаварда А.Л. Особенности метаболомного профиля на разных стадиях онтогенеза *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) при выращивании в климатической камере // Химия растительного сырья. 2018. № 3. С. 139–147.

14. Williams J.D., Kamath V.P., Morris P.E., Townsend L.B. D-Ribonolactone and 2,3-Isopropylidene(D-Ribonolactone) // Wiley Online Library. 2005. Vol. 82. <https://doi.org/10.1002/0471264229.os082.12>

15. Kurpad A.V., Regan M.M., Raj T., Gnanou J.V. Branched-chain amino acid requirements in healthy adult human subjects // The Journal of Nutrition. Vol. 136, Iss. 1. P. 256–263.

16. Meguid M.M., Matthews D.E., Bier D.M., Meredith C.N., Soeldner J.S., Young V.R. Leucine kinetics at graded leucine intakes // Am. J. Clin. Nutr. 1986. Vol. 43. P. 770–780.

17. Young V.R., Marchini J.S. Mechanisms and nutritional significance of metabolic responses to altered adaptation in humans // Am. J. Clin. Nutr. 1990. Vol. 51. P. 270–289.

18. Young V.R., Borgonha S. Nitrogen and amino acid requirements; the Massachusetts Institute of Technology amino acid requirement pattern // J. Nutr. 2000. Vol. 130. P. 1841–1849.

19. Balzola F.A., Boggio-Bertinet D. The metabolic role of glutamine // Minerva Gastroenterol. Dietol. 1996. Vol. 42(1). P. 17–26.

20. de Vasconcelos M.I., Tirapegui J. Nutritional importance of glutamine // Arq Gastroenterol. 1998. Vol. 35(3). P. 207–215.

21. Turczynowski W., Szczepanik A.M., Garlicki J., Mocny G. Glutamine – its metabolic role and possibilities for clinical use // Przegl. Lek. 1998. Vol. 55(12). P. 659–662.

22. Roth E., Spittler A., Oehler R. Glutamine: effects on the immune system, protein balance and intestinal functions. // Wien Klin Wochenschr. 1996. Vol. 108(21). P. 669–676.

23. Duewall J.L., Fenves A.Z., Richey D.S., Tran L.D., Emmett M. 5-Oxoproline (pyroglutamic) acidosis associated with chronic acetaminophen use // Proc. Bayl Univ. Med. Cent. 2010. Vol. 23(1). P. 19–20.

Поступила в редакцию 06.10.2021

Принята к публикации 11.11.2021

Об авторах

КОЛОСОВА Ольга Николаевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, e-mail: kololgonik@gmail.com;

ЗАСИМОВА Екатерина Захаровна, начальник, лечебно-реабилитационный отдел, Институт физической культуры и спорта, Северо-Восточный федеральный университет, 677000, Якутск, ул. Беллинского, 58, Россия, e-mail: ekazas15@yandex.ru;

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, e-mail: negroxasg@mail.ru;

ГОЛЬДЕРОВА Айтилина Семеновна, доктор медицинских наук, зав. научно-исследовательской лаборатории клеточных технологий и регенеративной медицины, клиника медицинского института, Северо-Восточный федеральный университет, 677027, Якутск, ул. Кулаковского, 36, Россия, e-mail: hoto68@mail.ru;

КЕРШЕНГОЛЬЦ Борис Моисеевич, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, ФИЦ ЯНЦ СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kerschen@mail.ru.

Информация для цитирования

Колосова О.Н., Засимова Е.З., Слепцов И.В., Гольдерова А.С., Кершенгольц Б.М. К вопросу разработки теста отбора вахтовиков для работы на Севере на основе определения метаболомного профиля плазмы крови, на примере работников водного транспорта // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 91–102. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-91-102>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-91-102

**On the development of a test for the selection of shift workers
for work in the North based on the determination
of the metabolomic profile of blood plasma,
by the example of workers in water transport**

O.N. Kolosova^{1,*}, E.Z. Zasimova², I.V. Sleptsov¹, A.S. Golderova², B.M. Kershengolts¹

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

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

**kololgonik@gmail.com*

Abstract. *A prospective cohort study of the influence of a long navigation period on the metabolomic blood plasma profile of shift workers (river workers) in the Far North was carried out. On the basis of voluntary written informed consent, 53 water transport workers of the Republic of Sakha (Yakutia), who arrived from other regions of Russia and the CIS, took part in the study. The survey was carried out before (spring) and after (autumn) the voyage. The identification and determination of the concentrations of metabolites in blood plasma samples was carried out by means of gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS). Analysis of blood plasma metabolomic profile data was performed using the MetaboAnalyst platform (V5.0). The results of studies of the metabolomic profile of blood plasma in river workers revealed significant differences in both the qualitative and quantitative composition of metabolites before the beginning of navigation (spring) and after its end (autumn). In autumn, after long-term navigation, the proportion of river workers with a breakdown in adaptation increases by a factor of 1.81, which indicates a significant decrease in adaptation reserves during navigation. The level of 5-hydroxyproline in the blood of this group of river workers increases. The increased content of ribonic acid in blood serum in spring is the evidence of the high adaptive potential of a person, the ability of the body to work out a long shift in the northern river fleet without depleting the adaptive reserve, that is, without prejudice to health. The results obtained make it possible to propose a metabolomic test, first of all, the content of ribonic acid in blood plasma, as a test for the selection of shift workers for work in the Arctic and Subarctic.*

Keywords: adaptation, extreme conditions, shift work, water transport, blood plasma metabolomic profile, principal component analysis, the Arctic, GC-MS.

Acknowledgements. *The research was carried out within the framework of the following projects: «Research of chronophysiological, molecular adaptation mechanisms and psychoemotional stress of a person under the conditions of extreme climatic, technogenic factors in the Arctic and Subarctic and a pandemic, post-pandemic, development of ways to increase the adaptive potential» (No. FWRS-2021-0043 registration number 121021600269-0) Federal Research Center «YSC SB RAS»; «Physiological and biochemical adaptation mechanisms of plants, animals, humans to the conditions of the Arctic / Subarctic and the devel-*

opment of biological products based on natural northern raw materials that increase the efficiency of the adaptation process and the level of human health under extreme environmental conditions» (No. 0297-2021-0025 registration number AAAA-A21 -121012190035-9) Institute of Biological Problems of Cryolithozone «FRC YSC SB RAS»; project No. 6 KNI-2 «Development and implementation in practical health care of biogenic methods of increasing the level of health and adaptive potential of the human body, its mental and physical performance under extreme conditions of the natural and social environment by creating biological products from the tissues of northern ecoforms of plants and aboriginal animal species»; a technological project of the World Class Scientific and Educational Center: North: Territory of Sustainable Development No. 8 «Biotechnology of deep processing of the unique northern, environmentally friendly, reproducible biological raw materials.»

References

1. Fiehn O. Metabolomics – the link between genotypes and phenotypes. // Plant Mol. Biol. 2002. Vol. 48. P. 155–171.
2. Wishart D.S. Quantitative metabolomics using NMR // Trends Anal. Chem., 2008. Vol. 27. P. 228–237.
3. Kolosova O.N., Hlebynyj E.S., Baisheva N.V. Zhirnokislotnyj profil' syvorotki krovi beremennyh zhen-shchin g.YA kutska kak biomarker riska nevynashivaniya // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2020. No. 4. P. 100–111.
4. Simonova N.N. Adaptatsiya k rabote vahtovym metodom v ekstremal'nyh usloviyah Krajnego Severa: ucheb. posobie. Arhangel'sk: ID SAFU, 2014. 170 p.
5. Transkovskij D.E. Usloviya truda i professional'naya zabolevaemost' rabotnikov vodnogo transporta v Primorskoy krae // Shchidorov'e. Medicinskaya ekologiya. Nauka. 2013. No. 4(58). P. 111–113.
6. Evstaf'ev V.N. Ergonomicheskaya ocenka rabochih mest i psihofiziologicheskaya harakteristika funktsii zritel'nogo analizatora u plavso stava // Aktual'nye problemy transportnoj mediciny. 2008. No. 2(12). P. 65–69.
7. Hugaeva S.G. Osobennosti adaptatsii moryakov rybopromyslovogo flota k ekstremal'nyh usloviyam plavaniya v usloviyah arkticheskogo Severa // Voenno-meditsinskij zhurnal. 2012. Vol. 333, No. 2. P. 64–65.
8. Mamaenko Yu.V., Chernenko E.V. Psihofiziologicheskie korrelyaty professional'noj adaptatsii moryakov // Aktual'nye problemy transportnoj mediciny. 2010. No. 1(19). P. 31–36.
9. Petrova T.B., Bichkaev Ya.I., Bichkaeva F.A., Vlasova O.S., Tret'yakova T.V., Zhilina L.P. Izmenenie parametrov uglevodnogo obmena u plavso stava Severnogo vodnogo bassejna // Ekologiya cheloveka. 2009. No. 8. P. 12–18.
10. Lyudinina A.Yu., Potolicyna N.N., Eseva T.V., Solonin Yu.G., Osadchuk L.V., Vas'kovskij V.E., Bojko E.R. Vliyaniye obraza zhizni i haraktera pitaniya na profil' zhirnyh kislot plazmy krovi urozhencev Evropejskogo Severa // Izvestiya Samarskogo NC RAN. 2012. No. 5(2). P. 557–560.
11. Efimova L.P., Kudryashova V.E. Pokazateli lipidnogo obmena u aborigenov Severa Sibiri // Profilakticheskaya i klinicheskaya medicina. 2009. No. (30). P. 66–69.
12. Sevost'yanova E.V. Osobennosti lipidnogo i uglevodnogo metabolizma cheloveka na Severe (literaturnyj obzor) // Byulleten' sibirskoj mediciny. 2013. No. 1 (12). P. 93–100.
13. Petrova N.V., Sazanova K.V., Medvedeva N.A., Shavarda A.L. Osobennosti metabolomnogo profilya na raznyh stadiyah ontogeneza *Prunella vulgaris* (Lamiaceae) pri vyrashchivani v klimaticheskoy kamere // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2018. No. 3. P. 139–147.
14. Williams J.D., Kamath V.P., Morris P.E., Townsend L.B. D-Ribonolactone and 2,3-Isopropylidene(D-Ribonolactone) // Wiley Online Library. 2005. Vol. 82. <https://doi.org/10.1002/0471264229.os082.12>
15. Kurpad A.V., Regan M.M., Raj T., Gnanou J.V. Branched-chain amino acid requirements in healthy adult human subjects // The Journal of Nutrition. Vol. 136, Iss. 1. P. 256–263.
16. Meguid M.M., Matthews D.E., Bier D.M., Meredith C.N., Soeldner J.S., Young V.R. Leucine kinetics at graded leucine intakes // Am. J. Clin. Nutr. 1986. Vol. 43. P. 770–780.
17. Young V.R., Marchini J.S. Mechanisms and nutritional significance of metabolic responses to altered adaptation in humans // Am. J. Clin. Nutr. 1990. Vol. 51. P. 270–289.
18. Young V.R., Borgonha S. Nitrogen and amino acid requirements; the Massachusetts Institute of Technology amino acid requirement pattern // J. Nutr. 2000. Vol. 130. P. 1841–1849.
19. Balzola F.A., Boggio-Bertinet D. The metabolic role of glutamine. // Minerva Gastroenterol. Dietol. 1996. Vol. 42(1). P. 17–26.
20. de Vasconcelos M.I., Tirapegui J. Nutritional importance of glutamine // Arq Gastroenterol. 1998. Vol. 35(3). P. 207–215.
21. Turczynowski W., Szczepanik A.M., Garlicki J., Mocny G. Glutamine – its metabolic role and possibilities for clinical use // Przegl. Lek. 1998. Vol. 55(12). P. 659–662.
22. Roth E., Spittler A., Oehler R. Glutamine: effects on the immune system, protein balance and intestinal functions // Wien Klin Wochenschr. 1996. Vol. 108(21). P. 669–676.
23. Duwall J.L., Fenves A.Z., Richey D.S., Tran L.D., Emmett M. 5-Oxoproline (pyroglutamic) acidosis associated with chronic acetaminophen use // Proc. Bayl Univ. Med. Cent. 2010. Vol. 23(1). P. 19–20.

About the authors

KOLOSOVA, Olga Nikolaevna, Dr. Sci. (Biology), professor, chief researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-6965-2600>, e-mail: kololgonik@gmail.com;

ZASIMOVA, Ekaterina Zakharovna, head of the Treatment and Rehabilitation Department, Sports and Recreation Complex, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58 Belinskogo st., Yakutsk 677000, Russia,
e-mail: ekazas15@yandex.ru;

SLEPTSOV, Igor Vitalievich, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
e-mail: neroxasg@mail.ru;

GOLDEROVA, Aitalina Semyonovna, Dr. Sci. (Medicine), head of the Research Laboratory of Cell Technologies and Regenerative Medicine, Clinic of Medical Institute, M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 36 Kulakovskogo st., 677027, Russia,
e-mail: hoto68@mail.ru;

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biology), professor, chief researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
<https://orcid.org/0000-0001-8823-3981>, e-mail: kerschen@mail.ru.

Citation

Kolosova O.N., Zasimova E.Z., Sleptsov I.V., Golderova A.S., Kershengolts B.M. On the development of a test for the selection of shift workers for work in the North based on the determination of the metabolomic profile of blood plasma, by the example of workers in water transport // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 91–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-91-102>

Биологические ресурсы

УДК 59.009:599.742.41:59.088

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-103-111

Биохимический состав желчи и питание *Martes zibellina* на территории Якутии в зимний период

М.М. Сидоров*, Н.В. Мамаев, И.В. Слепцов, А.Н. Журавская, В.В. Михайлов

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия

*sidorov_michail86@mail.ru

Аннотация. Исследован состав зимнего рациона питания соболя *Martes zibellina* по содержанию желудков ($n = 390$) и проведен анализ свежемороженой желчи ($n = 80$) на содержание желчных кислот и холестерина в четырех климатических зонах Якутии. Установлено, что содержание желчных кислот, в первую очередь гликохолевой и холевой, в желчи якутских аборигенных и акклиматизированных соболей в различных климатических зонах Якутии, связано с составом рациона питания в зимний период. Чем выше доля животных кормов по сравнению с растительными, тем выше общее содержание желчных кислот в желчи *Martes zibellina*. Эту закономерность необходимо учитывать при организации биотехнологической переработки желчи соболя с получением биоактивных добавок косметологического и медицинского назначения. Содержание холестерина и желчных кислот в желчи соболей, обитающих в различных климатических зонах Якутии, в зимний период достоверно не зависит от половых различий и от климатических условий среды обитания.

Ключевые слова: соболь, желчь, зимнее питание, холестерин, желчные кислоты, холевая и гликохолевая кислоты, климатические зоны Якутии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность инженеру-исследователю ИБПК СО РАН Никифоровой Е.Н., лаборанту Гаврильеву И.П. за составление картографических материалов, а также охотхозяйствам Республики Саха (Якутия) за предоставление материалов.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ: тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР №121020500194-9 и тема № 0297-2021-0025, ЕГИСУ НИОКТР №АААА-А21-121012190035-9).

Введение

Соболь *Martes zibellina* заселяет практически все облесенные территории Якутии, включая такие природные зоны, как лесотундра и тайга (северная, средняя и горная), а в последние годы все чаще отмечаются проникновения вида в зону тундры. В пределах исследованной территории обитает и как аборигенный вид (Северо-Западная зона: Оленекский, Анабарский районы, Центральная зона: Мирнинский район), и как акклиматизированный (Северо-Восточная зона: Верхоянский, Верхнеколымский районы, Центральная зона: Вилюйский, Горный районы, и Южная зона: Усть-Майский и Алданский районы). Известно, что соболь – полифаг, потребляющий разнообразную животную и растительную пищу, но в пределах Якутии у хищника отмечено преобладание в рационе кормов животного происхождения [1–6]. На современном этапе сравнительный эколого-

географический анализ зимнего питания зверька на всей территории Якутии относительно мало изучен [5, 6].

У позвоночных состав желчных кислот (а также желчных спиртов) сильно различается: так, у рыб и амфибий преобладают желчные спирты C_{27} , у рептилий и птиц – желчные кислоты C_{27} , у млекопитающих – желчные кислоты C_{24} . Значимые различия наблюдаются между представителями разных отрядов животных, в пределах одного отряда различия в составе невелики [7].

Ранее считалось, что роль желчных кислот, составляющих примерно 70 % сухой массы желчи, заключается лишь в способствовании усвоению различных гидрофобных веществ и в катаболизме холестерина. В последние годы было показано, что они также играют ключевую роль в регулировании энергетического баланса организма, являясь важными сигнальными молеку-

лами, которые могут активировать сигнальные пути ERK (пролиферация и деление клеток), G-белок-связанные рецепторы TGR5 (активация рецепторов тиреоидных гормонов, регулирующих уровень метаболизма) и фарнезоидные ядерные рецепторы FXR (активация экспрессии множества генов, главным образом в печени, что способствует ее нормальному функционированию) [8–11].

Особенности химического состава желчи диких плотоядных животных мало изучены, и предполагается, что концентрации желчных кислот, холестерина и других компонентов в большей степени зависят от мест обитания и условий питания [12].

Материалы и методы исследования

Сбор тушек соболей производился у охотников-промысловиков с 2013 по 2020 г. из восьми административных районов республики (Верхне-колымский улус – 34; Верхоянский улус – 28; Оленекский улус – 18; Мирнинский улус – 35; Вилуйский улус – 11; Горный улус – 24; Усть-Майский улус – 83; Алданский улус – 157), добытых в разрешенный охотничий сезон охоты на соболя – в зимний период с ноября по март. Состав зимних кормов анализировали по содержанию желудков, взятых из замороженных тушек ($n = 390$), в последующем объединенных по природным областям и зонам (рис. 1), которые приводятся по степени доминирования типа растительности [13, 14]. Практически все соболи пойманы капканным способом, поэтому в среднем 75 % желудков оказались пустыми. Среди выявленных кормов мышевидные грызуны указаны без разделения на виды.

Для анализа на содержание желчных кислот и холестерина 100 мкл свежемороженой желчи экстрагировали в 1 мл метанола. Экстракт подвергался выпариванию при 40 °C с помощью лабораторного ротационного испарителя Heidolph Nei-VAP Value (Германия), после чего сухой остаток был растворен в 50 мкл пиридина. С целью повышения летучести экстрагированных веществ была проведена их TMS-derivatизация с получением триметилсилильных эфиров с помощью добавления 50 мкл N,O-бис-(триметилсилил)-трифторацетамида (BSTFA). Условия derivatизации были следующими: нагревание до 100 °C в течение 15 мин. Анализ проводился методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии (ГХ–МС) с использованием хроматографа «Маэстро» (Рос-

сия), оснащенным квадрупольным масс-спектрометром Agilent 5975C (США) и капиллярной колонкой для газовой хроматографии HP-5MS длиной 30 м, внешним диаметром 0,25 мм и толщиной пористого слоя (5%-фенил)-метилполисилоксана 0,25 мкм. Условия проведения газовой хроматографии были выбраны следующие: 5 мин. выдерживание температуры 200 °C, далее осуществлялся подъем температуры до 250 °C со скоростью 6 °C/мин., затем температура поднималась до 300 °C со скоростью 3 °C/мин., и в конце проводилось выдерживание в течение 5 мин. при 300 °C. Скорость потока через колонку гелия, выступающего газом-носителем, составляла 1 мл/мин. Обработка данных осуществлялась с помощью программного обеспечения Agilent ChemStation. Для количественной интерпретации хроматографической информации, контроля разбавлений и снижения влияния прочих факторов, вносящих случайную ошибку в результаты определений, к каждой пробе добавлялось известное количество внутреннего стандарта, в качестве которого был выбран раствор, приготовленный из стандарта бетулина $C_{30}H_{50}O_2$.

Обработка и интерпретация масс-спектрометрической информации проводилась с использованием стандартной библиотеки NIST 2017. Полученные результаты представлены в виде среднего арифметического и стандартного отклонения ($M \pm SD$). Сравнение средних значений выборок проводилось методом ANOVA. Значимость отличий от контроля определялась с использованием критерия Ньюмена–Кейлса для множественных сравнений при уровне вероятности $p < 0,05$. Расчет проводился с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программа статистического анализа, Vol.2007.

Результаты и обсуждение

Во всех природных зонах, кроме средней равнинной тайги Центральной зоны Якутии, в зимнем питании соболя преобладает животная пища (мышевидные грызуны, птицы и др.).

Южная Якутия. Природная зона представлена горными лиственничными и сосново-лиственничными лесами, горными тундрами, гольцами и подгольцовыми зарослями кустарников и горными лиственничными и подгольцовыми редколесьями (см. рис. 1). По нашим данным, в регионе отмечается наиболее разнообразный рацион питания соболей ($n = 240$, рис. 2), основу которого составляют мышевидные грызуны

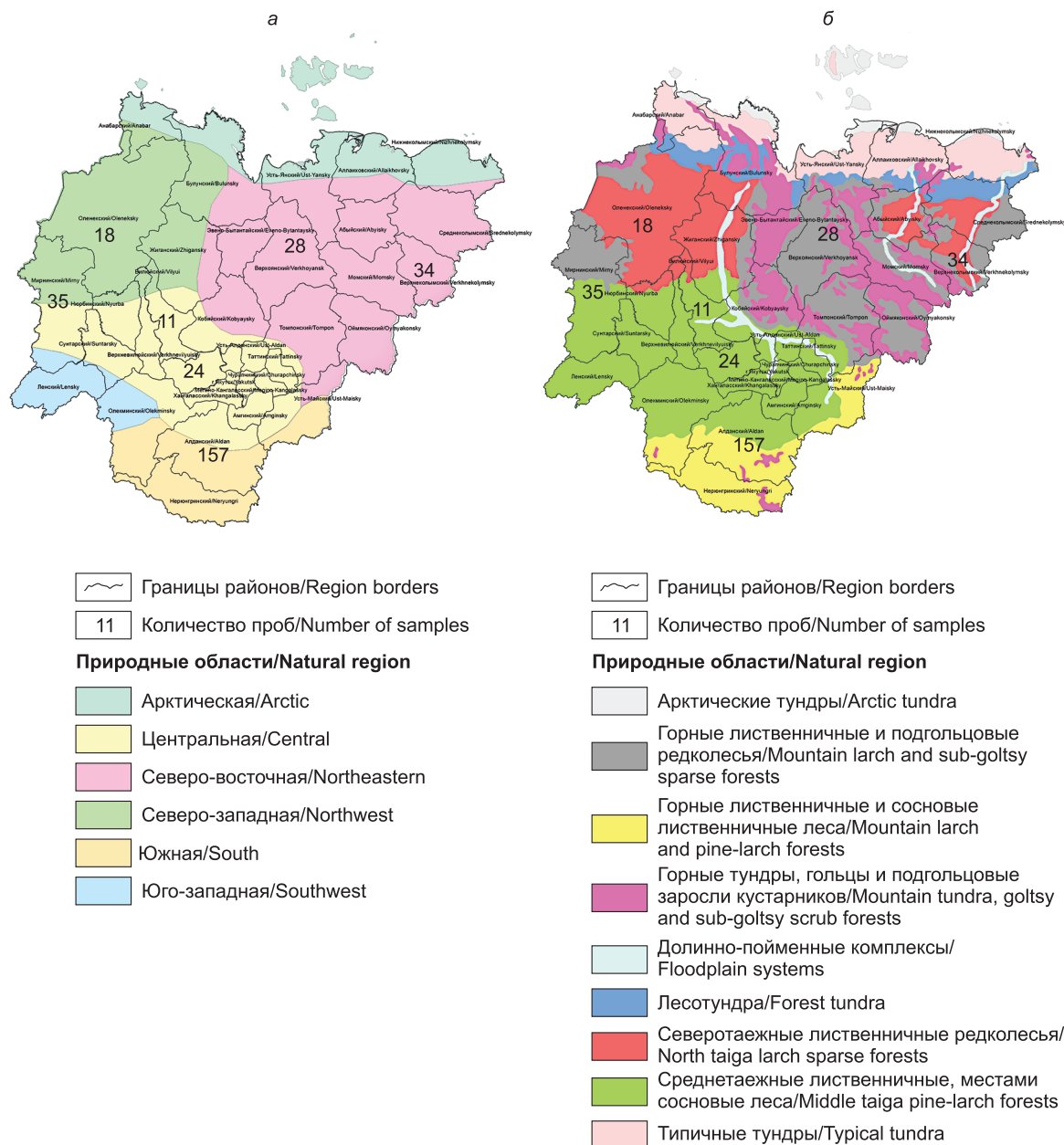


Рис. 1. Карта деления Якутии на природные области (а) и зоны (б).

Fig. 1. Map of natural areas (a) and zones (b) in Yakutia.

(в среднем 23,8 %). К дополнительным кормам относятся ягоды голубики – 4,2 %, птицы – 1,3, ягоды боярышника – 0,4 и корма животного происхождения – 1,3 %.

Возможно, по птицам и кормам животного происхождения доля может быть завышена, так как соболь мог поедать их в виде приманки, это касается и рыбы. По данным Захарова Е.С. и др., в Южной Якутии заметное место в питании соболя занимают птицы и отношение корма животного происхождения к растительному состав-

ляет 15,1:1 [6]. По нашим данным, отношение животных кормов к растительным в 2013–2020 гг. составило 5,9:1,0 (см. рис. 2).

Центральная Якутия. Природная зона представлена среднетаежными лиственными, местами сосновыми лесами (см. рис.1). Доля растительного корма самая высокая (30,7 %), его основа – ягоды голубики. Мышевидные грызуны составляют 17,9 % рациона соболя ($n = 140$) и 1,4 % — корма животного происхождения (см. рис. 2). Отношение животных кормов к расти-

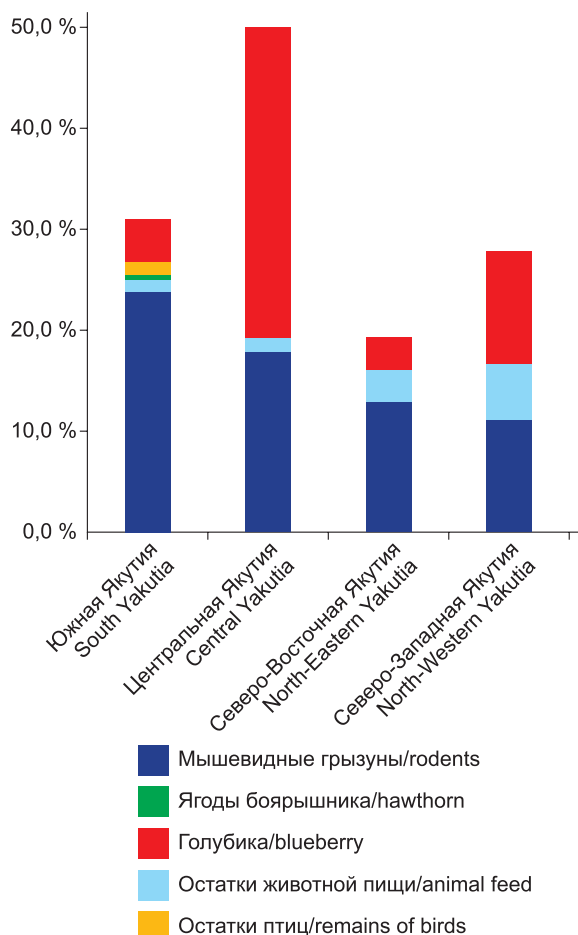


Рис. 2. Зимний рацион соболя в Якутии по содержанию желудков (наши данные, $n = 390$).

Fig. 2. Winter diet of sable in Yakutia as per stomach contents (our data, $n = 390$).

тельным в 2013–2020 гг., по нашим данным, составило 0,6:1,0 (см. рис. 2).

По материалам Захарова Е.С. с соавторами, в рационе соболя в Центральной Якутии отношение корма животного происхождения к растительному составляло 21,5:1. Из мышевидных грызунов преобладала красная полевка (40,9–78,6 %) [6]. Красная полевка составляет основу рациона зимнего питания соболя (до 73,3 %) и в Мирнинском районе Западной Якутии. Также следует отметить, что Западной Якутии отмечается самое высокое потребление птиц соболями [6].

Северо-Западная Якутия. Растительность в основном представлена северотаяжными лиственничными редколесьями, также имеются горные лиственничные и подгольцовые редколесья и горные тундры, гольцы и подгольцовые заросли кустарников (см. рис. 1). По литературным данным [1, 6], основу рациона соболя в разные

годы составляют красная полевка и/или полевка-экономка. Растительные корма обнаруживали в желудках очень редко, в основном ягоды голубики [6]. По нашим данным, основу зимнего рациона соболя ($n = 18$) в период проведенных исследований также составляли мышевидные грызуны (11,1 %) и ягоды голубики (11,1 %), также отмечали наличие корма животного происхождения (см. рис. 2). Таким образом, по нашим данным, отношение животных кормов к растительным в 2013–2020 гг. составило 1,6:1,0 (см. рис. 2).

Северо-Восточная Якутия. Преобладают горные лиственничные и подгольцовые редколесья, горные тундры, гольцы и подгольцовые заросли кустарников, а в Верхнеколымском районе – северотаяжные лиственничные редколесья (см. рис. 1). По нашим данным, основу зимнего рациона составляют мышевидные грызуны (12,9 %), к дополнительным кормам относятся ягоды голубики и корма животного происхождения (3,2 %) ($n = 62$; см. рис. 2). Так что отношение животных кормов к растительным в 2013–2020 гг., по нашим данным, составило 5,3:1,0 (см. рис. 2). Вместе с тем, по литературным данным, в Северо-Восточной зоне доля растительного корма самая высокая, в отдельные годы соболю может поесть здесь растительные корма на уровне основных кормов. Основу кормов из растительной части составляют – ягоды голубики, брусники и орехи кедрового стланика [5]. Также в заметном количестве соболю поедает насекомых, лесного лемминга и северную пищу, чаще, чем в других зонах, – зайца-беляка. Соотношение животных и растительных кормов составляло 22,0:1. По потреблению растительной и смешанной пищи данная зона сходна с Южно-Якутской [4, 6].

Известно, что основными желчными кислотами, участвующими в липидном обмене у животных, являются холевая, гликохолевая и таурохолевая кислоты [16]. Показано, что статистически достоверные отличия в составе желчных кислот в желчи *Martes zibellina* в различных природных зонах Якутии наблюдаются, в первую очередь, по содержанию гликохолевой и холевой кислот (табл. 1), что, по-видимому, обусловлено их значительной ролью в кишечно-печеночной циркуляции желчных кислот. Содержание холевой кислоты в желчи *Martes zibellina*, обитающих в Центральной Якутии, статистически достоверно ниже, чем в желчи соболей, обитающих в дру-

Таблица 1

Содержание холестерина и желчных кислот в желчи *Martes zibellina* на территории Якутии

Table 1

The content of cholesterol and bile acids in the bile of *Martes zibellina* in Yakutia

Содержание, мг/мл _{желчи} Content, mg/ml _{bile}	Северо-Восточная Якутия North-Eastern Yakutia	Северо-Западная Якутия North-Western Yakutia	Центральная Якутия Central Yakutia	Южная Якутия South Yakutia
Холестерин (tr=22,0 мин.) Cholesterol (tr = 22.0 min.)	1,17±0,16 ^a	0,92±0,21 ^a	0,92±0,21 ^a	0,89±0,28 ^a
Гликохолевая кислота (tr=23,7 мин.) Glycocholic acid (tr = 23.7 min.)	1,66±0,22 ^{a,b}	1,60±0,28 ^{a,b}	1,35±0,23 ^a	1,91±0,34 ^b
Холевая кислота (tr=25,1 мин.) Cholic acid (tr = 25.1 min.)	2,02±0,29 ^a	1,83±0,18 ^a	1,21±0,21 ^b	2,02±0,41 ^a
Н/и желчная кислота (tr=26,3 мин.) * N/a bile acid (tr = 26.3 min.)	0,89±0,12 ^a	0,85±0,17 ^a	0,67±0,12 ^a	0,84±0,21 ^a
Н/и желчная кислота (tr=26,7 мин.) * N/a bile acid (tr = 26.7 min.)	0,31±0,06 ^a	0,30±0,08 ^a	0,18±0,03 ^a	0,26±0,08 ^a
Н/и желчная кислота (tr=27,9 мин.) * N/a bile acid (tr = 27.9 min.)	0,37±0,06 ^a	0,36±0,05 ^a	0,26±0,04 ^a	0,37±0,06 ^a
Сумма желчных кислот The amount of bile acids	5,18±0,75	4,94±0,76	3,88±0,63	5,59±1,1
Жив.корма/растит.корма (по рис.2) Animal feed / vegetable feed (according to Fig. 2)	5,3:1,0	1,6:1,0	0,6:1,0	5,9:1,0

Примечание. Здесь и в табл. 2 значения представлены в виде среднего ± стандартное отклонение (M±σ). За 1 мг принят 1 мг TMS-производных идентифицированных соединений. * – стереоизомер метилгликохолевой кислоты (NIST). Средние значения с одинаковыми буквенными надстрочными индексами внутри строки статистически неразличимы при $p \leq 0,05$ по критерию Ньюмена–Кейлса, $n = 20$.

Note. Here and in the Table 2 the values are presented as mean ± standard deviation (M ± σ). 1 mg of TMS-derivatives is considered as 1 mg of the identified compounds. * – stereoisomer of Methylglycocholic Acid (NIST). The mean values with the same letter superscripts inside the column are not statistically indistinguishable at $p \leq 0.05$, according to the Newman–Keuls test, $n = 20$.

гих климатических зонах Якутии. По-видимому, это обусловлено тем, что именно в Центральной Якутии в рационе *M. zibellina* преобладает пища растительного происхождения (см. табл. 1). Холевая кислота способствует этерификации пальмитиновой кислоты в значительно меньшей степени в сравнении с гликохолевой и таурохолевой кислотами [17]. Максимальные содержания гликохолевой кислоты и общее содержание желчных кислот было отмечено в желчи соболей, обитающих в Южной Якутии, что коррелирует с максимальным отношением животных к растительным кормам в рационе соболей (см. табл. 1).

Содержание холестерина в желчи *Martes zibellina*, обитающих в различных климатических зонах Якутии, достоверно не различается

(см. табл. 1). Не выявлено также статистически значимых половых различий по содержанию холестерина и желчных кислот (табл. 2). Также не обнаружена прямая корреляция между содержанием холестерина и желчных кислот со средней температурой в зимний период.

Таким образом, вследствие различий (преобладания животных кормов над растительными) в зимнем рационе питания *Martes zibellina*, обитающего в различных климатических зонах Якутии, в желчи соболя из Южной Якутии наблюдается максимальное содержание желчных кислот. Северо-Восточную и Северо-Западную зоны Якутии можно определить как переходные в отношении содержания желчных кислот в желчи соболя. В Центральной Якутии, в результате преобладания растительных кормов над животными в зим-

Половые различия по содержанию холестерина и желчных кислот в желчи *Martes zibellina* на территории Якутии

Table 2

Sex differences in the content of cholesterol and bile acids in the bile of *Martes zibellina* in Yakutia

Содержание, мг/мл _{желчи} Content, mg/ml _{bile}	Пол/Sex	Северо-Восточная Якутия North-Eastern Yakutia	Северо-Западная Якутия North-Western Yakutia	Центральная Якутия Central Yakutia	Южная Якутия South Yakutia
Холестерин (tr=22,0 мин.) Cholesterol (tr = 22.0 min.)	Ж/Ф	1,17±0,18	1,14±0,11	0,85±0,08	1,01±0,13
	М/М	1,17±0,12	0,84±0,17	0,98±0,13	0,80±0,15
Гликохолевая кислота (tr=23,7 мин.) Glycocholic acid (tr = 23.7 min.)	Ж/Ф	1,71±0,24	1,47±0,08	1,25±0,16	1,75±0,12
	М/М	1,63±0,21	1,66±0,22	1,43±0,11	2,02±0,18
Холевая кислота (tr=25,1 мин.) Cholic acid (tr = 25.1 min.)	Ж/Ф	2,07±0,15	1,73±0,19	1,09±0,13	1,72±0,25
	М/М	1,98±0,19	1,89±0,17	1,30±0,14	2,24±0,35
Н/и желчная кислота (tr=26,3 мин.)* N/a bile acid (tr = 26.3 min.)	Ж/Ф	0,86±0,12	0,71±0,07	0,65±0,12	0,92±0,14
	М/М	0,91±0,15	0,92±0,17	0,68±0,09	0,77±0,15
Н/и желчная кислота (tr=26,7 мин.)* N/a bile acid (tr = 26.7 min.)	Ж/Ф	0,36±0,06	0,25±0,03	0,18±0,04	0,30±0,03
	М/М	0,28±0,04	0,31±0,04	0,19±0,02	0,22±0,02
Н/и желчная кислота (tr=27,9 мин.)* N/a bile acid (tr = 27.9 min.)	Ж/Ф	0,36±0,05	0,34±0,05	0,24±0,04	0,42±0,03
	М/М	0,38±0,06	0,36±0,04	0,28±0,03	0,34±0,04

нем рационе питания соболя, содержание желчных кислот в желчи минимально.

Выводы

1. Содержание желчных кислот, в первую очередь гликохолевой и холевой, в желчи якутских аборигенных и акклиматизированных соболей в различных климатических зонах Якутии связано с составом рациона питания в зимний период. Чем выше доля животных кормов по сравнению с растительными, тем выше общее содержание желчных кислот в желчи *Martes zibellina*. Эту закономерность необходимо учитывать при организации биотехнологической переработки желчи соболя с получением биоактивных добавок косметологического и медицинского назначения.

2. Содержание холестерина и желчных кислот в желчи соболей, обитающих в различных климатических зонах Якутии, в зимний период достоверно не зависит от половых различий и от климатических условий среды обитания.

Литература

1. Тавровский В.А., Шитарев И.С. Материалы по питанию соболя Северо-Западной Якутии // Зоологический журнал. 1957. Т. 36, вып. 4. С. 608–616.
2. Мельчинов М.С. Материалы по экологии соболя в районе Алдано-Учурского хребта // Науч. сообщ. ЯФ СО АН СССР. 1962. Вып. 1. С. 87–92.

3. Мордосов И.И. Млекопитающие таежной части Западной Якутии. Якутск, 1997. 220 с.

4. Сафронов В.М., Аникин Р.К. Экология соболя, *Martes zibellina* (Carnivora, Mustelidae), в Северо-Восточной Якутии // Зоологический журнал. 2000. Т. 79, № 4. С. 471–479.

5. Чепрасов М.Ю., Мордосов И.И. Материалы по питанию соболя в бассейне среднего течения р. Колымы // Вестник СВФУ. 2011. Т. 8, № 2. С. 36.

6. Захаров Е.С., Сафронов В.М., Павлова А.И. Зимнее питание соболя (*Martes zibellina* L.) в Якутии // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 11. С. 82–87.

7. Hofmann A.F., Hagey L.R., Krasowski M.D. Bile salts of vertebrates: structural variation and possible evolutionary significance // Journal of Lipid Research. Vol. 51. P. 226–246. <https://doi.org/10.1194/jlr.R000042>.

8. Watanabe M., Houten S.M., Matak C., et al. Bile acids induce energy expenditure by promoting intracellular thyroid hormone activation // Nature. 2006. Vol. 439. P. 484–489. <https://doi.org/10.1038/nature04330>.

9. Keitel V., Kubitz R., Häussinger D. Endocrine and paracrine role of bile acids // WJG. 2008. Vol. 14. P. 5620. <https://doi.org/10.3748/wjg.14.5620>.

10. Bunnett N.W. Neuro-humoral signalling by bile acids and the TGR5 receptor in the gastrointestinal tract: Bile acid receptors // J. Physiol. 2014. Vol. 592. P. 2943–2950. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.271155>.

11. Ma H., Patti M.E. Bile acids, obesity, and the metabolic syndrome. Best Practice & Research Clinical Gas-

troenterology. 2014. Vol. 28. P. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2014.07.004>.

12. Беглецов О.А., Кайзер А.А. Биохимические характеристики желчи некоторых видов диких плотоядных животных // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2008. № 3. С. 73–77. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000709111>

13. Млекопитающие Якутии / Под ред. В.А. Тавровского. М.: Наука, 1971. 660 с.

14. Атлас сельского хозяйства Якутской АССР. М.: ГУК, 1989. 115 с.

15. Сафронов В.М., Николаев А.Н., Однокурцев В.А. Очерк зимней экологии соболя (*Martes zibellina* L.) в

западном Предверхоянье // Фауна и экология млекопитающих Якутии: сб. научных трудов. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. С. 24–55.

16. Entemnan C., Holloway R.J., Albright M.L., Leong G.F. Bile acids and lipid metabolism. I. Stimulation of bile lipid excretion by various bile acids // Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. 1968. Т. 127, No. 4. С. 1003–1006.

17. Dawson A.M., Isselbacher K.J. Studies on lipid metabolism in the small intestine with observations on the role of bile salts // The Journal of clinical investigation. 1960. Vol. 39, No. 5. P. 730–740. <https://doi.org/10.1172/JCI104090>.

Поступила в редакцию 01.08.2021

Принята к публикации 17.10.2021

Об авторах

СИДОРОВ Михаил Михайлович, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-0333-261X>, e-mail: sidorov_michail86@mail.ru;

МАМАЕВ Николай Викторович, младший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, e-mail: mamaev_88@bk.ru;

СЛЕПЦОВ Игорь Витальевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, e-mail: neroxasg@mail.ru;

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны, СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, e-mail: jan43@mail.ru;

МИХАЙЛОВ Владислав Васильевич, лаборант, Институт биологических проблем криолитозоны, СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-4498-7743>, e-mail: nethrezim@mail.ru.

Информация для цитирования

Сидоров М.М., Мамаев Н.В., Слепцов И.В., Журавская А.Н., Михайлов В.В. Биохимический состав желчи и питание *Martes zibellina* в зимний период на территории Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 103–111. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-103-111>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-103-111

Biochemical composition of bile and nutrition of *Martes zibellina* in the wintertime in Yakutia

M.M. Sidorov*, N.V. Mamaev, I.V. Sleptsov, A.N. Zhuravskaya, V.V. Mikhailov

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

*sidorov_michail86@mail.ru

Abstract. The composition of the winter diet of *Martes zibellina* sable was studied on the basis of its stomach contents ($n = 390$). The content of bile acids, primarily glycocholic and cholic acids, was associ-

ated with the composition of the diet in wintertime for both local and acclimatized sables in different climatic zones of Yakutia. A high proportion of prey feed in comparison to plant feed resulted in the high total content of bile acids, and vice versa, in the bile of *Martes zibellina*. This pattern should be taken into consideration when organizing biotechnological processing of sable bile in order to obtain bioactive additives for cosmetic and medical purposes. Sex differences and climatic conditions of habitat did not have a significant impact on the content of cholesterol and bile acids in the bile of sables in the wintertime.

Keywords: sable, bile, winter nutrition, cholesterol, bile acids, cholic and glycocholic acids, climatic zones of Yakutia.

Acknowledgements. The authors are grateful to E.N. Nikiforova, the engineer-researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS for the cartographic material as well as hunting farms of the Republic of Sakha (Yakutia) for the materials.

The research was carried out within the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0297-2021-0044, reg. No. 121020500194-9, and No. 0297-2021-0025, reg. No. AAAA-A21-121012190035-9).

References

1. Tavrovskij V.A., Shitarev I.S. Materialy po pitaniyu sobolja Severo-Zapadnoj Jakutii // Zoologicheskij zhurnal. 1957. Vol. 36, Iss. 4. P. 608–616.
2. Mel'chinov M.S. Materialy po jekologii sobolja v rajone Aldano-Uchurskogo hrebta // Nauch. soobshh. JaF SO AN SSSR, 1962. Iss. 1. P. 87–92.
3. Mordosov I.I. Mlekopitajushhie taezhnoj chasti Zapadnoj Jakutii. Jakutsk, 1997. 220 p.
4. Safronov V.M., Anikin R.K. Jekologija sobolja, *Martes zibellina* (Carnivora, Mustelidae), v Severo-Vostochnoj Jakutii // Zoologicheskij zhurnal. 2000. Vol. 79, No. 4. P. 471–479.
5. Cheprasov M.Ju., Mordosov I.I. Materialy po pitaniyu sobolja v bassejne srednego techenija r. Kolyma // Vestnik SVFU. 2011. Vol. 8, No. 2. P. 36.
6. Zaharov E.S., Safronov V.M., Pavlova A.I. Zimnee pitanie sobolja (*Martes zibellina* L.) v Jakutii // Dostizhenija nauki i tehniki APK. 2016. Vol. 30, No. 11. P. 82–87.
7. Hofmann A.F., Hagey L.R., Krasowski M.D. Bile salts of vertebrates: structural variation and possible evolutionary significance // Journal of Lipid Research. Vol. 51. P. 226–246. <https://doi.org/10.1194/jlr.R000042>.
8. Watanabe M., Houten S.M., Matak C., et al. Bile acids induce energy expenditure by promoting intracellular thyroid hormone activation // Nature. 2006. Vol. 439. P. 484–489. <https://doi.org/10.1038/nature04330>.
9. Keitel V., Kubitz R., Häussinger D. Endocrine and paracrine role of bile acids // WJG. 2008. Vol. 14. P. 5620. <https://doi.org/10.3748/wjg.14.5620>.
10. Bunnett N.W. Neuro-humoral signalling by bile acids and the TGR5 receptor in the gastrointestinal tract: Bile acid receptors // J. Physiol. 2014. Vol. 592. P. 2943–2950. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2014.271155>.
11. Ma H., Patti M.E. Bile acids, obesity, and the metabolic syndrome. Best Practice & Research Clinical Gastroenterology. 2014. Vol. 28. P. 573–583. <https://doi.org/10.1016/j.bpg.2014.07.004>.
12. Beglecov O.A., Kajzer A.A. Biohimicheskie harakteristiki zhelchi nekotoryh vidov dikih plotojadnyh zhivotnyh // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologija. 2008. No. 3. P. 73–77. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000709111>.
13. Mlekopitajushhie Jakutii / Pod red. V.A. Tavrovskogo. M.: Nauka, 1971. 660 p.
14. Atlas sel'skogo hozjajstva Jakutskoj ASSR. M.: GUK, 1989. 115 p.
15. Safronov V.M., Nikolaev A.N., Odnokurcev V.A. Oчерк zimnej jekologii sobolja (*Martes zibellina* L.) v zapadnom Predverhojan'e // Fauna i jekologija mlekopitajushhih Jakutii: sb. nauchnyh trudov. Jakutsk: JaF SO AN SSSR, 1985. P. 24–55.
16. Entemnan C., Holloway R.J., Albright M.L., Leong G.F. Bile acids and lipid metabolism. I. Stimulation of bile lipid excretion by various bile acids // Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. 1968. Vol. 127, No. 4. C. 1003–1006.
17. Dawson A.M., Isselbacher K.J. Studies on lipid metabolism in the small intestine with observations on the role of bile salts // The Journal of clinical investigation. 1960. Vol. 39, No. 5. P. 730–740. <https://doi.org/10.1172/JCI104090>.

About the authors

SIDOROV, Mikhail Mikhailovich, Cand. Sci. (Biology), researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0333-261X>, e-mail: sidorov_michail86@mail.ru;

MAMAEV, Nikolai Viktorovich, junior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia;

<https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, e-mail: mamaev_88@bk.ru;

SLEPTSOV, Igor Vitalievich, Cand. Sci. (Biology), researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia;

<http://orcid.org/0000-0002-5980-579X>, e-mail: neroxasg@mail.ru;

ZHURAVSKAYA, Alla Nikolaevna, Dr. Sci. (Biology), professor, chief researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia;

<https://orcid.org/0000-0002-7570-2328>, e-mail: jan43@mail.ru;

MIKHAILOV, Vladislav Vasilievich, assistant, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia;

<https://orcid.org/0000-0003-4498-7743>, e-mail: nethrezim@mail.ru.

Citation

Sidorov M.M., Mamaev N.V., Sleptsov I.V., Zhuravskaya A.N., Mikhailov V.V. Biochemical composition of bile and nutrition of *Martes zibellina* in the wintertime in Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 103–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-103-111>

Ель аянская (*Picea ajanensis*) в Магаданской области: интродукция или реинтродукция?

В.Б. Докучаева, Н.Е. Докучаев*

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, Магадан, Россия

*dokuchaev@ibpn.ru

Аннотация. С конца 19 века считалось, что род *Picea* во флоре Магаданской области представлен только елью сибирской (*P. obovata*), произрастающей в естественном состоянии на ограниченной территории в бассейне р. Яма и сопредельных участках. В результате интродукционных работ, проведенных в 1960–1970-е гг., видовой состав елей региона пополнился елью европейской (*P. abies*), елью сибирской (из западных областей ареала вида) и елью аянской (*P. ajanensis*). В настоящее время аянская ель в искусственных посадках на территории области представлена обособленной группой из шести деревьев в пос. Снежная Долина, расположенном в 20 км к северу от г. Магадан. Все деревья хорошего жизненного состояния. На двух самых высоких из них в 2019 г. впервые заложились стробилы, что свидетельствует об успешной акклиматизации вида в регионе. В отношении бывшего произрастания здесь аянской ели взгляды исследователей были противоречивы, поскольку единственное дерево ели, росшее в окрестностях Магадана и срубленное в декабре 1940 г., одни относили к ели аянской, другие – к ели сибирской. Анализ имеющихся литературных источников и архивных материалов Магаданского краеведческого музея показал, что еще до середины 20 в. в окрестностях Магадана росло одиночное дерево аянской ели. Следовательно, современные посадки этого вида ели в Магаданской области нужно считать реинтродукцией.

Ключевые слова: ель аянская, *Picea ajanensis*, интродукция, реинтродукция, Магаданская область.

Благодарности. Выражаем искреннюю благодарность сотрудникам Магаданского краеведческого музея за содействие при работе с их архивом.

Введение

В сводке «Флора и растительность Магаданской области ...» [1] для рассматриваемой территории приводится только два вида елей – сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и европейская (*P. abies* (L.) Н. Karst). Ель сибирская ограничено произрастает в бассейне р. Яма и на сопредельных территориях [2–10], а ель европейская – лишь в виде искусственных посадок [1]. В составе искусственных насаждений области представлены также ель сибирская и ее гибридные формы с елью европейской [11, 12]. Самые разнообразные в видовом отношении и наиболее возрастные вечнозеленые хвойные культуры в настоящее время имеются лишь в районе пос. Снежная Долина, расположенного в 20 км севернее Магадана. В 1961 г. там была основана Магаданская лесная опытная станция (ЛОС) Дальневосточного института лесного хозяйства, просуществовавшая до начала 1990-х годов. На участке станции уже была рощица сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), заложённая в 1958 г. В 1962 г. в образо-

вавшемся питомнике были высажены молодые дички ели сибирской, привезенные с «Ямского елового острова» [7]. Основные же посадки елей на территории ЛОС производились в 1970-е гг. В этот период там были высажены ель европейская, ель сибирская и их гибридные формы. Сейчас эти виды составляют большую часть еловых насаждений бывшего питомника. В созданном дендрарии также имеется обособленная группа деревьев ели аянской – *Picea ajanensis* Fisch. ex Carr. [11, 12], которые и стали объектом наших изысканий.

Материал и методы исследования

Наблюдения за хвойными насаждениями бывшей ЛОС проводятся нами регулярно, начиная с 2002 года. Отмечаются фенологические, биоморфологические, онтогенетические особенности, плодоношение и урожайность шишек разных видов елей. Шесть деревьев *P. ajanensis* растут тесной обособленной группой. Координаты их местоположения – 59° 44.005' с. ш.,

150° 51.979' в. д. Этим деревьям уделялось особое внимание ввиду их малочисленности, а также противоречивости взглядов в отношении былого произрастания аянской ели в Магаданском регионе. Дело в том, что единственное дерево ели, росшее в окрестностях Магадана и срубленное в 1940 г., в одних источниках относили к ели аянской, в других – к ели сибирской. Для выяснения полной картины, касающейся варварски срубленной ели, нами, наряду с литературными источниками, были изучены также архивные материалы Магаданского краеведческого музея.

Результаты и обсуждение

Земли дендрария бывшей ЛОС расположены на высокой надпойменной террасе правого берега р. Дукча в ее среднем течении. Поверхность участка ровная, уклон незначительный. Почва суглинистая, хорошо увлажненная. Окружающая естественная растительность представлена средневозрастным лиственничником из *Larix cajanderi* Mayr с подлеском из кедрового стланика (*Pinus pumila* (Pall.) Regel). В настоящее время древостой из елей разных видов размещается неравномерно (группами), в которых выделяются отдельные более мощные деревья высотой 8–10 м, достигшие уровня лиственниц первого яруса. Большинство елей имеют хорошее жизненное состояние, перезимовывают без видимых повреждений. Многие из них в онтогенети-

ческом развитии достигли генеративного периода и регулярно плодоносят.

Два дерева ели аянской опережали по высоте и диаметру ствола остальные деревья своей группы. Их высота достигла 8 м при диаметре у основания стволов в 12 и 14 см. Имея вид взрослых растений, они, в отличие от елей других видов, не плодоносили. Впервые оформившиеся молодые женские шишки на этих деревьях нами были отмечены 15 июня 2019 г. Было их немногим более десятка, и располагались они в основном в верхнем ярусе крон. К тому времени шишки уже были довольно крупные и хорошо выделялись пурпурно-красным цветом на фоне зеленой хвои (рис. 1, а). Мужских шишек (колосков) (рис. 1, б) в верхней и средней части кроны было значительно больше. В 2020 г. ни женских шишек, ни мужских колосков на этих елях не было обнаружено. Известно, что аянские ели, впервые приступающие к репродукции, отличаются нерегулярным плодоношением и небольшим количеством шишек, локализованных в верхней части кроны [13].

Шишки ели аянской овально-цилиндрические, тупоконечные, рыхлые. Семена их весьма привлекательны для птиц и зверей. 24 августа 2019 г. шишек на елях уже не было, а под деревьями нам удалось собрать лишь две шишки, одна из которых больше чем наполовину была съедена белой (рис. 2). Это говорит о том, что семена были



Рис. 1. Молодые женские шишки (а) и мужской колосок (б) аянской ели (15.06.2019 г.).

Fig. 1. Young female strobiles (a) and male one (b) of Ayan spruce (June 15, 2019).



Рис. 2. Шишки ели аянской, «обработанные» белкой (24 августа 2019 г.).

Fig. 2. Strobiles of Ayan spruce «processed» by squirrel (August 24, 2019).

полнозерные. Шишки соответствовали размерам аянской ели [14].

Хорошее жизненное состояние и плодоношение *P. ajanensis* свидетельствуют об успешности акклиматизации данного вида ели к условиям Северного Приохотья. В этой связи возникает вопрос, была ли это интродукция или реинтродукция аянской ели на территории Магаданской области? Дело в том, что летом 1933 г. в верховьях р. Магаданка был обнаружен участок строевого леса, раскинувшийся на нескольких десятках гектаров и пораженный своим великолепием. Это говорит о том, что в данном месте лес не подвергался пожарам сотни лет. Для заготовки и вывоза древесины туда даже была проложена тринадцатикилометровая узкоколейная железная дорога [15]. В 1940 г. на данном участке почти у вершины сопки «Сахарная головка» было обнаружено одно дерево 30-метровой ели. Понимая уникальность данной находки, сотрудники местного краеведческого музея на дереве сделали надпись: «Заповедана 15 августа 1940 г. Музей». Несмотря на это, ель была срублена в канун нового 1941 г. Об этих двух событиях (обнаружении и уничтожении уникального природного объекта) в газете «Советская Колыма» было два небольших сообщения научного сотрудника Магаданского краеведческого музея К.К. Ди-

дык¹) [16, 17]. В первой заметке указывалось, что на территории Колымского края в долине р. Яма произрастает ель сибирская, в отношении же ели, найденной у сопки «Сахарная головка», написано: «Установлено, что это аянская ель». Это говорит о том, что сотрудники музея различали эти два вида елей.

Г.Ф. Стариков [6] это дерево также относил к ели аянской. Будучи опытным ботаником и лесоводом, он тем более не мог ошибиться. В его книге есть целый раздел, посвященный ели сибирской, и лишь в конце его в виде сноски на стр. 59 говорится о ели аянской:

¹ Одно дерево ели аянской (*Picea ajanensis* Fisch s. str.) росло на склоне сопки Сахарная головка, в верховьях речки Магаданки, в восьми км от г. Магадана. Ель была двухвершинной, высотой 30 м и диаметром на высоте груди в коре 80 см. Трудно разгадать, каким чудом оказался здесь этот единственный во всей Магаданской области представитель аянской ели, и недаром местный музей сделал на дереве надпись — «Заповедана 15 августа 1940 г. Музей». Но, к сожалению, эту аяскую ель в декабре 1940 года срубили для организации новогодней елки, хотя для этой цели она оказалась непригодной, так как имела вершинную гниль.

Доставленный лесоводом А. А. Соловьевым в местный музей нижний срез этой ели имел диаметр в коре 92 см и возраст 360 лет.

Факт уничтожения заповеданной ели был отмечен газетой «Советская Колыма» 9 февраля 1941 года в статье «Невежество».

К сожалению, ни шишек, ни хвои, ни веток, по которым аянская и сибирская ели хорошо различаются, от данного дерева не сохранилось. В Магаданском краеведческом музее нами были просмотрены «Книги поступлений» за 1941 г. В записи от 14 июня 1941 г. говорится, что в Музей от Магаданского леспромхоза поступило 7 срезов аянской ели, произраставшей в 8 км от Магадана и срубленной в декабре 1940 г. Есть и такая запись: «Ветка аянской ели доставлена с окрестностей г. Магадана». Эта ветка и хвоя позволили бы однозначно сказать, к какому виду елей относилось срубленное дерево. К сожалению, по акту от 1 декабря 1942 г. этот гербарный материал был списан. Видимо хвоя осыпалась, и хранители музейных фондов посчитали, что в таком состоянии сей экспонат не представляет научной ценности.

Что касается шишек, то о них нет упоминаний ни в газетных заметках, ни в «Книге поступлений» краеведческого музея, ни в позже вышедших публикациях. Учитывая значительный возраст (360 лет), дерево, видимо, уже вошло в сенильный период, когда ели перестают плодоно-

¹ Константин Константинович Дидык в Магаданском краеведческом музее занимал должность научного сотрудника в период с 1939 по 1942 г. До приезда в Магадан он заведовал отделом защиты растений в г. Адлер, что говорит о его профессиональной подготовке и как ботаника.

силь [13]. Следует заметить, что аянская ель относится к долговечной древесной породе, отдельные экземпляры которой доживают до 520 лет [18]. Для ели сибирской этот же автор предельный возраст указывает в 300 лет.

В Магаданском краеведческом музее в настоящее время можно видеть лишь спил загубленной ели. Вначале этот экспонат значился как срез ели аянской. В 1968 г. по инициативе А.П. Васьковского запись на табличке была заменена на ель сибирскую. Будучи геологом по основной профессии, А.П. Васьковский как одаренная личность внес заметный вклад и в изучение животного и растительного мира северо-востока Азии [19]. Рассуждая о границах распространения деревьев и кустарников на крайнем северо-востоке СССР, А.П. Васьковский [20] пришел к заключению, что в своем распространении на восток ни ель (как род), ни обыкновенная сосна не проникают за пределы Верхоянского хребта и хребта Сунтар-Хаята. Он писал: «В действительности все северное побережье Охотского моря лежит за восточной границей ели и лишь четыре маленьких островка ее найдены здесь среди лиственничных редколесий и тундр. Два из этих островков, открытые Лисянским и подробно описанные В.Н. Васильевым, находятся в окрестностях Ямска: в долине Ямы в 20 км западнее Ямска и в долине р. Поперечная. Третий островок ели имеется в долине р. Нангтанджа, впадающей в залив Бабушкина, и, наконец, четвертый существовал до недавнего времени в окрестностях Магадана. Все они принадлежат сибирской ели³». В пояснении к сноске 3 он пишет: «В том числе и ель в окрестностях Магадана (*vidi!*), которую в ряде работ ошибочно относили к аянскому виду» [20. С. 189].

Добавлением слова «*vidi!*» автор как бы подчеркивает, что он видел эту ель. На самом деле А.П. Васьковский мог видеть лишь спил и ветку этой ели в краеведческом музее. Как следует из рукописи его автобиографии [19], с декабря 1940 г. он работал в Ленинграде и Москве и вернулся в Магадан лишь летом 1942 г. Ветка от срубленной в конце декабря 1940 г. ели, хранившаяся в краеведческом музее, была списана (уничтожена) по акту от 1/XII 1942 г. Учитывая военное время и основную работу в качестве геолога, сомнительно, чтобы у А.П. Васьковского по возвращении в Магадан было время заниматься этой елью. И почему он написал об

«ошибочном» определении срубленной у Магадана ели лишь по прошествии 18 лет!?

Надо отметить, что В.Н. Васильев [21] экземпляр ели, росший у Магадана, также отнес к *P. obovata*. Будучи докторантом Ботанического института АН СССР (г. Ленинград), он в 1938 г. сделал подробные геоботанические описания Ямских ельников. После 1939 г. в Магадане он уже не был [22]. О варварски срубленной под Магаданом в декабре 1940 г. ели он мог только слышать (или читать). Поэтому, как и А.П. Васьковский, он мог сделать только умозрительное заключение, что у Магадана могла расти только ель сибирская.

Нами были просмотрены публикации, касающиеся северных пределов распространения аянской ели на территории Якутии и Хабаровского края. Результаты представлены на карте (рис. 3).

Можно видеть, что северная граница современного распространения аянской ели проходит по правобережью р. Тимптон, далее по правобережью р. Алдан немногим ниже устья р. Учур [23–28]. Восточнее северные форпосты аянской ели разбросаны по долинам левых притоков р. Мая с выходом к побережью Охотского моря на реках Тукчи и Кекра [14, 29–33]. При этом обращает на себя внимание указание на нахождение одиночных экземпляров аянской ели у с. Кильдемцы [34]. Это село находится в 30 км севернее Якутска (62° 16,660' с. ш., 129° 48,916' в. д.), что почти на 400 км севернее устья р. Учур, где растет аянская ель. В статье З.Е. Чугуновой [35] (из того же сборника) говорится о произрастании в окрестностях сел Кильдемцы и Намцы елей с голубовато-сизым налетом на хвое. Такая окраска хвои характерна для аянской ели, однако автор отнесла эти экземпляры к помесям ели сибирской и аянской. В литературе имеются указания на широкую естественную гибридизацию европейской и сибирской елей [36], но отсутствуют данные, подтверждающие гибридизацию *P. obovata* и *P. ajanensis* [37]. Существование в недавнем прошлом данного изолята аянской ели в настоящее время подвергается сомнению. Если все же допустить, что 65 лет назад в окрестностях Якутска встречались экземпляры аянской ели, то произрастание ее под Магаданом не покажется столь уж невероятным.

Очевидно, что в период голоценового климатического оптимума граница произрастания аянской ели проходила гораздо севернее ее сов-

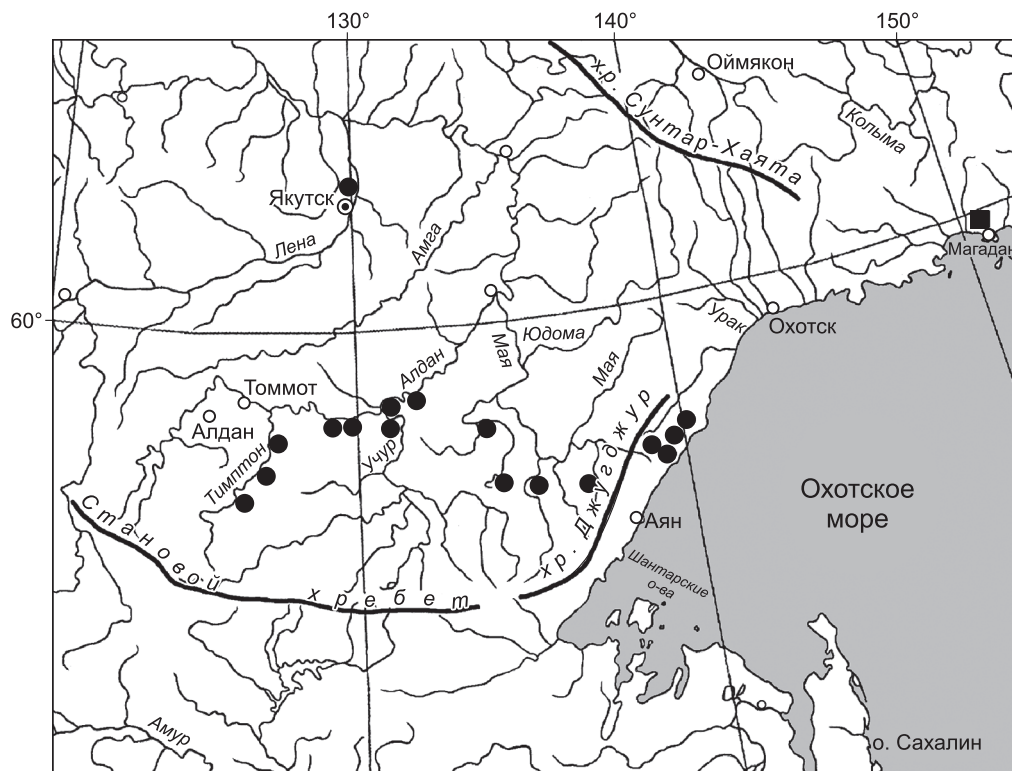


Рис. 3. Северные пределы современного распространения аянской ели в Якутии и Хабаровском крае (черные кружки). Под Магаданом (черный квадрат) указано место вероятного произрастания аянской ели.

Fig. 3. Northern limits of modern distribution of Ayan spruce in Yakutia and Khabarovsk region (black circles). Under Magadan (black square) is indicated the place of probable Ayan spruce growth.

ременного распространения. Последовавшее затем ухудшение условий привело к сокращению и фрагментации, в первую очередь, северных территорий произрастания аянской ели. Сниженное воспроизводство и систематическое воздействие лесных пожаров постепенно привело к выпадению аянской ели из состава лесной растительности. На северном пределе ее распространения этот процесс мог носить необратимый характер [38]. Область современного произрастания ели аянской Ю.И. Манько [14, 32] разделил на три части. В частности, бассейн Алдана и Охотское побережье им были отнесены к области «распыленного распространения преимущественно в верхней части лесного пояса».

Леса с преобладанием ели аянской В.Л. Комаров (цит. по: Манько [32]) считал типичной растительной формацией охотской ботанико-географической (флористической) области, входящей в восточный, или приокеанический, растительный мир. Г.Ф. Стариков [18] также отмечал, что ель аянская требовательна к влажности воз-

духа, и ее следует считать породой приморского муссонного климата.

Во многих работах отмечается, что аянские ельники лучше всего сохранились у верхней границы леса [23, 25, 38]. При сравнении условий произрастания аянской и сибирской елей отмечается, что *P. ajanensis* занимает горные районы от 400–450 м над ур. моря до верхней границы леса, иногда спускается вниз до уровня моря. В отношении же *P. obovata* сказано: «Образует чистые и смешанные леса; в континентальном климате в основном приурочена к долинам рек» [39. С. 25].

Сохранение аянской ели преимущественно в верхнем поясе гор обуславливается устойчивым проникновением сюда влажных океанических воздушных масс и конденсаций влаги горными хребтами [25, 38]. Так что длительное произрастание аянской ели в верховьях одного из распадков магаданского побережья было вполне естественным.

Известно, что сибирская и янская ели по-разному относятся к химическому составу почв.

Сибирская ель не выносит кислых почв [40], тогда как аянская ель встречается исключительно на кислых породах [14, 41]. Место произрастания срубленной под Магаданом ели входит в зону подзолистых Al–Fe-гумусовых почв. По физико-химическим свойствам эти почвы характеризуются сильнокислой реакцией, высокой обменной и особенно гидролитической кислотностью [42].

Росло ли под Магаданом единственное дерево 360-летней аянской ели («последнего из могикан»), или в начале прошлого века здесь еще сохранялись «островки» ельников из *P. ajanensis* и *P. obovata*? В этой связи интерес представляют выдержки из путевых заметок Н.Г. Бэкстона (N.G. Buxton), совершившего в 1901 г. переход на пароходе из Владивостока до с. Гижига [43]. По пути Бэкстон останавливался в селениях Аян, Охотск и Ола. Описывая их, он указывал, что в окрестностях Аяна и Олы растут ели. Для Аяна он приводит такую запись: «... climbing the larch- and fir-covered hills...» («... поднимаясь на холмы, покрытые лиственницей и елями ...»), а для Олы соответственно: «Larch and fir trees crowd the river-bottom down quite to its mouth» («Лиственничные и еловые деревья скапливаются на русле реки почти до самого ее устья») [43. Р. 107]. Эти записи говорят о том, что Бэкстон различал виды хвойных деревьев и вряд ли что-то напутал. Видимо, в начале 1900-х гг. ели еще росли в низовьях р. Ола (всего лишь в 25 км от Магадана!) и на сопредельных участках побережья, но потом исчезли в результате или рубок, или пожаров. Сохранившаяся до 1940 г. под Магаданом 360-летняя ель у сопки «Сахарная головка» могла быть последней из этой «ольской» группировки [44]. Смущает лишь то, что Бэкстон пишет о деревьях на русле реки, т. е. о смытых деревьях, а не о растущих по берегам елях. Конечно, ели могли расти выше по течению реки, куда Бэкстон просто не добрался. Произрастали на берегах Олы вместе аянская и сибирская ели или только одна из этих пород, так и останется загадкой. Если нынешним жителям Олы сказать, что рядом с их поселком еще 100 лет назад произрастали еловые леса, они очень удивятся.

Заслуживает внимания и факт нахождения в 1936 г. еловых шишек при рытье канализационного колодца на постройке Магаданской средней школы [45]. Автор пишет: «Наличие здесь еловых шишек заставляет думать, что в районе

г. Магадана когда-то росла сибирская ель» [45. С. 69]. Естественно, что до обнаружения в 1940 г. аянской ели речь могла идти только о ели сибирской.

Заключение

Хотя однозначных вещественных доказательств (шишек, веток и хвои) от срубленной в декабре 1940 г. в окрестностях Магадана ели не сохранилось, все косвенные данные говорят, что это была ель аянская. На это указывают следующие факты:

1. Все первоначальные записи поступивших в Магаданский краеведческий музей образцов от срубленной у сопки «Сахарная головка» ели (спилы и ветка) были обозначены как «Ель аянская». Делавшие записи сотрудники Музея были хорошо осведомлены о произрастании в бассейне р. Яма Магаданской области сибирской ели, поэтому отнесение срубленного дерева к аянской ели не было случайным.

2. В книге Г.Ф. Старикова [6] сибирской ели, произрастающей в Магаданской области, посвящен отдельный раздел, но одиночную ель, срубленную под Магаданом, он однозначно отнес к ели аянской.

3. На р. Яма участие сибирской ели в составе древостоев резко уменьшается с высотой местности, и на верхнем пределе своего произрастания (350 м над ур. моря) ели достигают лишь 3–5 м высоты [9]. Ель, срубленная под Магаданом, имела высоту 30 м и росла на вершине сопки (не ниже 370 м над ур. моря), что характерно для *P. ajanensis*.

4. Почвы территории произрастания срубленной ели по физико-химическим свойствам характеризуются сильнокислой реакцией [42], что соответствует условиям произрастания аянской ели, но не сибирской.

5. Возраст в 360 лет более подходит аянской ели, чем ели сибирской.

6. Отнесение В.Н. Васильевым [21] и А.П. Васильевым [20] растущей под Магаданом ели к *Picea obovata* основано исключительно на умозрительном заключении и игнорировании или незнании с первичными архивными документами краеведческого музея.

Исходя из всех выше изложенных фактов, считаем, что до середины прошлого века в окрестностях Магадана росла аянская ель. Сохранилась здесь она исключительно благодаря морскому климату и длительному отсутствию на участке ее

произрастания пожаров. Это позволяет современные посадки аянской ели в Магаданской области считать реинтродукцией.

Литература

1. Флора и растительность Магаданской области (конспект сосудистых растений и очерк растительности). Магадан: ИБПС ДВО РАН, 2010. 364 с.
2. Булычев И. Путешествие по восточной Сибири. Ч. 1. Якутская область, Охотский край. СПб.: РАН, 1856. 298 с.
3. Васильев В.Н. Древесные породы Охотско-Колымского края // Колыма. 1939а. № 3. С. 85–88.
4. Васильев В.Н. Растительность Ольского района // Колыма. 1939б. № 6. С. 67–80.
5. Васильев В.Н. Сибирская ель (*Picea obovata* Ldb.) на севере Охотского побережья // Известия всесоюзного географического общества. 1945. Т. 77, вып. 5. С. 293–298.
6. Стариков Г.Ф. Леса Магаданской области. Магадан: Кн. изд-во, 1958. 224 с.
7. Науменко З.М. *Picea obovata* Ldb. на крайнем северо-восточном пределе своего ареала // Ботан. журн. 1964. Т. 49, вып. 7–12. С. 1008–1013.
8. Мочалова О.А. О новом местонахождении *Picea obovata* (Pinaceae) на Крайнем Северо-Востоке Азии // Ботан. журн. 1996. Т. 81, № 12. С. 126–132.
9. Мочалова О.А., Андриянова Е.А. Об изолированных местонахождениях *Picea obovata* (Pinaceae) на Северо-Востоке Азии // Ботан. журн. 2004. Т. 89, № 12. С. 1823–1839.
10. Андриянова Е.А., Мочалова О.А. О распространении и семеношении ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в Ямском «словом острове» на юге Магаданской области // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2012. № 3. С. 32–35.
11. Докучаева В.Б., Докучаев Н.Е. Виды елей в посадках в окрестностях г. Магадана // Вестник ДВО РАН. 2015а. № 5. С. 78–82.
12. Докучаева В.Б., Докучаев Н.Е. Состояние посадок елей в Магаданской области // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2015б. № 4. С. 67–75.
13. Ухваткина О.Н., Комарова Т.А., Трофимова А.Д. Особенности онтогенеза *Picea ajanensis* (Lindl. Et Gord.) Fisch. Ex Carr. в условиях среднегорного пояса Южного Сихотэ-Алиня // Лесной вестник. 2010. № 3. С. 169–173.
14. Манько Ю.И. Ель аянская. Л.: Наука, 1987. 280 с.
15. Козлов А.Г. Магадан. Конспект прошлого. Магадан: Кн. изд-во, 1989. 286 с.
16. Дидык. Ель около Магадана // Советская Колыма. 1940. № 200 (1394).
17. Дидык К. Неужество // Советская Колыма. 1941. № 33 (1538).
18. Стариков Г.Ф. Леса северной части Хабаровского края (низовье Амура и Охотское побережье). Хабаровск: Кн. изд-во, 1961. 208 с.
19. Андреев А.В. Вклад А.П. Васьковского в познание биологического разнообразия и охрану природы Северо-Востока Азии // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2007. № 1. С. 37–46.
20. Васьковский А.П. Новые данные о границах распространения деревьев и кустарников – ценозообразователей на крайнем северо-востоке СССР // Материалы по геологии и полезным ископаемым северо-востока СССР. 1958. № 13. С. 187–204.
21. Васильев В.Н. Дизъюнктивные и сплошные ареалы // Ботан. журн. 1957. Т. 42, № 5. С. 714–727.
22. Неишатаева В.Ю. Жизнь и судьба выдающегося исследователя флоры и растительности Дальнего Востока Виктора Николаевича Васильева (к 120-летию со дня рождения) // Ботан. журн. 2011. Т. 96, № 2. С. 280–292.
23. Поварницын В.А. Леса долины р. Алдана от г. Томмота до устья р. Ноторы // Лесные ресурсы Якутии. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. С. 125–154. (Тр. совета по изучению производительных сил. Сер. Якутская. Вып. 3).
24. Поздняков Л.К., Гортинский В.И. Леса и лесные ресурсы Южной Якутии. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 119 с.
25. Тюлина Л.Н. Лесная растительность средней и нижней части бассейна Учкура. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1962. 150 с.
26. Щербаков И.П. Типы леса Южной Якутии // Леса Южной Якутии. М.: Наука, 1964. С. 5–109.
27. Караваев М.Н. Растительный покров // Якутия. М.: Наука, 1965. С. 247–292.
28. Кабанов Н.Е. Хвойные деревья и кустарники Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 175 с.
29. Манько Ю.И., Ворошилов В.П. К характеристике аянских ельников на северном пределе их распространения // Биологические ресурсы суши севера Дальнего Востока. Мат-лы симпоз. Т. 2. Владивосток: ДВНЦ АН СССР и Биолого-почв. ин-т, 1971а. С. 173–182.
30. Манько Ю.И., Ворошилов В.П. О северном пределе распространения ели *Picea ajanensis* в материковой части Дальнего Востока // Ботан. журн. 1971б. Т. 56, № 9. С. 1343–1351.
31. Манько Ю.И., Сапожников А.П., Ворошилов В.П. Краткий очерк растительности и почв Аяно-Майского района Хабаровского края // Биологические ресурсы суши севера Дальнего Востока. Мат-лы симпоз. Т. 2. Владивосток: ДВНЦ АН СССР и Биолого-почв. ин-т, 1971. С. 142–158.
32. Манько Ю.И. Ель аянская и особенности ее географического распространения // Комаровские чтения. Вып. 30. Владивосток: Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 3–28.
33. Куприянов Н.В., Веретенников С.С., Зинин В.И. Лиственный лес северо-восточной части Хабаровского края (Юдомо-Майское нагорье) // Ботан. журн. 1987. Т. 72, № 8. С. 1107–1115.

34. Чугунов Б.В. Леса Якутии и возможность их отражения в Якутском ботаническом саду // Интродукция растений в Центральной Якутии. М.; Л.: Наука, 1965. С. 45–76.
35. Чугунова З.Е. Ассортимент деревьев и кустарников для озеленения населенных пунктов Якутии // Интродукция растений в Центральной Якутии. М.; Л.: Наука, 1965. С. 93–144.
36. Правдин Л.Ф. Ель европейская и ель сибирская в СССР. М., 1975. 177 с.
37. Потемкин О.Н. К вопросу о естественной гибридации ели в Сибири и на Дальнем Востоке России // Лесоведение, 2009. № 1. С. 67–73.
38. Манько Ю.И., Ворошилов В.П. Основные итоги изучения аянских ельников северных районов Хабаровского края и Амурской области // Лесоводственные аспекты изучения растительного покрова Дальнего Востока. Владивосток, 1974. С. 5–21. (Тр. БПИ ДВНЦ АН СССР. Новая серия. Т. 23 (126)).
39. Конспект флоры Азиатской России: Сосудистые растения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.
40. Усенко Н.В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока: Справочная книга. (Издание второе, переработанное и дополненное). Хабаровск: Кн. изд-во, 1984. 272 с.
41. Конспект флоры Якутии: Сосудистые растения. Новосибирск: Наука, 2012. 272 с.
42. Игнатенко И.В., Богданов И.Е., Пугачев А.А. Подзолистые Al–Fe-гумусовые почвы Магаданской области // География и генезис почв Магаданской области. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 123–142.
43. Allen J.A. Report on the Mammals collected in Northeastern Siberia by the Jesup North Pacific Expedition, with itinerary and field notes, by N.G. Buxton // Bull. Amer. Mus. of Natural History, 1903. Vol. 19. P. 101–184.
44. Докучаев Н.Е. Любопытные факты о растениях и животных Северо-Восточной Азии // Геология, география, биологическое разнообразие и ресурсы Северо-Востока России. Материалы Дальневосточной региональной конф., посвящ. памяти А.П. Васильковского и в честь его 100-летия (Магадан, 22–24 ноября 2011 г.). Магадан: СВНЦ РАН, 2011. С. 123.
45. Хмелинин А.П. Охотско-Колымский край // Колыма. 1939. № 5. С. 68–78.

Поступила в редакцию 04.09.2020

Принята к публикации 24.09.2021

Об авторах

ДОКУЧАЕВА Вера Борисовна, научный сотрудник, Институт биологических проблем Севера, ДВО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 18, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2806-2516>, e-mail: vbdok@ibpn.ru;

ДОКУЧАЕВ Николай Евгеньевич, доктор биологических наук, заведующий лабораторией, Институт биологических проблем Севера, ДВО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 18, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1331-4901>, Researcher ID: B-1624-2017, e-mail: dokuchaev@ibpn.ru.

Информация для цитирования

Докучаева В.Б., Докучаев Н.Е. Ель аянская (*Picea ajanensis*) в Магаданской области: интродукция или реинтродукция? // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 4. С. 112–121. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-112-121>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-112-121

Ayan spruce in the Magadan region: introduction or reintroduction?

V.B. Dokuchaeva, N.E. Dokuchaev*

Institute of Biological Problems of the North, FEB RAS, Magadan, Russia

**dokuchaev@ibpn.ru*

Abstract. Since the end of the 19th century, it was believed that the genus *Picea* in the flora of the Magadan Region was represented only by the Siberian spruce (*P. obovata*), growing in its natural state at a limited territory in the Yama River basin and adjacent areas. As a result of introduction works, carried

out in 1960-1970s, the composition of the spruce species of the region was supplemented by European (*P. abies*), Siberian (*P. obovata* - from the western areas of the species range), and Ayan (*P. ajanensis*) spruces. At present, the Ayan spruce is represented in artificial plantings by a separate group of six trees in the village of Snezhnaya Dolina, located 20 km north of Magadan. All the trees are in good living condition. In 2019, strobiles were formed on the two tallest of them for the first time, which indicates the successful acclimatization of the species in the region. Researchers' opinions on the prior existence of the Ayan spruce here were contradictory, because the only spruce tree that grew in the Magadan area and was cut down in December 1940, was considered by some people as Ayan spruce, and by others as Siberian one. The analysis of available literature sources and archive materials of the Magadan Local History Museum showed that even before the middle of the 20th century a single tree of the Ayan spruce grew in Magadan environs. Therefore, modern plantings of this species of spruce in the Magadan Region should be considered as reintroduction.

Keywords: Ayan spruce, *Picea ajanensis*, introduction, reintroduction, the Magadan Region.

Acknowledgements. We express our sincere gratitude to the staff of the Magadan Local History Museum for assistance in working with their archive.

References

1. *Flora i rastitelnost Magadanskoy oblasti* (konspekt sosudistyykh rasteniy i ocherk rastitelnosti). Magadan: IBPS DVO RAN, 2010. 364 p.
2. *Bulychov I.* Puteshestvie po vostochnoy Sibiri. Ch. 1. Yakutskaya oblast, Okhotskiy kray. SPb.: RAN, 1856. 298 p.
3. *Vasilev V.N.* Drevesnye porody Okhotsko-Kolym-skogo kraya // *Kolyma*. 1939a. No. 3. S. 85–88.
4. *Vasilev V.N.* Rastitelnost Olskogo rayona // *Kolyma*. 1939b. No. 6. P. 67–80.
5. *Vasilev V.N.* Sibirskaya el (*Picea obovata* Ldb.) na severe Okhotskogo poberezhya // *Izvestiya vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*. 1945. Vol. 77, Iss. 5. P. 293–298.
6. *Starikov G.F.* Lesa Magadanskoy oblasti. Magadan: Kn. izd-vo, 1958. 224 s.
7. *Naumenko Z.M.* *Picea obovata* Ldb. na kraynem severo-vostochnom predele svoego areala // *Botan. Zhurn.* 1964. Vol. 49, Iss. 7–12. P. 1008–1013.
8. *Mochalova O.A.* O novom mestonakhozhdenii *Picea obovata* (Pinaceae) na Kraynem Severo-Vostoke Azii // *Botan. Zhurn.* 1996. Vol. 81, No. 12. P. 126–132.
9. *Mochalova O.A., Andriyanova Ye.A.* Ob izolirovannykh mestonakhozhdeniyakh *Picea obovata* (Pinaceae) na Severo-Vostoke Azii // *Botan. Zhurn.* 2004. Vol. 89, No. 12. P. 1823–1839.
10. *Andriyanova Ye.A., Mochalova O.A.* O rasprostraneni i semenoshenii eli sibirskoy (*Picea obovata* Ledeb.) v Yamskom «elovom ostrove» na yuge Magadanskoy oblasti // *Vestnik SVNTs DVO RAN*. 2012. No. 3. P. 32–35.
11. *Dokuchaeva V.B., Dokuchaev N.E.* Vidy eley v posadkakh v okrestnostyakh g. Magadana // *Vestnik DVO RAN*. 2015a. No. 5. P. 78–82.
12. *Dokuchaeva V.B., Dokuchaev N.E.* Sostoyanie posadok eley v Magadanskoy oblasti // *Vestnik SVNTs DVO RAN*. 2015b. No. 4. P. 67–75.
13. *Ukhvatkina O.N., Komarova T.A., Trofimova A.D.* Osobennosti ontogeneza *Picea ajanensis* (Lindl. Et Gord.) Fisch. Ex Carr. v usloviyakh srednegornogo poyasa Yuzhnogo Sikhote-Alinya // *Lesnoy vestnik*. 2010. No. 3. P. 169–173.
14. *Manko Yu.I.* Yel ayanskaya. L.: Nauka, 1987. 280 p.
15. *Kozlov A.G.* Magadan. Konspekt proshlogo. Magadan: Kn. izd-vo, 1989. 286 p.
16. *Didyk K.* Yel okolo Magadana // *Gazeta «Sovetskaya Kolyma»*. 22.08.1940. No. 200 (1394).
17. *Didyk K.* Nevezhestvo // *Gazeta «Sovetskaya Kolyma»*. 09.02.1941. No. 33 (1538).
18. *Starikov G.F.* Lesa severnoy chasti Khabarovskogo kraya (nizove Amura i Okhotskoe poberezhie). Khabarovsk: Kn. izd-vo, 1961. 208 p.
19. *Andreev A.V., Vklad A.P.* Vaskovskogo v poznanie biologicheskogo raznoobraziya i okhranu prirody Severo-Vostoka Azii // *Vestnik SVNTs DVO RAN*. 2007. No. 1. P. 37–46.
20. *Vaskovskiy A.P.* Novye dannye o granitsakh rasprostraneniya derevev i kustarnikov – tsenozoobrazovateley na kraynem severo-vostoke SSSR // *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym severo-vostoka SSSR*. 1958. No. 13. P. 187–204.
21. *Vasilev V.N.* Dizyunktivnye i sploshnye arealy // *Botan. zhurn.* 1957. Vol. 42, No. 5. P. 714–727.
22. *Neshataeva V.Yu.* Zhizn i sudba vydayushchegosya issledovatelya flory i rastitelnosti Dalnego Vostoka Viktora Nikolaevicha Vasileva (k 120-letiyu so dnya rozhdeniya) // *Botan. Zhurn.* 2011. Vol. 96, No. 2. P. 280–292.
23. *Povarnitsyn V.A.* Lesa doliny r. Aldana ot g. Tom-mota do ustya r. Notory // *Lesnye resursy Yakutii*. L.: Izd-vo AN SSSR, 1932. P. 125–154. (Tr. soveta po izucheniyu proizvoditelnykh sil. Ser. Yakutskaya. Vyp. 3).
24. *Pozdnyakov L.K., Gortinskiy V.I.* Lesa i lesnye resursy Yuzhnoy Yakutii. M.: Izd-vo AN SSSR, 1960. 119 p.
25. *Tyulina L.N.* Lesnaya rastitelnost sredney i nizhney chasti basseyna Uchura. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1962. 150 p.
26. *Shcherbakov I.P.* Tipy lesa Yuzhnoy Yakutii // *Lesnaya Yuzhnoy Yakutii*. M.: Nauka, 1964. P. 5–109.

27. Karavaev M.N. Rastitelnyy pokrov // Yakutiya. M.: Nauka, 1965. P. 247–292.
28. Kabanov N.Ye. Khvoynye derevya i kustarniki Dalnego Vostoka. M.: Nauka, 1977. 175 p.
29. Manko Yu.I., Voroshilov V.P. K kharakteristike ayanskikh elnikov na severnom predele ikh rasprostraneniya // Biologicheskie resursy sushi severa Dalnego Vostoka. Mat-ly simpoz. T. 2. Vladivostok: DVNTs AN SSSR i Biologo-pochv. in-t, 1971a. P. 173–182.
30. Manko Yu.I., Voroshilov V.P. O severnom predele rasprostraneniya eli *Picea ajanensis* v materikovoy chasti Dalnego Vostoka // Botan. Zhurn. 1971b. Vol. 56, No. 9. P. 1343–1351.
31. Manko Yu.I., Sapozhnikov A.P., Voroshilov V.P. Kratkiy ocherk rastitelnosti i pochv Ayano-Mayskogo rayona Khabarovskogo kraya // Biologicheskie resursy sushi severa Dalnego Vostoka. Mat-ly simpoz. T. 2. Vladivostok: DVNTs AN SSSR i Biologo-pochv. in-t, 1971. P. 142–158.
32. Manko Yu.I. Yel ayanskaya i osobennosti ee geograficheskogo rasprostraneniya // Komarovskie chteniya. Vyp. 30. Vladivostok: Izd-vo DVNTs AN SSSR, 1983. P. 3–28.
33. Kupriyanov N.V., Veretennikov S.S., Zinin V.I. Listvennichnye lesa severnoy chasti Khabarovskogo kraya (Yudomo-Mayskoe nagore) // Botan. Zhurn. 1987. Vol. 72, No. 8. P. 1107–1115.
34. Chugunov B.V. Lesa Yakutii i vozmozhnost ikh otrazheniya v Yakutskom botanicheskom sadu // Introduksiya rasteniy v Tsentralnoy Yakutii. M.; L.: Nauka, 1965. P. 45–76.
35. Chugunova Z.Ye. Assortiment derevev i kustarnikov dlya ozeleneniya naselennykh punktov Yakutii // Introduksiya rasteniy v Tsentralnoy Yakutii. M., L.: Nauka, 1965. P. 93–144.
36. Pravdin L.F. Yel evropeyskaya i el sibirskaya v SSSR. M. 1975. 177 p.
37. Potemkin O.N. K voprosu o estestvennoy gibridizatsii eli v Sibiri i na Dalnem Vostoke Rossii // Lesovedenie. 2009. No. 1. P. 67–73.
38. Manko Yu.I., Voroshilov V.P. Osnovnye itogi izucheniya ayanskikh elnikov severnykh rayonov Khabarovskogo kraya i Amurskoy oblasti // Lesovodstvennye aspekty izucheniya rastitelnogo pokrova Dalnego Vostoka. Vladivostok, 1974. P. 5–21. (Tr. BPI DVNTs AN SSSR. Novaya seriya. Vol. 23 (126)).
39. Konspekt flory Aziatskoy Rossii: Sosudistye rasteniya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2012. 640 p.
40. Usenko N.V. Derevya, kustarniki i liany Dalnego Vostoka: Spravochnaya kniga. (Izdanie vtroe, pererabotannoe i dopolnennoe). Khabarovsk: Kn. izd-vo, 1984. 272 p.
41. Konspekt flory Yakutii: Sosudistye rasteniya. Novosibirsk: Nauka, 2012. 272 p.
42. Ignatenko I.V., Bogdanov I.Ye., Pugachev A.A. Podzolistye Al-Fe-gumusovye pochvy Magadanskoy oblasti // Geografiya i genezis pochv Magadanskoy oblasti. Vladivostok: DVNTs AN SSSR, 1980. P. 123–142.
43. Allen J.A. Report on the Mammals collected in Northeastern Siberia by the Jesup North Pacific Expedition, with itinerary and field notes, by N.G. Buxton // Bull. Amer. Mus. of Natural History, 1903. Vol. 19. P. 101–184.
44. Dokuchaev N.E. Lyubopytnye fakty o rasteniyakh i zhivotnykh Severo-Vostochnoy Azii // Geologiya, geografiya, biologicheskoe raznoobrazie i resursy Severo-Vostoka Rossii. Materialy Dalnevostochnoy regionalnoy konf., posvyashch. pamyati A.P. Vaskovskogo i v chest ego 100-letiya (Magadan, 22–24 noyabrya 2011 g.). Magadan: SVNTs RAN, 2011. P. 123.
45. Khmelinin A.P. Okhotsko-Kolymskiy kray // Kolyma. 1939. No. 5. P. 68–78.

About the authors

DOKUCHAEVA, Vera Borisovna, researcher, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, 18 Portovaya str., Magadan 68500, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-2806-2516>, e-mail: vbdok@ibpn.ru;

DOKUCHAEV, Nikolay Evgenyevich, dr. sci. (Biology), laboratory head, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, 18 Portovaya str., Magadan 68500, Russia,
<https://orcid.org/0000-0002-1331-4901>, Researcher ID: B-1624-2017, e-mail: dokuchaev@ibpn.ru.

Citation

Dokuchaeva V.B., Dokuchaev N.E. Ayan spruce in the Magadan region: introduction or reintroduction? // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 112–121. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-112-121>

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.073

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131

Разработка полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата

Е.С. Колесова*, О.В. Гоголева, П.Н. Петрова

Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия

*lenok27294@mail.ru

Аннотация. В настоящее время при разработке новых функциональных полимерных материалов, особенно арктического назначения, недостаточно обеспечить им повышение основных эксплуатационных показателей – прочности, эластичности, износостойкости, а необходимо создавать полимерные материалы с учетом обеспечения многочисленных требований к эксплуатации. Одно из важных требований – стабильность свойств при воздействии климатических факторов. В данной работе приведены результаты сравнительных исследований физико-механических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена и модифицированных полимерных композиционных материалов до и после стендовых натурных испытаний на климатическом полигоне в г. Якутск. Исследования изменения физико-механических показателей экспонированных образцов проводились через 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 месяцев, также изучены изменения физико-химической структуры методом ИК-спектроскопии. Установлено, что в условиях резко-континентального климата Якутии сверхвысокомолекулярный полиэтилен и композит, содержащий 5 мас. % углеродных волокон марки «Белум», подвергаются старению уже к четвертому месяцу экспонирования. В связи с этим сверхвысокомолекулярный полиэтилен не только модифицировали углеродными волокнами для повышения физико-механических и триботехнических показателей, а также вводили стабилизатор марки «СО-4» производства НИОХ СО РАН, препятствующий, в первую очередь, развитию деструктивно-окислительных процессов в композиционном материале. Установлено, что ПКМ на основе СВМПЭ, содержащий 0,5 мас. % стабилизатора, сохраняет свои деформационно-прочностные свойства на уровне неэкспонированного образца в течение 270 дней. Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что дополнительная модификация композита СВМПЭ-УВ стабилизатором марки СО-4 приводит к замедлению окислительно-деструктивных процессов композита на открытом воздухе, что положительно сказывается на сохранении физико-механических показателей длительное время в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов. Этот факт позволяет прогнозировать высокую работоспособность изделий из разработанного материала в условиях резко-континентального климата Якутии.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, углеродные волокна, полимерный композиционный материал, климатические испытания, физико-механические свойства, термостабилизатор, натурное экспонирование, Арктика.

Благодарности. Работа выполнена по Госзаданию Министерства науки и высшего образования РФ (Рег. № НИОКР АААА-А21-121011590012-9).

Введение

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) отличается от других полимеров высокими износостойкостью, прочностью, удар-

ной стойкостью, агрессивно- и морозостойкостью и характеризуется низким коэффициентом трения [1–3]. Композиты на основе СВМПЭ перспективны для футеровки емкостей, реакторов и

различных поверхностей [4–6], а также для производства труб и искусственных катков.

В настоящее время при разработке новых функциональных полимерных материалов, особенно арктического назначения, недостаточно обеспечить им повышение основных эксплуатационных показателей, таких как прочность, эластичность, износостойкость, электропроводность. Необходимо создавать полимерные материалы с учетом обеспечения многочисленных требований эксплуатации в экстремальных условиях Севера, одним из которых является стабильность свойств при воздействии климатических факторов.

Известно, что при продолжительном влиянии низких или высоких температур, а также при перепаде температур, при замерзании и оттаивании влаги при контакте материала с окружающей средой в полимерах происходят структурные и химические превращения. В полимерных матрицах эти процессы протекают по-разному. У одних полимеров структурные изменения протекают достаточно быстро, и это может стать причиной сокращения долговечности их эксплуатации. В других материалах, например, с низкой химической стойкостью, при взаимодействии со средой могут происходить химические превращения, существенно влияющие на технические показатели. Климатические испытания помогают не только определять текущее изменение свойств материала, но и прогнозировать изменение данных свойств в определенном будущем [7, 8].

Проведены стендовые натурные испытания образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена и композиционного материала на его основе без и со стабилизатором в соответствии с ГОСТ 9.708-83 на климатическом полигоне, расположенном в г. Якутск. Срок экспонирования образцов составил 12 месяцев.

Материалы и методика исследований

В качестве полимерной матрицы был выбран СВМПЭ марки Gur-4150 с молекулярной массой $9,2 \cdot 10^6$ г/моль. В качестве армирующего наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки «Белум» (ОАО «Светлогорск Химволокно» (Беларусь)). Удельная масса составляет $\approx 1,6$ г/см³, диаметр волокон – 7–10 мкм. В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4 производства НИОХ СО РАН. Он обладает уникальным комплексом полезных свойств: нетоксичен (относится к III–IV классам опасности по ГОСТ 12.1007.76), не

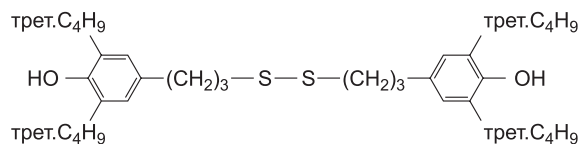


Рис. 1. ди-[3-(3,5-ди-(1,1-диметилэтил)-4-гидроксифенил)пропил]дисульфид.

Fig. 1. di-[3-(3,5-di-(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxyphenyl)propyl]disulfide.

окрашивает полимерные материалы, практически не летуч и термостабилен при температурах выше 250 °С, улучшает прочность, стойкость на изгиб, долговечность и устойчивость к механической нагрузке изделий из полимерных материалов. Химическая формула СО-4 приведена на рис. 1.

Переработка сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полимерных композиционных материалов (ПКМ) на его основе проводилась с использованием технологии компрессионного спекания при режиме: давление 10 МПа, температура 180 °С, время выдержки 20 мин.

Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, модуль упругости определяли по ГОСТ 11262-80 на испытательной машине “UTS-20K”.

Метод инфракрасной спектроскопии использован для изучения изменений физико-химической структуры ПКМ. ИК-спектры образцов ПКМ регистрировали методом неполного внутреннего отражения на спектрометре Varian FTIR 7000 Spectrometr в области частот 400–4000 см^{–1}. Идентификацию и анализ ИК-спектров осуществляли по известным методикам с использованием библиотеки спектрометра и данных по ИК-спектрам полимеров.

Исследование изменения основных свойств композитов при естественном старении в климатических условиях, характерных для г. Якутск, проводили по ГОСТ 9.708-83. Экспонирование выполнялось на открытом испытательном полигоне Института проблем нефти и газа СО РАН (ИПНГ СО РАН) – специально оборудованный открытый испытательный полигон обеспечивал ориентацию образцов на юг, угол наклона к линии горизонта составлял 45°, нижний край образцов был расположен на высоте не менее 60 см от грунта.

Естественное старение сопровождается воздействием на полимер изменяющихся климатических условий: естественного ультрафиолето-

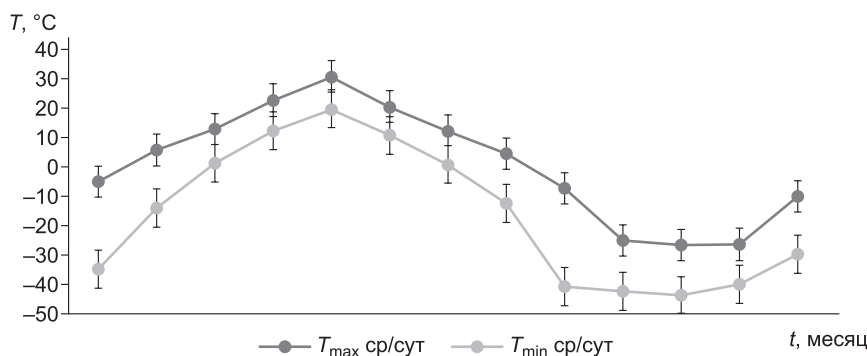


Рис. 2. Максимальные и минимальные среднесуточные температуры окружающего воздуха по месяцам.

Fig. 2. Maximum and minimum average daily ambient temperatures by months.

вого излучения, атмосферных осадков и отчасти озона, колебаниями температуры и других факторов. Климат Республики Саха (Якутия) субарктический, резко-континентальный. Вся территория республики относится к районам Крайнего Севера. Амплитуда средних температур января и июля превышает 75 °C. На рис. 2 приведены максимальные и минимальные среднесуточные температуры по месяцам.

Обсуждение результатов исследований

В ранее проведенных работах показано, что оптимальным комплексом эксплуатационных характеристик обладает композит, содержащий 5 мас. % углеродного волокна марки «Белум» [9]. Поэтому климатические испытания проводились на данном композиционном материале. Образцы в виде пластин и столбиков были выставлены в марте 2018 г. на открытый полигон (рис. 3) при

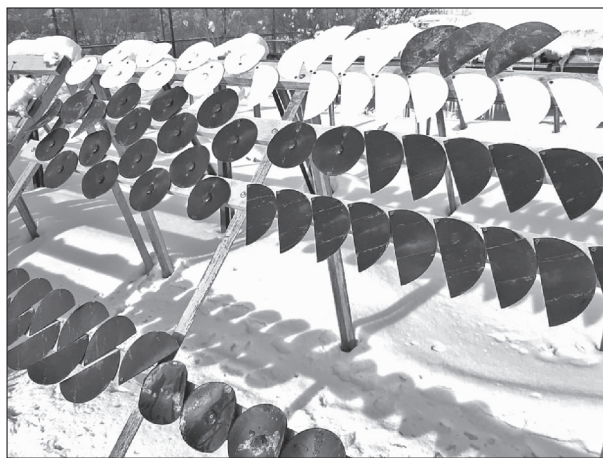


Рис. 3. Экспонированные образцы.

Fig. 3. The exposed samples.

естественных атмосферных условиях г. Якутск. Исследования изменения физико-механических показателей, экспонированных образцов проводились через 1, 3, 6, 9 и 12 месяцев.

Известно, что старению способствуют свет, частая смена циклов нагрев–охлаждение, воздействие кислорода, озона и другие атмосферные факторы. Сущность старения заключается в сложной цепной реакции, протекающей с образованием свободных радикалов (реже ионов), которая сопровождается деструкцией и структурированием полимера. Обычно старение является результатом окисления полимера атмосферным кислородом. Если преобладает деструкция, то полимер размягчается, выделяются летучие вещества. При структурировании повышается хрупкость, наблюдаются потеря эластичности и повышение модуля упругости [10].

Результаты исследований физико-механических свойств СВМПЭ и композита на основе СВМПЭ и УВ, экспонированных в климатических условиях г. Якутск, представлены в таблице 1.

В качестве показателей изменения свойств выбраны прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве и модуль упругости при разрыве. После определения упругопрочностных характеристик композитов, подвергнутых действию климатических факторов, в соответствии с ГОСТ 9.708-83 [11] вычисляли коэффициент сохранения свойств.

Коэффициент сохранения упругопрочностных характеристик (K_t) в процентах вычисляли по формуле

$$K_t = \frac{P_t}{P_0} \cdot 100,$$

где P_t – значение показателя после испытаний к моменту времени t ; P_0 – значение показателя до испытаний.

Установлено, что после экспонирования в течение 1 месяца деформационно-прочностные свойства исходного СВМПЭ и композитов повышаются по сравнению со свойствами исходных образцов. Зарегистрировано повышение относительного удлинения на 35 %, прочность на 20 % в случае немодифицированного СВМПЭ. Относительное удлинение ПКМ увеличилось на 10 % при сохранении прочности на уровне исходного (контрольного) образца. Коэффициент сохранения значений модуля упругости СВМПЭ и ПКМ составляет 92 и 105 % соответственно.

Показано, что относительное удлинение немодифицированного СВМПЭ повышается в 1,6 раза после экспонирования в течение 3 месяцев, затем после 6 месяцев экспонирования на открытом воздухе эластичность у СВМПЭ резко падает до 22 раз по сравнению с исходным полимером. При испытании на растяжение у экспонированных в течение 6, 9 и 12 месяцев образцов наблюдается хрупкое разрушение (рис. 4). В течение всего экспонирования наблюдается монотонное снижение прочности при разрыве. Прочность образца, выставленного в течение 12 месяцев, ухудшилась в 1,8 раза. Таким образом, показано, что образцы СВМПЭ и композиты на его основе, модифицированные УВ, в субарктическом климате РС(Я) подвергаются окислительному старению. Видимо, это связано с изменением их молекулярной структуры, приводящим к потере эластичности, снижению прочности, повышению жесткости и хрупкости [12].

Для изучения изменения физико-химической структуры были проведены ИК-спектроскопические исследования (рис. 5) исходного и экспонированного СВМПЭ. На ИК-спектрах зарегистрированы дуплеты (2915 см^{-1} и 2848 см^{-1}), отвечающие за симметричные и асимметричные валентные колебания С-Н, а также дуплет, отвечающий за деформационные колебания С-Н (1464 см^{-1}), и полосы кристалличности (719 см^{-1}).

Видно, что на поверхности образца, экспонированного на воздухе, появляются пики средней интенсивности в областях $\sim 1745\text{ см}^{-1}$, 1368 см^{-1} , 1234 см^{-1} , 1030 см^{-1} , 805 см^{-1} , что свидетельствует о поглощении поверхностью кислорода, приводящем к образованию карбонильных, карбоксильных и гидроксильных групп. Окисление

полимера приводит к изменению его физической структуры и к ухудшению механических свойств. Протекание окислительных процессов

Таблица 1
Физико-механические свойства СВМПЭ
и композита на его основе

Table 1
Physical and mechanical properties of UHMWPE
and a composite based on it

Время экспонирования Exposure time	Состав Material	$K_t \varepsilon_p$, %	$K_t \sigma_p$, %	$K_t E_m$, %
Исходные Initial	СВМПЭ UHMWPE	100	100	100
	ПКМ PCM	100	100	100
1 мес. 1 month	СВМПЭ UHMWPE	136	120	92
	ПКМ PCM	110	100	105
3 мес. 3 months	СВМПЭ UHMWPE	164	89	111
	ПКМ PCM	15	60	86
6 мес. 6 months	СВМПЭ UHMWPE	4	70	–
	ПКМ PCM	14	60	–
9 мес. 9 months	СВМПЭ UHMWPE	3	58	–
	ПКМ PCM	26	65	–
12 мес. 12 months	СВМПЭ UHMWPE	2	57	–
	ПКМ PCM	26	57	–

Примечание. $K_t \varepsilon_p$ – коэффициент сохранения относительного удлинения при разрыве; $K_t \sigma_p$ – коэффициент сохранения предела прочности при растяжении; $K_t E_m$ – коэффициент сохранения модуля упругости.

Note: $K_t \varepsilon_p$ – coefficient of conservation of elongation at break; $K_t \sigma_p$ – coefficient of preservation of the ultimate tensile strength; $K_t E_m$ – coefficient of conservation of the elastic modulus; UHMWPE – ultrahigh molecular weight polyethylene; PCM – polymer composite material.

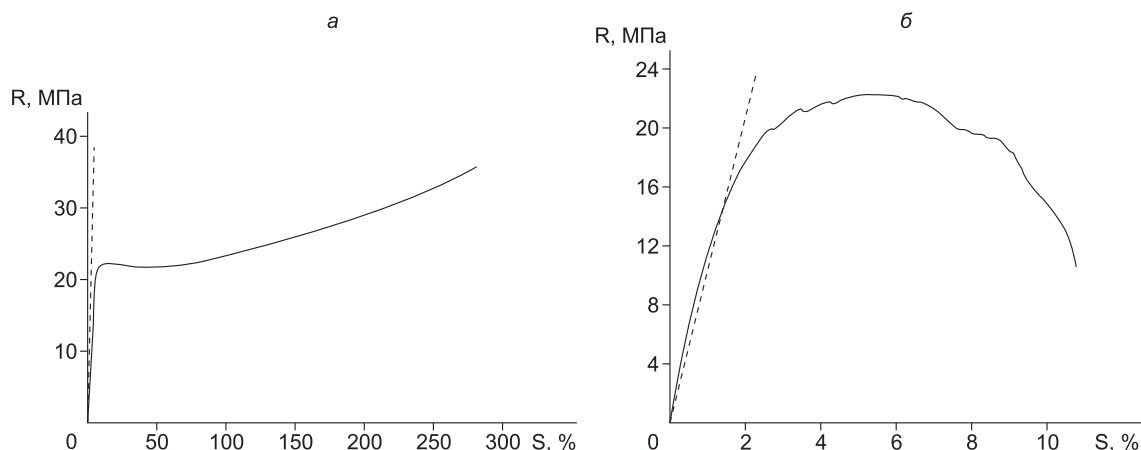


Рис. 4. Графики протоколов испытаний на растяжение СВМПЭ до (а) и после 6 месяцев (б) натурной экспозиции.

Fig. 4. Graphs of the dependence of the ultimate strength on the relative elongation of UHMWPE up to (a) and for 6 months (b) field exposure.

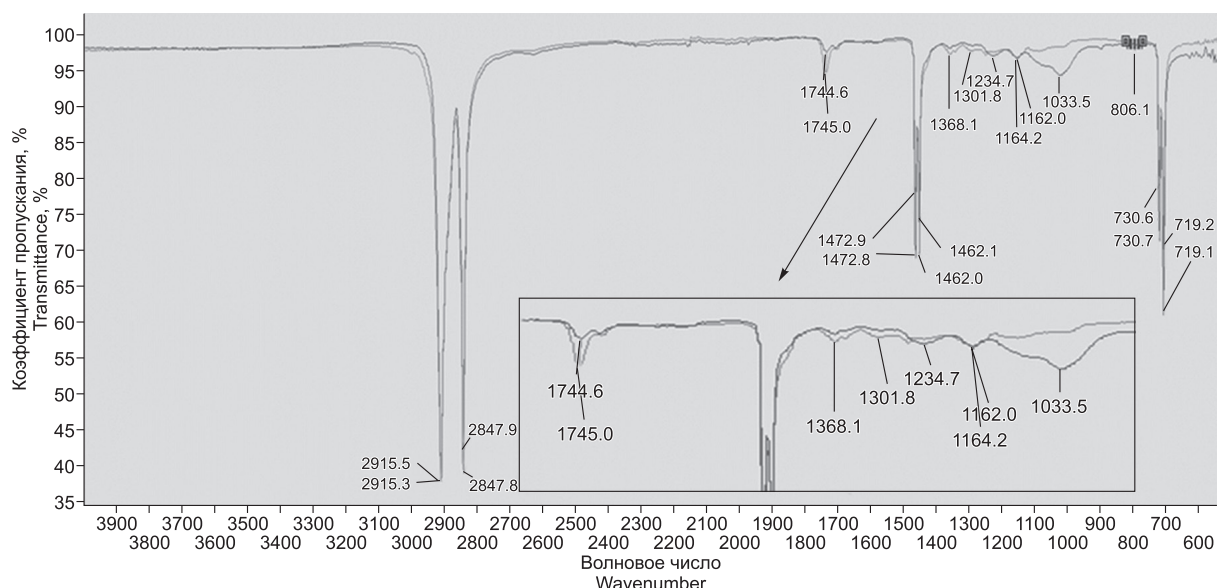


Рис. 5. ИК-спектры исходного СВМПЭ и СВМПЭ, экспонированного в течение 6 месяцев.

Fig. 5. IR spectra of the UHMWPE and UHMWPE exposed for 6 months.

в поверхностном слое СВМПЭ и его композитов обусловлено тем, что климат РС(Я) отличается не только низкими температурами и резкими суточными перепадами в осенний и весенний периоды, но также высокой интенсивностью солнечной радиации и повышенной концентрацией озона в атмосфере [13].

Установлено, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен и композит на его основе, модифицированный углеродными волокнами, к шестому месяцу экспонирования подвергаются старению. Процесс старения СВМПЭ и композитов с

УВ марки «Белум» сопровождается падением механических характеристик, охрупчиванием и протеканием процессов окислительной деструкции в поверхностном слое материала. Окислительная деструкция образцов подтверждена появлением на поверхности экспонированного образца пиков, свидетельствующих о поглощении поверхностью кислорода.

В связи с этим для предотвращения термоокислительной деструкции, вызываемой воздействием кислорода воздуха, использовали стабилизатор ди-[3-(3,5-ди-(1,1-диметилэтил)-4-ги-

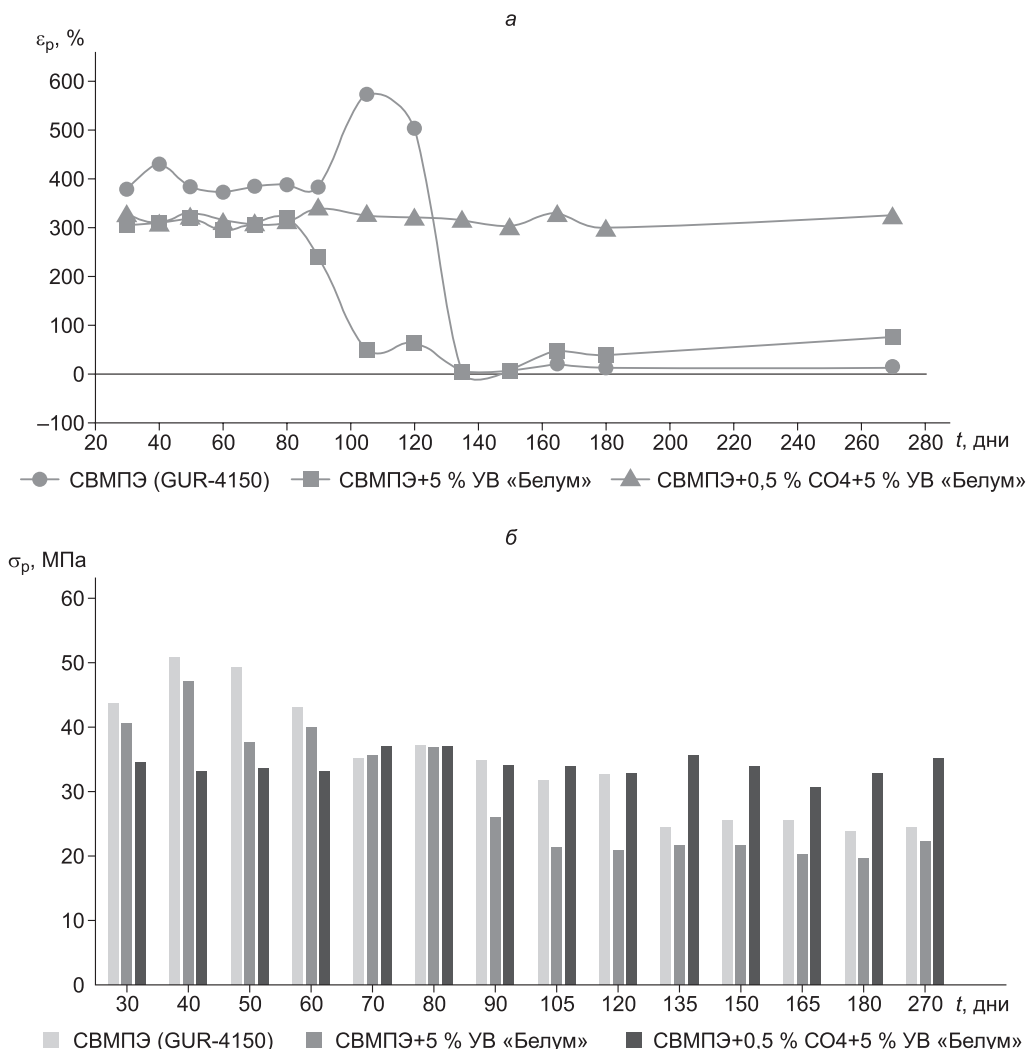


Рис. 6. Зависимость относительного удлинения (а) и предела прочности (б) СВМПЭ, СВМПЭ+5 мас.%УВ и СВМПЭ+0,5 мас.%СО-4+5 мас.%УВ от времени экспонирования.

Fig. 6. Dependence of relative elongation (а) and ultimate strength (б) UHMWPE, UHMWPE + 5 wt.% CF and UHMWPE + 0.5 wt.% CO-4 + 5 wt.% CF on exposure time.

дроксифенил)пропил]дисульфид марки СО-4 производства НИОХ СО РАН. В работах авторов показана перспективность его использования в ПЭ-композитах для повышения климатической стойкости [14]. Эти добавки необходимы, в первую очередь, для предотвращения или ингибирования развития деструктивно-окислительных процессов в полимерных материалах при эксплуатации на открытом воздухе в климатических условиях Якутии [15].

Результаты исследований физико-механических свойств СВМПЭ, композита на основе СВМПЭ и УВ, композита со стабилизатором, подвергнутых натурной экспозиции в климатических условиях г. Якутск, представлены на рис. 6.

Установлено (см. рис. 6, а), что эластичность СВМПЭ в течение 90 дней экспонирования держится на постоянном уровне, на 105-й день экспонирования наблюдается увеличение значения относительного удлинения на 33 %, после чего следует резкий спад эластичности, а ближе к пятому месяцу происходит хрупкое разрушение материала. Известно, что в результате старения полимерных материалов происходят конкурирующие процессы, такие как дополнительное структурирование материала и деструкция полимерных цепей [16]. Повышение относительного удлинения ПКМ под воздействием окружающего воздуха связано с процессами структурирования, а резкая потеря эластичности после 105 дней эк-

спонирования свидетельствует о преобладании окислительно-деструктивных процессов на поверхности образцов.

У ПКМ, модифицированного только углеродными волокнами, спад эластичности происходит уже после 80 дней экспонирования, что может свидетельствовать об интенсификации окислительно-деструктивных процессов за счет наличия легкоокисляемых функциональных групп на поверхности углеродных волокон, например, ОН-группы. Известно, что углеродные волокна марки «Белум» получены из гидратцеллюлозного сырья. Гидратцеллюлоза имеет такое же химическое строение, что и природная целлюлоза – $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$, но является ее структурной модификацией [17].

Также из рис. 6 видно, что ПКМ на основе СВМПЭ, содержащий 0,5 мас.% стабилизатора, сохраняет свои деформационно-прочностные свойства на уровне неэкспонированного образца в течение 270 дней. Коэффициент сохранения показателей относительного удлинения и предела прочности составляет 108 и 98 % соответственно.

Это связано с тем, что при экспонировании ПКМ на открытом воздухе возможны реакции окисления УВ с образованием пероксидных и гидропероксидных радикалов, которые в свою очередь реагируют со стабилизатором СО-4, при этом снижается концентрация этих радикалов вплоть до обрыва цепи радикальных реакций окисления полимерного материала. Образовавшийся новый фенольный радикал от стабилизатора является устойчивым за счет влияния объемных заместителей в орто-положении (см. рис. 1). Далее он может рекомбинироваться друг с другом или реагировать с радикалами окисления с образованием молекулярных продуктов (например, хинонов и исходных фенолов), приводящими к гибели фенокисного радикала – происходит ингибирование процесса окисления ПКМ.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что дополнительная модификация композита СВМПЭ-«Белум» стабилизатором марки СО-4 приводит к замедлению окислительно-деструктивных процессов композита на открытом воздухе, что положительно сказывается на сохранении физико-механических показателей при воздействии климатических факторов Якутии на уровне исходного композита.

Заключение

Установлено, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен и композит на его основе, модифици-

рованный углеродным волокном, с 4-го месяца натурной экспозиции в среде окружающего воздуха на климатическом полигоне, расположенном в г. Якутск, начинают подвергаться процессам старения. Процесс старения СВМПЭ и композитов с УВ марки «Белум» сопровождается падением механических характеристик, охрупчиванием и протеканием процессов окислительной деструкции в поверхностном слое материала. Окислительная деструкция образцов подтверждена ИК-исследованиями, наличием на поверхности экспонированных образцов пиков, свидетельствующих об образовании карбонильных, карбоксильных и гидроксильных групп.

Установлено, что модифицирование ПКМ термостабилизатором марки СО-4 позволяет сохранять деформационно-прочностные свойства материала на уровне неэкспонированного образца в течение 9 месяцев, что подтверждает высокую работоспособность изделий из разработанного материала в условиях резко-континентального климата Якутии.

Литература

1. Краснов А.П., Наумкин А.В., Юдин А.С. Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали // Трение и износ. 2013. № 2. С. 154–164.
2. Люшкин Б.А. и др. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 311 с.
3. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 180 с.
4. Селютин Е.Г., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н. и др. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. № 18. С. 375–388. DOI: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-11-12-48-50>.
5. Chukov D.I., Stepashkin A.A., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D. Surface modification of carbon fibers and its effect on the fiber-matrix interaction of UHMWPE based composites // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 586. P. 459–463. DOI: 10.1016/j.jallcom.2012.11.048.
6. Панин С.В., Панин В.Е., Овечкин Б.Б. и др. Влияние наноструктурных наполнителей на структуру и свойства газопламенных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Физическая мехомеханика. 2006. № 9. С. 141–144.
7. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимер-

ных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2(51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

8. Petukhova E.S., Fedorov A.L. Investigation of the climate resistance of stabilized polyethylene composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 20. P. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.118>.

9. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Development of polymer composite materials based on ultra-high-molecular weight polyethylene and carbon fillers // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 362–368. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.362>.

10. Заиков Г.Е. Деструкция и стабилизация полимеров. М.: Изд-во МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 1993. 248 с.

11. ГОСТ 9.708-83. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов. М.: ИПК «Издательство стандартов», 1984.

12. Черезова Е.Н., Мукменева Н.А., Архиреев В.П. Старение и стабилизация полимеров. Казань: Изд-во Казанского нац. исслед. технол. ун-та, 2012. 150 с.

13. Борисов А.И., Гнатюк Г.А. Природно-географические факторы формирования сети автомобильных дорог Республики Саха (Якутия) // *Московский экономический журнал*. 2018. № 5(3). С. 63–75. DOI: 10.24411/2413-046X-2018-15115.

14. Петухова Е.С., Федоров А.Л. Климатические испытания полиэтиленовых композиционных материалов, содержащих различные стабилизирующие добавки // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019. № 4(24). С. 169–178. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-4-16.

15. Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты. СПб.: СПбГТУРП, 2015. 31 с.

16. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 446 с.

17. Васильев В.В., Гарцева Л.А., Циркина О.Г. Химическая технология текстильных материалов. Иваново: ИГТА, 2005. 124 с.

Поступила в редакцию 26.04.2021

Принята к публикации 11.09.2021

Об авторах

КОЛЕСОВА Елена Семеновна, аспирант, инженер, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-7537-5507>, e-mail: lenok27294@mail.ru;

ГОГОЛЕВА Ольга Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru;

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, e-mail: ppavlina@yandex.ru.

Информация для цитирования

Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. Разработка полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021, Т. 26, № 4. С. 122–131. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131

Development of polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate

E.S. Kolesova*, O.V. Gogoleva, P.N. Petrova

Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia

**lenok27294@mail.ru*

Abstract. *Currently, when developing new functional polymeric materials, especially for arctic purposes, it is not sufficient to provide an increase in strength, elasticity, wear resistance of these materials, but*

it is necessary to create polymeric materials taking into account operation requirements. One of the important requirements is the stability of properties during operation under climatic factors. This paper presents the results of comparative studies of the physical and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene and modified polymer composite materials (PCM) before and after exposition on the climatic field testing ground in Yakutsk. Studies of changes in the physical and mechanical parameters of the exposed samples were carried out after 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24 months. Studies of changes in samples structure by IR spectroscopy were also carried out. It has been established that under the conditions of sharply continental climate of Yakutia, ultra-high molecular weight polyethylene and a composite containing 5 wt.% of Belum carbon fibers (CF) are subject to aging by the fourth month of exposure. In this regard, ultra-high molecular weight polyethylene was modified not only with carbon fibers, but also with a stabilizer of the CO-4 brand produced by the NIOCH SB RAS. This stabilizer prevents the propagation of destructive-oxidative processes in the composite material. It is found that PCM based on UHMWPE, containing 0.5 wt.% of a stabilizer, retains its deformation and strength properties at the level of an unexposed sample for 270 days. Thus, on the basis of the studies carried out, it has been established that additional modification of the UHMWPE-CF composite with a stabilizer of the CO-4 grade leads to a slowdown in the oxidative-destructive processes in the composite during exposure. Due to this, physical and mechanical indicators under the influence of unfavorable climatic factors remain unchanged for a long time. This fact allows us to predict high performance of developed materials under the conditions of sharply continental climate of Yakutia.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, carbon fibers, polymer composite material, climatic tests, physical and mechanical properties, thermal stabilizer, climatic exposure, the Arctic.

Acknowledgements. The research was carried out according to the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (No. AAAA-A21-121011590012-9).

References

1. Krasnov A.P., Naumkin A.V., Yudin A.S. Priroda pervichnykh aktov frikcionnogo vzaimodejstviya SVMPE s poverhnost'yu stali // *Trenie i iznos*. 2013. No. 2. P. 154–164.
2. Lyukshin B.A. et al. Dispersno-napolnennyye polimernyye kompozity tekhnicheskogo i medicinskogo naznacheniya. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2017. 311 p.
3. Galygin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. Sovremennyye tekhnologii polucheniya i pere-rabotki polimernyyh i kompozicionnykh materialov: uchebnoe posobie. Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. 180 p.
4. Selyutin E.G., Gavrilov Yu.Yu., Voskresenskaya E.N. et al. Kompozicionnyye materialy na osnove sverhvyso-komolekulyarnogo polietilena: svoystva, perspektivy is-pol'zovaniya // *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*. 2010. No. 18. P. 375–388. DOI: <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-11-12-48-50>.
5. Chukov D.I., Stepashkin A.A., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D. Surface modification of carbon fibers and its effect on the fiber-matrix interaction of UHMWPE based composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 586. P. 459–463. DOI: [10.1016/j.jallcom.2012.11.048](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.11.048).
6. Panin S.V., Panin V.E., Ovechkin B.B. et al. Vliyaniye nanostrukturnyyh napolnitelej na strukturu i svoystva gazoplamennykh pokrytij na osnove sverhvyso-komolekulyarnogo polietilena // *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2006. No. 9. P. 141–144.
7. Kablov E.N., Starcev V.O. Sistemnyj analiz vliyaniya klimata na mekhanicheskie svoystva polimernyyh kompozicionnykh materialov po dannym otechestvennykh i zarubezhnykh istochnikov (obzor) // *Aviacionnyye materialy i tekhnologii*. 2018. No. 2(51). P. 47–58. DOI: [10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58).
8. Petukhova E.S., Fedorov A.L. Investigation of the climate resistance of stabilized polyethylene composite materials // *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 20. P. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.12.118>.
9. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Development of polymer composite materials based on ultra-high-molecular weight polyethylene and carbon fillers // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 362–368. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.362>.
10. Zaikov G.E. Destrukciya i stabilizaciya polimerov. M.: Izd-vo MITHT im. M.V. Lomonosova, 1993. 248 p.
11. GOST 9.708-83. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya (ESZKS). Plastmassy. Metody ispytaniy na starenie pri vozdejstvii estestvennykh i iskusstvennykh klimaticheskikh faktorov. M.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 1984.
12. Cherezova E.N., Mukmeneva N.A., Arhireev V.P. Starenie i stabilizaciya polimerov. Kazan': Izd-vo Kazanskogo nac. issled. tekhnol. un-ta, 2012. 150 p.
13. Borisov A.I., Gnatyuk G.A. Prirodno-geograficheskie faktory formirovaniya seti avtomobil'nykh dorog Respubliki Saha (Yakutiya) // *Moskovskij ekonomicheskij zhurnal*. 2018. No. 5(3). P. 63–75. DOI: [10.24411/2413-046X-2018-15115](https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-15115).
14. Petuhova E.S., Fedorov A.L. Klimaticheskie ispytaniya polietilenovykh kompozicionnykh materialov, sodержashchih razlichnye stabiliziruyushchie dobavki // *Pri-*

rodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2019. No. 4(24). P. 169–178. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-4-16.

15. Smirnova A.I., Osovskaya I.I. Funkcional'nye materialy v proizvodstve plastmass: Antioksidanty. SPb.: SPbGTURP, 2015. 31 p.

16. Grassi N., Skott Dzh. Destrukciya i stabilizaciya polimerov: Per. s angl. M.: Mir, 1988. 446 p.

17. Vasil'ev V.V., Garceva L.A., Cirkina O.G. Himicheskaya tekhnologiya tekstil'nyh materialov. Ivanovo: IGTA, 2005. 124 p.

About the authors

KOLESOVA, Elena Semenovna, postgraduate student, engineer, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk 677007, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-7537-5507>, e-mail: lenok27294@mail.ru;

GOGOLEVA, Olga Vladimirovna, Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk 677007, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru;

PETROVA, Pavlina Nikolaevna, Cand. Sci. (Engineering), associate professor, leading researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk 677007, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, e-mail: ppavlina@yandex.ru.

Citation

Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N. Development of polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 4. P. 122–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>

Игорю Иннокентьевичу Колодезникову 80 лет



27 октября 2021 года исполнилось 80 лет Игорю Иннокентьевичу Колодезникову, доктору геолого-минералогических наук, профессору, известному ученому-геологу, внесшему значительный вклад в развитие науки и подготовку высококвалифицированных кадров для геологической отрасли Республики Саха (Якутия).

И.И. Колодезников родился в г. Якутске в 1941 г. в семье врачей. После окончания инженерно-технического факультета Якутского государственного университета (ныне Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова) по специальности «Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых» работал в экспедициях Якутского территориального геологического управления, в Институте геологии ЯФ СО АН СССР. Много лет И.И. Колодезников отдал работе в Якутском государственном университете, пройдя путь от ассистента до профессора, более 10 лет возглавлял геологоразведочный факультет.

И.И. Колодезников – специалист в области магматической геологии, внесший значительный вклад в изучение палеозойского вулканизма и рифтогенеза Северо-Востока России. Более 30 лет он проводил полевые геологические исследования практически во всех районах Северо-Востока Якутии: в Южном Верхоянье, в устьевой части р. Лена, в Колымском регионе. В 1973 г. он защитил кандидатскую диссертацию по теме «Поздне-мезозойские магматические формации центральной части хребта Сунтар-Хаята (Якутия)» в Томском госуниверситете, в 1992 г. – докторскую диссертацию «Среднепалеозойский магматизм и рифтогенез востока Сибирской платформы и Верхояно-Колымской складчатой системы» в Институте земной коры СО РАН (г. Иркутск).

Научные результаты, полученные И.И. Колодезниковым, использованы при составлении «Атласа тектонических карт Сибири», карт магматических ассоциаций Восточной Сибири и корреляционных схем магматических образований Северо-Востока Азии. Он автор свыше 130 научных трудов, 11 монографий.

И.И. Колодезников в 1993 г. был избран в действительные члены Академии наук Республики Саха (Якутия). В период 2008–2019 гг. на посту президента АН РС (Я) проводил эффективную научно-организационную политику по комплексному научному сопровождению социально-экономического, духовного и культурного развития республики, укреплению интеграционных связей с российским академическим сообществом, в том числе с академиями наук субъектов Российской Федерации. И.И. Колодезников как главный редактор журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики» (2008–2019) видел главными задачами журнала своевременную публикацию результатов изучения арктических регионов, научному обоснованию их освоения, содействие развитию творческих связей ученых разных регионов.

Помимо научно-образовательной деятельности И.И. Колодезников ведет большую общественную работу, являясь членом Совета по науке при Главе РС (Я), регионального совета Русского географического общества, ряда комитетов и комиссий.

За вклад в формирование региональной политики в области науки и высшего профессионального образования И.И. Колодезников удостоен почетного звания “Заслуженный геолог Республики Саха (Якутия)”, награжден ведомственным знаком “Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации”, ему объявлена Благодарность Президента Российской Федерации и присвоено высокое звание Почетный гражданин Республики Саха (Якутия)!

От имени членов Академии наук РС (Я), редакционной коллегии журнала поздравляем Игоря Иннокентьевича с юбилеем и желаем здоровья, долгих лет плодотворной жизни!

*С искренним уважением и благодарностью
за годы совместной работы*

*В.Ю. Фридовский,
директор ИГАБМ СО РАН, профессор*

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *Н.В. Счастнева*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 30.12.2021. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 15,4. Тираж 100 экз. Заказ № 90. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, <http://nras.asrsya.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес издательства:

Издательство СО РАН
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
E-mail: psb@sibran.ru
тел. (383) 330-80-50
Отпечатано в Издательстве СО РАН
Интернет-магазин Издательства СО РАН
<http://www.sibran.ru>

