

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2024, Том 29, № 1

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

Учредители

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

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

Главный редактор

Л.Н. Владимиров

Член-корреспондент РАН

Заместители главного редактора:

В. Ю. Фридовский, член-корр. РАН

Н.С. Данилова, д-р биол. наук

Ответственный секретарь

З.А. Корнилова

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, Россия
nras2018@mail.ru

<https://resar.elpub.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

Входит в Перечень ВАК Минобрнауки РФ (22.12.2020)
Включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI)

© Академия наук РС(Я), 2024
© ФИЦ «Якутский научный центр», 2024
© Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова, 2024
© Министерство образования и науки РС(Я), 2024

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 “Nauka i Obrazovanie”)

Scientific journal

2024, Vol. 29, No. 1

Founded in 1996
4 issues per year

Founders

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

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

Editor-in-Chief

L.N. Vladimirov

Corresponding Member, RAS

Deputy Editors-in-Chief:

V.Yu. Fridovsky

Corresponding Member, RAS

N.S. Danilova

Dr. Sci. (Biol.)

Executive Editor

Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:

33 Lenina pr., Yakutsk, 677007 Russia
nras2018@mail.ru

<https://resar.elpub.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)

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), 2024
© Federal Research Centre “The Yakut
Scientific Centre of SB RAS”, 2024
© M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 2024
© Ministry of Education and Science of RS (Ya), 2024

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:Науки о Земле

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

Биологические науки

Арчибалд Дж., д-р, Межд. фонд охраны журавлей, Барабу, США
Будажпав Л.-З.В., чл.-корр. РАН, АН РС(Я), Якутск, Россия
Данилова Н.С., д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Исаев А.П., д.б.н., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Кершенгольц Б.М., д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия
Хияма Т., д-р, проф., Ун-т г. Нагоя, Нагоя, Япония
Убугунов Л.Л., д.б.н., ИОЭБ СО РАН, Улан-Удэ, Россия
Хатано Р., д-р, проф., Ун-т Хоккайдо, Саппоро, Япония
Шадрина Е.Г., д.б.н., проф., ИБПК СО РАН, Якутск, Россия

Материаловедение и химические технологии

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

Editorial Council:

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

Editorial Board:Earth Sciences

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

Biological Sciences

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

Materials Science and Chemical Technologies

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

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Геология и полезные ископаемые

Суставов О.А. Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем.....	7
Поспеева Е.В., Толстов А.В. Новые перспективы Алаakit-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма	20
Гриненко В.С., Ощепкова М.Г., Дзюба О.С., Шурыгин Б.Н. Возраст кимберлитовой трубки Обнаженная (северо-восток Сибирской платформы).....	38
Кутыгин Р.В., Килясов А.Н. Моделирование онтогенетических изменений поперечного сечения раковин древнейших (позднепермских) представителей рода <i>Otoceras</i> (Ammonoidea).....	48

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Васильев М.С., Петрова А.Н. Температурный режим холодного периода в Арктической зоне Якутии за 1960–2022 гг	60
Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М., Чуркин С.В. Воздействие циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей песка с высокодисперсной глиной.....	69
Гагарин Л.А., Башиев Н.Е., Мельников А.Е., Николаева Е.С. Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения	80

Биологические науки

Экология

Амирханов А.М., Жуков М.А., Охлопков И.М., Поспелов И.Н., Романенков Р.Л., Устинова Т.В. Совершенствование текущей конфигурации Арктической зоны Российской Федерации с учетом международного экологического сотрудничества в рамках Арктического Совета.....	96
Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф., Морозова К.В., Ермолаева О.В. Адаптация кустарничков к условиям арктических тундр Западного Шпицбергена	108
Пак И.В., Семенова М.В., Рябикова В.Л., Сагалакова В.В. Влияние выбросов Саяногорского алюминиевого комбината на изменчивость морфологических признаков и фитопатологическое состояние сосны обыкновенной (<i>Pinus sylvestris</i> L., 1753).....	121

Биологические ресурсы

Кириллин Е.В., Мамаев Н.В., Степанова В.В. Современное состояние лено-оленинской популяции дикого северного оленя (<i>Rangifer tarandus</i> L., 1758, Cervidae, Artiodactyla)	129
Колесов С.Д., Боескоров Г.Г., Климовский А.И. Морфологическое своеобразие ископаемого бизона (<i>Bison priscus</i>) Якутии	143

Материаловедение и химические технологии

<i>Винокуров П.В., Попов В.И., Николаев Д.В., Смагулова С.А.</i> Графеновые пленки, выращенные методом химического осаждения из газовой фазы, и их приложения	152
<i>Петрова П.Н., Маркова М.А., Федоров А.Л.</i> Исследование влияния технологий получения на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ	162

Память

Слово о Никите Гавриловиче Соломонове	172
Вклад Геннадия Николаевича Гамянина в изучение процессов рудообразования	174

CONTENTS

Earth sciences

Geology and mineral resources

<i>Sustavov O. A.</i> Metamorphism (greenschist facia down) of terrigenous rocks in the northern part of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia: mineral ratios with cleavage	7
<i>Pospeeva E. V., Tolstov A. V.</i> Prospects of the southwestern part of the Alakit-Markha kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism: magnetotelluric studies	20
<i>Grinenko V. S., Oshchepkova M. G., Dzyuba O. S., Shurygin B. N.</i> Age of the Obnazhennaya kimberlite pipe (northeastern Siberian platform).....	38
<i>Kutygin R. V., Kilyasov A. N.</i> Modeling of ontogenetic changes in the shell cross section of the most ancient (Late Permian) representatives of <i>Otoceras</i> (Ammonoidea).....	48

Engineering geology, permafrost and soil science

<i>Vasiliev M. S., Petrova A. N.</i> Temperature regime of the cold period in the Arctic zone of Yakutia for 1960–2022.....	60
<i>Nevzorov A. L., Saenko Y. V., Shiranov A. M., Churkin S. V.</i> Effect of freeze–thaw cycles on water permeability of sand mixtures with nanoclay	69
<i>Gagarin L. A., Baishev N. E., Melnikov A. E., Nikolaeva E. S.</i> Synthetic aperture radar Sentinel-1 for in icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment	80

Biological sciences

Ecology

<i>Amirchanov A. M., Zhukov M. A., Okhlopkov I. M., Pospelov I. N., Romanenkov R. L., Ustinova T. V.</i> Improving the current configuration of the Russian Federation Arctic Zone, with account to international environmental cooperation within the framework of the Arctic Council	96
<i>Shmakova N. Yu., Markovskaya E. F., Morozova K. V., Ermolaeva O. V.</i> Adaptation of dwarf shrubs to Arctic tundra conditions in West Svalbard	108
<i>Pak I. V., Semenova M. V., Ryabikova V. L., Sagalakova V. V.</i> Influence of Sayanogorsk Aluminum Plant emissions on morphological characteristics and phytopathology of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L., 1753)	121

Biological resources

<i>Kirillin E. V., Mamaev N. V., Stepanova V. V.</i> The current status of the Lena-Olenek population of wild reindeer (<i>Rangifer tarandus</i> L., 1758, Cervidae, Artiodactyla)	129
<i>Kolesov S. D., Boeskorov G. G., Klimovsky A. I.</i> Morphological peculiarity of the fossil bison (<i>Bison priscus</i>) from Yakutia	143

Materials science and chemical technologies

<i>Vinokurov P. V., Popov V. I., Nikolaev D. V., Smagulova S. A.</i> Graphene films grown by chemical vapor deposition and their applications.....	152
--	-----

<i>Petrova P.N., Markova M.A., Fedorov A.L.</i> Effect of production technologies on the properties and structure of PTFE-based composites	162
--	-----

Memory

About Nikita Gavrilovich Solomonov	172
Contribution of Gennadiy N. Gamyagin for the study of ore formation processes	174

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 552.163:551.25

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

Оригинальная статья

Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем

О. А. Суставов✉

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

✉ olsustavov@mail.ru

Аннотация

В крупном Куларском золотоносном районе (из россыпей извлечено 170 т золота) имеются относительно слабо изученные коренные золоторудные месторождения, освоение которых требует проведения детальных геологических работ, включающих в себя исследование процессов метаморфизма горных пород. То же относится и к обсуждению перспектив освоения редкоземельной минерализации в россыпях района – образование присутствующего в россыпях монацита («куларита») во многих случаях связывается с региональным метаморфизмом терригенных пород. Куларский золотоносный район располагается в пределах находящейся на северо-западном фланге Кулар-Нерского складчатого пояса Верхояно-Колымской орогенной области крупной Улахан-Сисской антиклинали, сложенной пермскими углеродисто-терригенными породами. На основании минералогического картирования района обосновывается приуроченность к данной антиклинали субмеридионально вытянутой зоны метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации до биотитовой субфации зеленосланцевой фации в отдельных частях свода антиклинали. С использованием результатов микрозондовых анализов минералов и 520 шлифов пород описан вещественный состав распространенных в северной части Куларского района углеродисто-терригенных пород, степень постдиagenетических преобразований которых изменяется от метагенеза в породах триаса до мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации метаморфизма в пермских породах крупной Улахан-Сисской антиклинали. По мере перехода от метагенеза к мусковит-хлоритовой и биотитовой субфациям метаморфизма возрастает степень перекристаллизации пород, увеличиваются размеры зерен перекристаллизации обломочного кварца и ширина новообразованных чешуек мусковита, в породах появляются монацит, ильменит, биотит. Указанные изменения происходят до завершения формирования в породах сланцевого кливажа S_1 . После формирования последнего, преимущественно до появления более позднего кливажа плейчатости S_2 , в породах происходит кристаллизация образующегося в процессе метаморфизма пирита. Биотит и магнезиосидерит возникают при образовании кливажа плейчатости S_2 . Появление биотита при формировании кливажа S_1 и S_2 может соответствовать имеющимся представлениям о двухэтапности метаморфизма пород района. Приводимые сведения требуют пополнения на основании дальнейшего разностороннего изучения метаморфизма района.

Ключевые слова: зеленосланцевая фация, мусковит-хлоритовая субфация, биотитовая субфация, перекристаллизация кварца, сланцевый кливаж, кливаж плейчатости

Финансирование. Исследования выполнялись за счет хозяйдоговора № 57-212-79 Уральского горного института с Янской геологоразведочной экспедицией Производственного ордена Ленина Геологического объединения «Якутскгеология».

Для цитирования: Суставов О.А. Метаморфизм (низы зеленосланцевой фации) терригенных пород северной части Куларского золотоносного района, Якутия: соотношения минералов с кливажем. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):7–19. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

Metamorphism (greenschist facia down) of terrigenous rocks in the northern part of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia: mineral ratios with cleavage

Oleg A. Sustavov✉

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation
✉olsustavov@mail.ru

Abstract

In the Kularsky gold-bearing area, where 170 tons of gold were extracted from placers, primary gold deposits have not been well studied; therefore, their development requires detailed geological analysis including the study of rock metamorphism. A large Ulakhan-Sis anticline composed of Permian carbonaceous-terrigenous rocks is found on the northwestern flank of the Kular-Nersky folded belt of the Verkhoyano-Kolyma orogenic region. In this article we describe the material composition of carbonaceous-terrigenous rocks prevalent in the northern part of the Kularsky district. The degree of their postdiagenetic transformations varies from metagenesis in Triassic rocks to muscovite-chlorite and biotite subfacies of the greenschist facia of metamorphism in Permian rocks of the Ulakhan-Sis anticline. As the transition from metagenesis to muscovite-chlorite and biotite subfacies of metamorphism the degree of recrystallization of rocks, the grain sizes of the recrystallization of clastic quartz and the width of newly formed muscovite flakes are increasing, monazite, ilmenite, biotite flakes appear in rocks. These changes occur before the completion of formation in the rocks of the S_1 slate cleavage. After the formation of the latter, mainly before the appearance of a later crenulation cleavage S_2 , crystallization of pyrite occurs in the rocks. Porphyroblasts of biotite and magnesiosiderite appear during the formation of a crenulation cleavage S_2 . The appearance of biotite during the formation of the S_1 and S_2 cleavages may correspond to the theories about the two-stage metamorphism of the rocks of the area. Thus, further metamorphism studies in this region are required.

Keywords: metagenesis, greenschist facia, muscovite-chlorite subfacia, biotite subfacia, quartz recrystallization, slate cleavage, crenulation cleavage

Funding. This study was conducted in accordance with the agreement (No. 57-212-79) of the Ural State Mining University and the Yansk geological-prospecting expedition of Production Geological Association “Yakutskgeologiya”.

For citation: Sustavov O. A. Metamorphism (greenschist facia down) of terrigenous rocks in the northern part of the Kularsky gold-bearing district, Yakutia: mineral ratios with cleavage. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):7–19. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-7-19>

Введение

Данный район находится на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области (рис. 1, а), который сложен глубоководными углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы смяты в складки в поздней юре–раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колымо-Омолонского супертеррейна [4].

Среди структур северо-восточного простирания здесь устанавливается несколько крупных кулисообразно расположенных складок, в том числе Улахан-Сисская антиклиналь длиной более 100 км и шириной до 20 км. Крылья антиклинали образованы породами туогучанской (ТГ) свиты пермского возраста, а сводовая часть антиклинали – породами тарбаганнахской (ТБ) свиты пермского возраста. С запада и востока антиклиналь окружена породами нижнего и среднего триаса (рис. 1, б), отделенными от пермских отложений надвигами и взбросами.

Улахан-Сисская антиклиналь ориентирована в северо-северо-восточном направлении (10–15°) и постепенно погружается на юго-юго-запад под углом 5–8°. Углы падения слоев в своде антиклинали (ТБ свита) не превышают 3–7°, на крыльях (ТГ свита) – 20–25°. По [4], это лежащая изоклиналиная складка, повторно изогнутая в пологую асимметричную антиклиналь. В ее своде предполагается нескрытый крупный гранитоидный интрузив, кровля которого, по геофизическим данным, располагается на глубине 1–2 км от современной поверхности.

В настоящей статье рассматривается северная часть Улахан-Сисской антиклинали (северная часть Улахан-Сисского золоторудного района, по [2]) между ручьем Тарбаганнах на юге и горой Мунулу на севере (см. рис. 1, б). Описывается вещественный состав распространенных в данном районе углеродисто-терригенных пород, степень постдиagenетических преобразований которых изменяется от метабазита до мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой

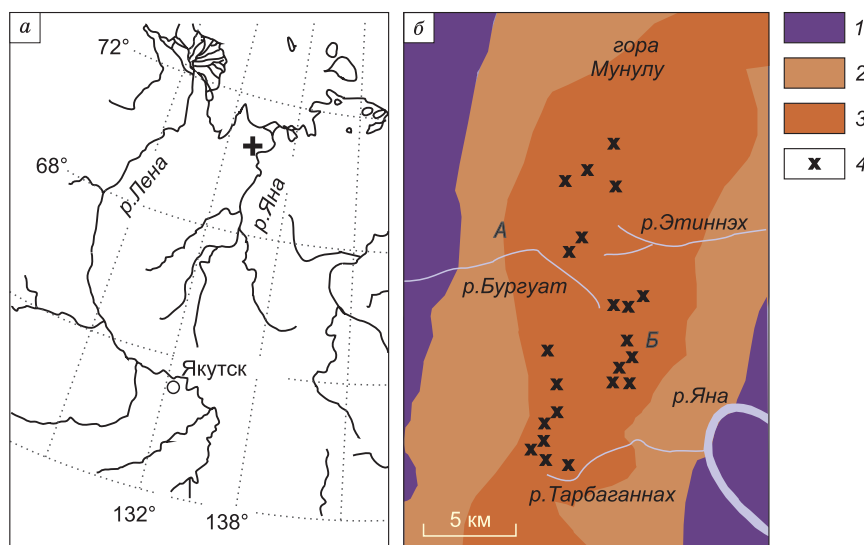


Рис. 1. Географическое положение Куларского золотоносного района (+) (а) и схема его геологического строения (б) (по материалам ПГО «Якутскгеология»).

1 – триас, 2, 3 – верхняя пермь: 2 – туогучанская свита, 3 – тарбаганнахская свита; 4 – точки обнаружения в породах биотита. А – Эмисское золоторудное поле, Б – золоторудное месторождение Кыллах

Fig. 1. Geographical location of the Kularsky gold-bearing area (+) (а) and the scheme of its geological structure (б) (based on the materials of the PGA “Yakutskgeologiya”).

1 – Triassic, 2, 3 – Upper Permian: 2 – Tuoguchan formation, 3 – Tarbagannakh formation; 4 – points of detection of biotite in rocks. A is the Emis gold field, B is the Kyllakh gold deposit

фации метаморфизма. Рассмотрены присутствующие в метаморфизованных породах перекристаллизованный кварц, мусковит, ильменит, монацит, биотит, пирит и магнезиосидерит. Обсуждены вопросы соотношений между образованием данных минералов и формированием в породах кливажа S_1 и S_2 .

Материалы и методы

Работа основана на ранее не опубликованных результатах полевых наблюдений и последующего изучения образцов, отобранных при минералогическом картировании северной части Куларского района [5]. Образцы пород отбирались при искаживании обнаженных участков местности по широтным профилям, располагающимся через 50 м друг от друга. Производился также отбор образцов пород из керна скважин Куларской поисково-разведочной партии.

Из отобранных образцов было изготовлено 520 шлифов пород. Шлифы ориентировались преимущественно перпендикулярно кливажу пород, а в случае наличия в породе линейности – перпендикулярно последней. В отдельных случаях из одного образца изготавливались шлифы по трем взаимно-перпендикулярным направлениям.

При изучении шлифов под микроскопом наряду со стандартным петрографическим описанием минерального состава и структуры пород производились систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах – такие наблюдения могут быть использованы для получения информации о последовательности деформаций в том или другом районе и о связи этой последовательности с метаморфическими событиями [6, 7]. Детально характеризовался кливаж – его разновидности, форма и густота кливажных зон, соотношения между кливажем и породообразующими минералами. Систематически производилось определение степени перекристаллизации обломочного кварца, размеров зерен перекристаллизации кварца и чешуек новообразованного мусковита. Исследовалась реликтовая текстура в кристаллах пирита и магнезиосидерита и ее соотношения с текстурой вмещающих пород. Уделялось внимание изучению форм нахождения метаморфического биотита и распределению биотита на изученной площади. В качестве справочных пособий при описании в шлифах метаморфических минералов и их соотношений с кливажем использовались работы [6–8].

Травление срезов кристаллов пирита концентрированной HNO_3 проведено А.Ф. Бушмакиным

(Уральский государственный горный университет), определение химического состава монацита и магнезиосидерита производилось на рентгеноспектральном микроанализаторе Cameca SX 100 в Институте геологии и геохимии УрО РАН Е.С. Шагаловым [9].

Результаты

Изученный участок Улахан-Сисской антиклинали сложен пермскими углеродистыми сланцами (преимущественно аргиллитами и алевролитами), среди которых залегают отдельные пласты песчаников. Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, мусковита, углеродистого вещества и хлорита (последний особенно характерен для ТГ свиты). Углеродистое вещество в сланцах ТГ свиты представлено тонкодисперсным неполноупорядоченным графитом с межплоскостным расстоянием (002), равным 3,40–3,43 Å [10]. Песчаники преимущественно мелко- и тонкозернистые (размер обломков преимущественно 0,2–0,05 мм) граувакковые. Обломки сложены кварцем и плагиоклазом (альбит или альбитолигоклаз), калиевый полевой шпат отсутствует (наблюдения в шлифах, окрашивание 57 штупфов кобальтнитритом), в матрике содержатся мусковит, хлорит, карбонат и углеродистое вещество.

В породах наблюдается кливаж S_1 [11]. В углеродистых сланцах это «сланцевый» кливаж (slaty cleavage [5]), обусловленный наличием тонких

углеродистых кливажных зон (УКЗ), субпараллельных чешуек хлорита, мусковита и вытянутых в том же направлении уплощенных мелких обломков кварца [8]. Кливаж песчаников «межзерновой» [8] (penetrative domainal cleavage [6]) – УКЗ располагаются между обломочными зернами. В песчаниках ТБ свиты кливаж S_1 развит значительно сильнее, чем в песчаниках ТГ свиты [11].

Кроме того, в Улахан-Сисской антиклинали локально развит пересекающий S_1 кливаж плейчатости S_2 (crenulation cleavage [6, 7]), УКЗ которого отвечают сжатым крыльям микроскладок плейчатости, в которые сминается кливаж S_1 [11].

Ниже характеризуются присутствующие в метаморфизованных пермских углеродистых породах Улахан-Сисской антиклинали кварц, мусковит, ильменит, монацит, биотит, пирит и магнезиосидерит.

Кварц. В песчаниках Улахан-Сисской антиклинали часто наблюдается перекристаллизация (recrystallization [6]) обломочного кварца с возникновением в обломках кварца (преимущественно по их краям) мелких новообразованных кварцевых зерен (рис. 2, а). Иногда перекристаллизация может нацело захватывать обломочные зерна кварца (рис. 2, б). Средний размер зерен перекристаллизации кварца в песчаниках ТГ свиты 0,02–0,03 мм (9), а в песчаниках ТБ

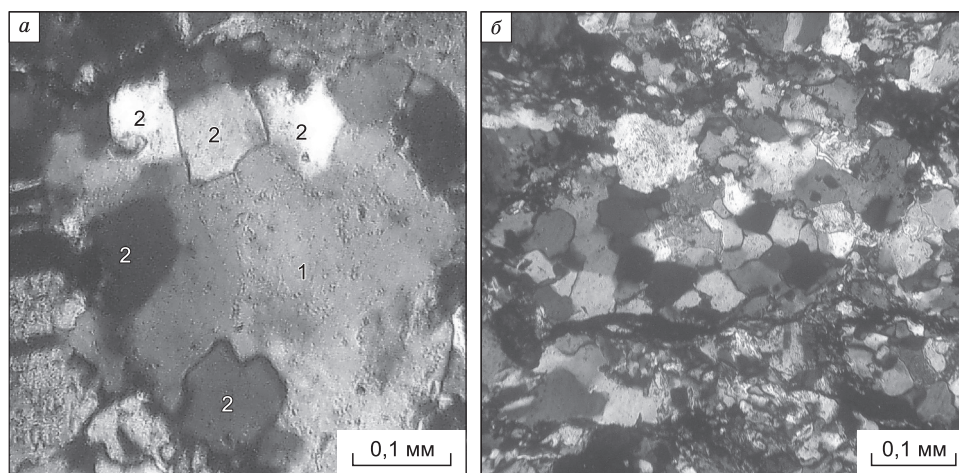


Рис. 2. Перекристаллизация кварца в песчанике тарбаганнахской свиты (верховья ручья Кыллах): а – зерна перекристаллизации (2) по краям обломка кварца (1), б – полная перекристаллизация обломков кварца и матрикса (горизонтальные черные полосы – углеродистые кливажные зоны S_1)

Fig. 2. Recrystallization of quartz in the sandstone of the Tarbagannakh formation (upper Kyllakh stream): а – recrystallization grains at the edges of the quartz fragment, б – complete recrystallization of quartz and matrix fragments (horizontal black bands – carbonaceous S_1 cleavage zones)

свиты – 0,03–0,10 мм (12) (в скобках – число измерений).

При перекристаллизации обломочного кварца матрикс и обломки пород в песчаниках нередко приобретают мелкозернистую гранобластовую или лепидогранобластовую структуру. Данные структуры наблюдаются и в углеродистых сланцах. Особенно такие структуры характерны для ильменитсодержащих углеродисто-кварцевых и мусковит-углеродисто-кварцевых сланцев (в [11] – рис. 5, а); эти сланцы могут быть метаморфизованными глинисто-углеродисто-кремнистыми породами.

Мусковит при метаморфических изменениях песчаных пород образует ориентированные преимущественно субпараллельно кливажу S_1 новообразованные чешуйки в матриксе и в обломках пород в песчаниках. Средняя толщина чешуек мусковита в песчаниках ТГ свиты – 0,005 мм (5), а в песчаниках ТБ свиты – 0,010 мм (21) (в скобках – число замеров).

Углеродистым сланцам ТБ свиты нередко свойственны более высокие содержания мусковита, чем углеродистым сланцам ТГ свиты (мусковит нередко развивается, замещая хлорит).

Ильменит образует приуроченные к некоторым углеродистым сланцам ТБ свиты пластинчатые кристаллы размерами до 1 мм, ориентированные преимущественно вдоль направления кливажа S_1 или под небольшим углом к нему (в [11] – рис. 5, в), реже поперек S_1 , огибаясь углеродистыми кливажными зонами S_1 (рис. 3, а).

Возле кристаллов ильменита часто наблюдаются кварцевые тени деформации, вытянутые,

иногда очень сильно, вдоль направления S_1 . Структура кварца в тенях деформации возле кристаллов ильменита, как и в окружающей матрице углеродистых сланцев, близка к гранобластовой. При наложении на S_1 кливажа плейчато-сти S_2 кварцевые тени деформации возле кристаллов ильменита изгибаются у границ с УКЗ S_2 и срезаются этими зонами (в [11] – рис. 5, в).

Монацит наблюдался нами в углеродистых сланцах ТГ и ТБ свит в виде изометричных выделений размерами в сотые доли миллиметра, которые огибаются кливажными зонами S_1 вмещающего сланца. Характерны неправильные лапчатые контуры этих выделений и присутствие в них мелких (преимущественно размерами в первые микрометры) включений кварца и других минералов, тяготеющих преимущественно к периферическим частям выделений монацита (рис. 3, б).

Это так называемый нодулярный (в виде округлых выделений) монацит, или куларит (по первоначальным находкам в шлихах из россыпей Куларского района). В Верхояно-Колымской области он изучен главным образом из россыпей [3], куда минерал попадает из кор выветривания углеродистых пород. Размеры его выделений в шлихах из россыпей – от десятых долей до 1–2 мм. Нами же были описаны находящиеся непосредственно в коренных углеродистых породах мелкие (размерами в сотые доли миллиметра) выделения монацита (см. рис. 3, б), в которых наблюдается обрастание нодулярным монацитом обломочного монацита [9].

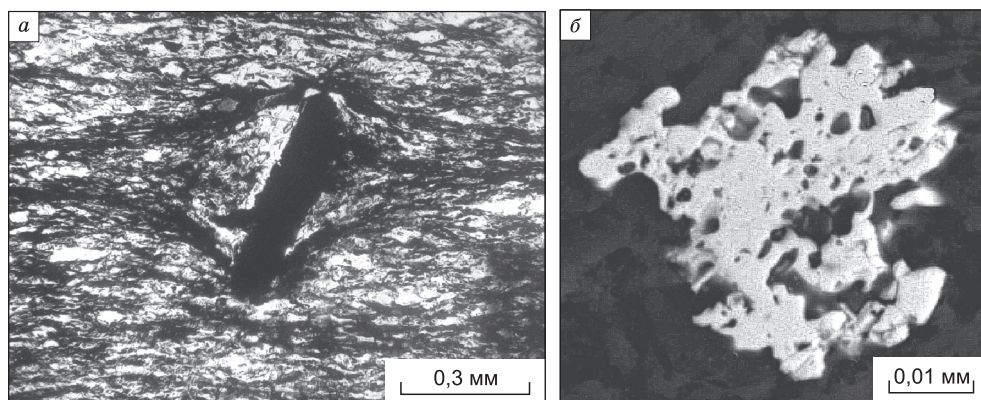


Рис. 3. Ильменит (а, без анализатора, тарбаганнахская свита, водораздел ручьев Бургуат и Кибергел-Юреге) и монацит (б, изображение в отраженных электронах [11], туогучанская свита, ручей Неттик) в углеродистых сланцах

Fig. 3. Ilmenite (a, without analyzer, Tarbagannakh formation, watershed of Burguat and Kibergel-Urege streams) and monazite (b, image in reflected electrons [11], Tuoguchan formation, Nettiik stream), in black shale

Таблица 1

Химический состав монацита из углеродистых сланцев, нормир. масс. % [9]

Table 1

Chemical composition of monazite from carbon shales, normal. wt% [9]

Образец, точка анализа Sample, point of analysis	O	Al	Si	P	Ca	Fe	Sr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Th	U	Сумма
1	28,11	He опр.	0,31	13	0,34	0,21	1,05	He опр.	12,68	26,51	He опр.	11,07	1,59	He опр.	2,52	0	100
4, 1	28,96	0,23	0,55	12,88	0,15	He опр.	0,92	1,82	12,89	26,12	2,25	10,49	1,79	0,94	0	0	100
4, 2	28,52	0,24	0,69	12,76	0,26	He опр.	1	1,28	11,96	24,94	2,7	10,64	1,66	0,76	2,61	0	100
4, 3	28,7	0,25	0,55	13,09	0,24	He опр.	1,27	1,22	12,01	25,88	3,08	10,42	1,46	0	1,84	0	100
4, 4	29,13	0,21	0,37	13,69	0,17	He опр.	0,58	He опр.	12,62	25,63	2,2	10,66	1,69	1,01	2,05	0	100
4, 5	34,27	0,2	0,77	12,75	0,4	He опр.	1,28	1,95	11,3	21,38	2,15	8,73	1,51	0,62	2,69	0	100

Note. He опр. – It was not determined.

Биотит (преимущественно в виде редких чешуек) встречается в породах ТБ свиты в сводовой части Улахан-Сисской антиклинали. При этом в южной части изученной площади он встречается несколько чаще, чем в северной части (см. рис. 1, б). Биотит приурочен преимущественно к песчаникам, реже к алевролитам и не отмечался в аргиллитах. Обломочный кварц песчаников, содержащих биотит, нередко подвержен более сильной перекристаллизации, чем аналогичный обломочный кварц в песчаниках, в которых биотит отсутствует.

Биотит в породах нередко замещает хлорит и мусковит. Его чешуйки могут тяготеть к УКЗ S_1 и располагаться между УКЗ. В том и другом случае зерна биотита могут быть ориентированы своей вытянутостью как вдоль, так и под разными углами к направлению УКЗ. Последние нередко приурочены к границам выделений биотита, иногда огибая и срезая эти выделения (рис. 4, а).

В южной части изученной площади (ручей Тарбаганнах) в углеродистых сланцах с кливажем плейчатости S_2 в промежутках между кливажными зонами S_2 наблюдался биотит в виде крупных зерен, густо насыщенных включениями мелких реликтовых зерен присутствующего в породе (метаалевролит) обломочного кварца (рис. 4, б, в). Включения располагаются внутри биотита «полосками» [8] (inclusion trails [6]), фиксирующими конфигурацию кливажа S_1 при росте биотита (рис. 4, в).

Пирит в виде вкрапленности кубических кристаллов (метакристаллов) широко развит в породах ТГ свиты. При образовании этих кристаллов значительная часть присутствующего в породе углеродистого вещества сохраняется от замещения пиритом, образуя в кристаллах пирита видимую под микроскопом реликтовую текстуру [10].

Особенно наглядно реликтовая текстура проявлена в кристаллах пирита в углеродистых сланцах ТГ свиты, содержащих осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодулы (округлые выделения размерами преимущественно в десятые доли миллиметра) [11]; эти нодулы обычно огибаются и срезаются кливажем S_1 (рис. 5, а). Травление срезов отобранных из таких сланцев кристаллов пирита концентрированной HNO_3 (А.Ф. Бушмакин) выявляет в пирите, в частности, реликтовые углеродистые кливажные зоны и за-

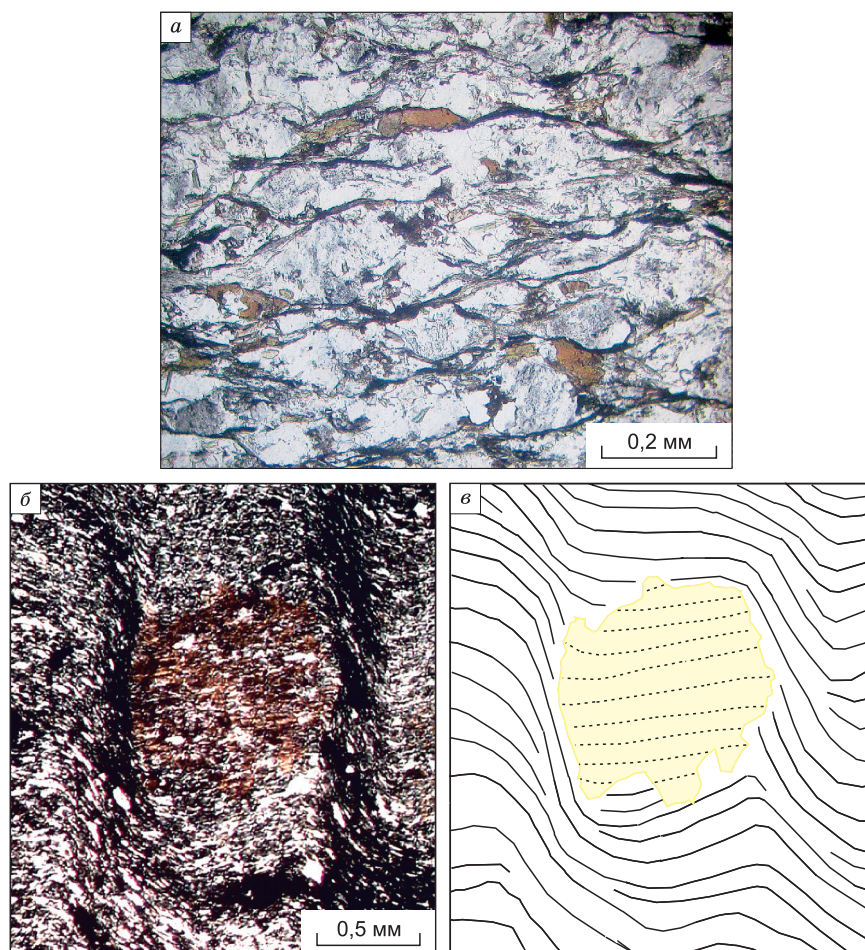


Рис. 4. Биотит в породах тарбаганнахской свиты:

a – углеродистые кливажные зоны S_1 (черное) и зерна биотита (бурое) в песчанике (сечение перпендикулярно кливажу S_1 и линейности); без анализатора; ручей Икиясь; *б, в* – биотит в углеродистом сланце с кливажем пloyчатости S_2 , ручей Тарбаганнах: *б* – без анализатора (бурое – биотит, черные расплывчатые вертикальные полосы – зоны кливажа пloyчатости S_2), *в* – схема ориентировки кливажа S_1 в породе и полосок включений (пунктир) в зерне биотита

Fig. 4. Biotite in rocks of the Tarbagannakh formation:

a – carbonaceous cleavage zones S_1 (black) and grains of biotite (brown) in sandstone (cross section perpendicular to cleavage S_1 and lineation); without analyzer; Ikies stream; *б, в* – biotite in carbonaceous shale with a crenulation cleavage S_2 , Tarbagannakh stream: *б* – without an analyzer (brown – biotite, black blurry vertical stripes – zones of crenulation cleavage S_2), *в* – a scheme of orientation of cleavage S_1 in the rock and inclusion trails (dotted lines) in the biotite

мещенные пиритом отмеченные выше осадочно-диагенетические нодули (рис. 5, *б*). При этом углеродистые кливажные зоны огибают замещенные пиритом осадочно-диагенетические нодули аналогично тому, как это наблюдается на рис. 5, *а* в углеродистом сланце. Подобные наблюдения позволяют заключить, что данные кристаллы пирита возникают после образования в породах кливажа S_1 .

По реликтовой текстуре кристаллов пирита обычно устанавливается, что при образовании этих кристаллов в замещаемой пиритом породе

имелся лишь кливаж S_1 (см. рисунки в статье [10]) и отсутствовал кливаж пloyчатости S_2 (в том числе при наличии последнего в породах возле кристаллов пирита). Лишь в единичных случаях полоски реликтовой текстуры в некоторых кристаллах пирита местами локально смяты в слабые мелкие складки, осевые поверхности которых субпараллельны кливажу пloyчатости S_2 окружающих сланцев (рис. 6, *а*).

Вкрапленному пириту свойствен широкий разброс изотопного состава серы (δS^{34} от -13 до $+2$ ‰) в разных образцах, с обогащением боль-

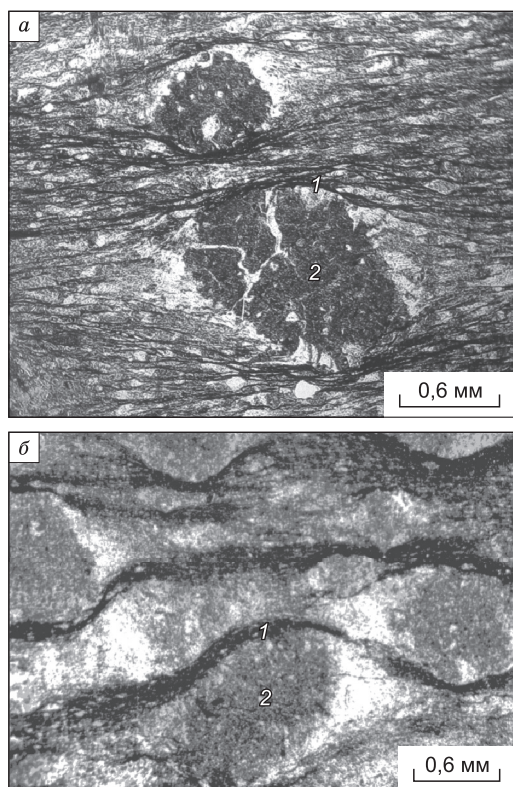


Рис. 5. Углеродистый сланец (*a*, шлиф, без анализатора) и протравленный концентрированной HNO_3 (А.Ф. Бушмакин) пришлифованный срез кристалла пирита из углеродистого сланца (*б*): 1 – углеродистые кливажные зоны, 2 – осадочно-диагенетические подулы (*б* – замещенные пиритом)

Fig. 5. Carbonaceous shale (*a*, shale, without analyzer) and etched with concentrated HNO_3 (A.F. Bushmakina) ground section of pyrite crystal from carbonaceous shale (*b*): 1 – carbonaceous cleavage zones, 2 – sedimentary-diagenetic nodules (*b* – replaced by pyrite)

шинства проб легким изотопом серы (от -1 до -11%) [12]. При этом среди кристаллов вкрапленного пирита достаточно много и кристаллов с однородным изотопным составом серы, близким к метеоритному стандарту (последнее свойственно также пириту из сульфидно-кварцевых жил района) [12].

Магнезиосидерит. В местах развития кливажа плейчатости S_2 в углеродистых сланцах ТГ и ТБ свит нередко присутствуют зерна магнезиосидерита [9] размерами до 1 мм (табл. 2). Наиболее интенсивное их развитие наблюдалось нами в пиритизированных углеродистых сланцах ТГ свиты (см. рис. 6) в Эмисском золоторудном поле (кern скважин Куларской поисково-разведочной партии).

Магнезиосидерит замещает мусковит, хлорит и отчасти кварц в промежутках между УКЗ в по-

родах. Внутри зерен магнезиосидерита реликты УКЗ прямолинейны (см. рис. 6, *б*) и ориентированы поперек развитого в окружающей породе кливажа плейчатости S_2 , субпараллельно во всех зернах присутствующего в пределах шлифа магнезиосидерита (см. рис. 6, *а*; в данном случае в том же направлении ориентированы и реликтовые зоны кливажа S_1 в метакристалле пирита).

Обсуждение

В изученном районе распространены терригенно-осадочные породы – нижнетриасового возраста за пределами Улахан-Сисской антиклинали и пермского возраста – на крыльях (ТГ свита) и в своде (ТБ свита) данной антиклинали. Песчаникам района свойственны в той или иной степени проявленная перекристаллизация обломочного кварца и появление чешуек новообразованного мусковита. При этом в ряду от песчаников триаса к песчаникам ТГ, а затем ТБ свиты размеры зерен перекристаллизации обломочного кварца увеличиваются от 0,010–0,015 мм [13] до 0,02–0,03 мм и 0,03–0,10 мм. В том же ряду поперечник новообразованных чешуек мусковита также возрастает – от меньшего 0,005 мм [13] до 0,005 и 0,010 мм.

Размеры зерен перекристаллизованного кварца и чешуек мусковита, наблюдающиеся в песчаниках триаса, характерны для степени постдиагенетических изменений триасовых пород, отвечающей метатексту (анхиметаморфизму) [13, 14] (происходит при температурах 200–350 °C [15]). Размеры зерен перекристаллизованного кварца и чешуек мусковита, подобные наблюдающимся в песчаниках ТГ и ТБ свит, отмечаются в терригенно-осадочных породах, подвергшихся метаморфизму зеленосланцевой фации [16]. На метаморфические изменения пород данных свит указывает [6] и наличие гранобластовых (см. рис. 2, *б*) и лепидогранобластовых структур в углеродистых сланцах, а также в матриксе и обломках пород в песчаниках.

Приведенные выше значения межплоскостного расстояния (002) углеродистого вещества в сланцах ТГ свиты (3,40–3,43 Å) отвечают, по [17], углеродистому веществу мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации (температуры метаморфизма 350–400 °C). Данной субфации не противоречит и присутствие в породах изученной площади нодулярного монацита («ку-

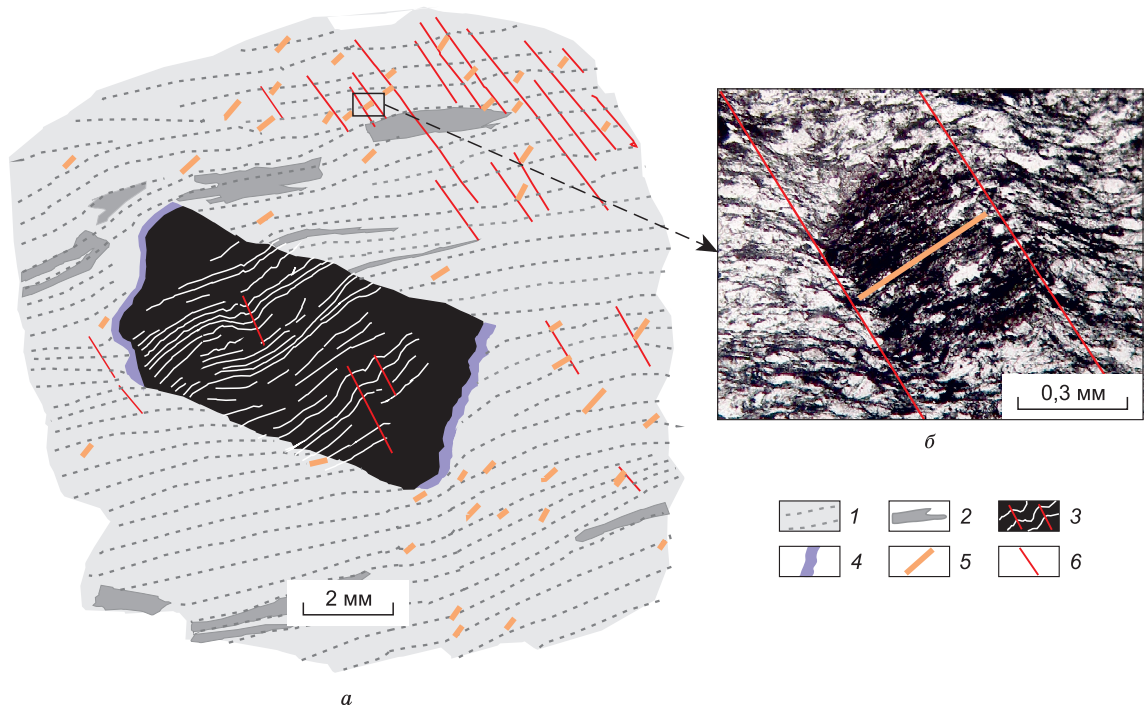


Рис. 6. Зерна пирита (*а*, черное) и магнезиосидерита (*б*, без анализатора) в алевролите, ручей Эмись: 1 – кливаж S_1 в алевролите, 2 – аргиллит, 3 – реликты кливажа S_1 (белое) в пирите (черное) и осевые плоскости (красное) изгибов реликтов, 4 – хлоритовая оторочка деформации на кристалле пирита, 5 – направление полосок включений в зернах магнезиосидерита, 6 – направление слабо дифференцированного кливажа плоскостности S_2

Fig. 6. Porphyroblasts of pyrite (*a*, black) and magnesiosiderite (*б*, without analyzer) in siltstone, Emis stream: 1 – cleavage S_1 in siltstone, 2 – argillite, 3 – relicts of cleavage S_1 (white) in pyrite (black) and axial planes (red) of relic bends, 4 – chlorite deformation fringe at pyrite crystal, 5 – the direction of inclusion trails in magnesiosiderite, 6 – the direction of weakly differentiated crenulation cleavage S_2

ларита»). По [18], во многих районах подобный монацит наиболее характерен для мусковит-хлоритовой субфации метаморфизма (хотя может образовываться и при более низких температурах – до 100–300 °С). В условиях данной субфации нодулярный монацит возникал и в углеродистых сланцах крупнейшего в России золоторудного месторождения Сухой Лог [19]. Ильменит – обычный минерал ряда углероди-

стых сланцев ТБ свиты, в подобных породах других районов также часто образуется в условиях мусковит-хлоритовой субфации [20].

Нередкое присутствие в породах ТБ свиты метаморфического биотита (см. рис. 1, *б*) показывает, что степень метаморфизма в породах этой свиты достигает, по крайней мере местами, биотитовой субфации зеленосланцевой фации (первое появление биотита при метаморфизме

Таблица 2
Химический состав магнезиосидерита из углеродистых сланцев, мол.% [9]

Table 2
Chemical composition of magnesiosiderite from carbonaceous shales, mol.% [9]

Образец Sample	FeCO ₃	MgCO ₃	MnCO ₃	CaCO ₃	Примечания Notes
1	64,9	32	1,8	1,2	Среднее по 3 анализам Average of 3 analyses
2	68,9	28,8	1,9	0,3	
3	63,8	33,8	2,0	0,4	

подобных пород происходит при температуре около 400 °С [21]).

К биотитовой субфации в ТБ свите могут относиться и породы, не содержащие в своем составе биотита. Это могут быть по крайней мере некоторые ильменитсодержащие мусковит-углеродисто-кварцевые сланцы – свойственный им безбиотитовый парагенезис ильменит–хлорит–мусковит может быть стабилен как в мусковит-хлоритовой, так и в биотитовой субфации [20].

По [22], низкотемпературная граница биотитовой субфации соответствует появлению первых биотитов в калишпатсодержащих песчаниках, а в таких породах, как не содержащие калишпата песчаники данного района, биотит появляется лишь при более высоких температурах, чем соответствующие началу биотитовой субфации. В метапелитах, наиболее широко распространенных в данном районе породах, биотит в условиях биотитовой субфации может вообще не образовываться [22].

Таким образом, биотитовая субфация в ТБ свите может быть развита более широко, чем лишь в участках непосредственного обнаружения в породах биотита (см. рис. 1, б).

В целом приведенные выше данные отвечают преобразованиям пермских пород Улахан-Сисской антиклинали в условиях низов зеленосланцевой фации [5, 23] – к данной антиклинали приурочена зона метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации до биотитовой субфации в отдельных участках сводовой части антиклинали.

Рассмотренные в настоящей статье минералы метаморфизованных пермских углеродистых пород Улахан-Сисской антиклинали находятся в разных возрастных соотношениях с ранним кливажем S_1 и наложенным на него кливажем S_2 . Эти минералы можно разделить на образовавшиеся: 1) до завершения образования S_1 , 2) после образования S_1 , но до формирования S_2 , 3) при формировании S_2 .

1. К минералам, образовавшимся до завершения формирования S_1 , можно отнести хлорит, мусковит, ильменит, монацит и часть биотита. Хлорит замещается ориентированным параллельно S_1 мусковитом, выделения ильменита (см. рис. 3, а) и нодулярного монацита (см. рис. 3, б) огибаются кливажными зонами S_1 . В других районах на образование кристаллов ильменита при формировании S_1 в подобных породах

указывается в [24], на огибание выделений монацита кливажными зонами S_1 вмещающих сланцев – в [25]. Отмечаемое в ряде случаев огибание и срезание чешуек биотита углеродистыми кливажными зонами S_1 (см. рис. 4, а) также указывает на образование данных чешуек биотита до завершения формирования S_1 .

2. После формирования S_1 (или на самых поздних стадиях его формирования, непосредственно перед окончанием течения породы, сопровождавшего образование S_1), преимущественно до возникновения S_2 , в породах ТГ свиты происходила кристаллизация пирита. При наличии в породах возле кристаллов пирита кливажа S_2 реликтовая текстура кристаллов обычно не фиксирует присутствия S_2 при росте пирита (за исключением единичных редких случаев локального мелкого смятия полосок реликтового S_1 – рис. 6, а). Подобное образование кристаллов пирита главным образом после образования кливажа S_1 , до образования кливажа S_2 , отмечается в аналогичных породах и в других районах [26].

Свойственный кристаллам вкрапленного пирита широкий разброс изотопного состава серы, с обогащением большинства проб легким изотопом серы, указывает на участие в образовании большинства кристаллов пирита легкой серы осадочно-диагенетических сульфидов. Наличие при этом среди кристаллов вкрапленного пирита существенного количества кристаллов с однородным изотопным составом серы, близким к метеоритному стандарту (как у пирита из сульфидно-кварцевых жил района) [12], может быть связано с подобным отмеченному на месторождении Сухой Лог [19] совместным присутствием в породах сходных метакристаллов пирита, образовавшихся при метаморфизме и в процессе метасоматических изменений, связанных с образованием сульфидно-кварцевых жил.

3. При формировании кливажа плейчатости S_2 в породах южной части площади (ручей Тарбаганнах) в углеродистых сланцах образуется биотит в виде отдельных изометричных крупных зерен (см. рис. 6, б, в). Такие зерна начинают расти при коаксиальной деформации в начале образования кливажа плейчатости и прекращают свой рост при последующем активном сдвигании на крыльях плейчатости [27].

Таким образом, в породах изученной площади наблюдаются биотит с рассмотренными выше признаками образования до завершения формирования S_1 и биотит, кристаллизовавшийся в про-

цессе формирования более позднего S_2 . Подобное последовательное выделение метаморфического биотита сначала при образовании раннего «сланцевого» кливажа, а затем вместе с более поздним кливажем плейчатости отмечается в работе [7, p.196].

Так как биотит является индикатором максимальных для данного района температур метаморфизма, это может указывать на повышение температур метаморфизма до максимальных значений как при образовании S_1 , так и при образовании S_2 . В случае существенного разрыва во времени между образованием S_1 и S_2 (как это отмечается в других районах [8]), появление биотита при формировании того и другого кливажа может соответствовать представлениям о двухэтапности метаморфизма в данном районе («ранний дограницитный региональный метаморфизм зеленосланцевой фации» и «более поздний метаморфизм в ядре Улахан-Сисской антиклинали, тесно связанный со становлением располагающегося южнее Куларского гранитного батолита» [23]).

Кроме того, при формировании кливажа плейчатости образуются приуроченные к промежуткам между кливажными зонами S_2 зерна магнезиосидерита (см. рис. 6). Последние широко распространены и в углеродистых сланцах в районе упомянутого выше золоторудного месторождения Сухой Лог. На этом месторождении формирование магнезиосидерита связывают с региональным метаморфизмом или с наложенным на регионально метаморфизованные породы метасоматизмом [19, 25, 26]. По [19], процесс образования магнезиосидерита происходил «синхронно с деформациями и рассланцеванием пород». В рассматриваемом в настоящей статье случае это соответствует выделению магнезиосидерита при образовании кливажа плейчатости S_2 .

Выводы

1. Пермские углеродисто-терригенные породы Улахан-Сисской антиклинали метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации – к данной антиклинали приурочена субмеридионально вытянутая зона метаморфизма, повышающегося от наиболее широко развитой мусковит-хлоритовой субфации до биотитовой субфации зеленосланцевой фации в отдельных частях свода антиклинали.

2. К числу наиболее ранних метаморфических минералов в породах Улахан-Сисской анти-

клинали относятся хлорит, монацит и ильменит. Они выделялись до и/или в начале образования кливажа S_1 . При формировании последнего происходила также перекристаллизация обломочного кварца и образование ориентированных вдоль направления S_1 чешуек мусковита. Размеры зерен перекристаллизации кварца и чешуек мусковита в породах возрастают по мере усиления степени метаморфических преобразований при переходе от крыльев к сводовой части антиклинали.

3. Биотит, являющийся индикатором максимальных для данного района температур метаморфизма, образуется как в виде отдельных рассеянных чешуек до завершения формирования кливажа S_1 , так и в виде значительно более крупных изометричных зерен при формировании более позднего кливажа плейчатости S_2 ; это, в случае значительного разрыва во времени между образованием S_1 и S_2 , не противоречит известным представлениям о двухэтапности метаморфизма пород в данном районе.

4. Рост кристаллов вкрапленного пирита происходит при завершении формирования S_1 , до появления кливажа плейчатости S_2 . Образование кристаллов пирита при метаморфизме пород происходило преимущественно с участием серы осадочно-диагенетических сульфидов. Кроме того, возникновение некоторых кристаллов пирита могло быть связано с процессами метасоматических изменений в контактах сульфидсодержащих кварцевых жил.

5. Магнезиосидерит мог образовываться при формировании кливажа плейчатости S_2 в связи с метаморфизмом пород или с наложенным на метаморфизованные породы карбонатным метасоматизмом.

Список литературы / References

1. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН; 1998. 210 с.
Goryachev N.A. *Geology of mesozoic gold-quartz vein belts in Northeast Asia*. Magadan: North-Eastern Scientific Research Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 1998. 210 p. (In Russ.)
2. Фридовский В.Ю. Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения. В кн.: Парфенов Л.М. и Кузьмин М.И. (ред.) *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. С. 350–353.
Fridovsky V.Yu. Kular metallogenic zone: metamorphogenic Au and quartz deposits. In: Parfenov, L.M. and

- Kuz'min M.I. (eds.) *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001, pp. 350–353. (In Russ.)
3. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Прокопьев А.В. и др. Нодулярный монацит из россыпей Куларского кряжа (Арктическая Сибирь, Россия) – состав, оценки возраста. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1658–1679. <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20181010>
- Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Prokopyev A.V., et al. Nodular monazite from placers of the Kular Ridge (Arctic Siberia, Russia): composition, age estimates. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;(10):1658–1679. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20181010>
4. Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области. В кн.: Парфенов Л.М. и Кузьмин М.И. (ред.) *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. С. 199–255.
- Parfenov L.M., Oksman V.S., Prokoiev A.V. Terrane collage of the Verkhoyansk-Kolyma orogenic region. In: Parfenov L.M. and Kuz'min M.I. (eds.) *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)*. Moscow: MAIK "Nauka/Interperiodika"; 2001, pp. 199–255. (In Russ.)
5. Суставов О.А. Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия). *Геология и геофизика*. 1995;(4):81–87.
- Sustavov O.A. Deformations of vein quartz during the formation of gold mineralization in black shale strata (Kularsky region, Eastern Yakutia). *Russian Geology and Geophysics*. 1995;(4):81–87. (In Russ.)
6. Vernon R.H. *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge University Press; 2018. 431 p. <https://doi.org/10.1017/9781108654609>
7. Passchier C.W., Trouw R.A.J. *Microtectonics*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2005. 366 p.
8. Кирмасов А.Б. *Основы структурного анализа*. М.: Научный мир; 2011. 368 с.
- Kirmasov A.B. *Fundamentals of structural analysis*. Moscow: Nauchnyi mir; 2011. 368 p. (In Russ.)
9. Суставов О.А., Шагалов Е.С. Магнезиосидерит и монацит в углеродистых сланцах северной части Куларского района, Якутия. *Уральская минералогическая школа*. 2021;(27):117–119.
- Sustavov O.A., Shagalov E.S. Magnesiosiderite and monazite in carbonaceous shales of the northern part of the Kular region, Yakutia. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola [Urals Mineralogical School]*. 2021;(27):117–119. (In Russ.)
10. Бушмакин А.Ф. Унаследованное строение кристаллов пирита из пород с углеродистым веществом. В кн.: Григорьев Д.П. и др. (ред.) *Проблемы онтогении минералов*. Л.: Наука; 1985. С. 73–82.
- Bushmakina A.F. Inherited structure of pyrite crystals from rocks with carbonaceous matter. In: Grigor'ev D.P., et al (eds.) *Problems of minerals ontogeny*. Leningrad: Nauka; 1985, pp. 73–82.
11. Суставов О.А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2021;26(3):31–42. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>
- Sustavov O.A. Cleavage microstructures and stretching indicators in black-shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(3):31–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31-42>
12. Перкова Р.И., Суставов О.А., Бушмакин А.Ф. Изотопный состав серы сульфидов золотоносных кварцевых жил и пиритизированных зон в черных сланцах одного из районов Якутии. В кн.: *VIII Всесоюзный симпозиум по стабильным изотопам в геохимии, г. Москва, 11–14 ноября 1980 г.* М., 1980. С. 337–338.
- Perkova R.I., Sustavov O.A., Bushmakina A.F. Isotopic composition of sulfur sulfides of gold-bearing quartz veins and pyritized zones in black shales of one of the regions of Yakutia. In: *8th All-Union symposium on stable isotopes in geochemistry, Moscow, November 11–14, 1980*. Moscow; 1980, pp. 337–338. (In Russ.)
13. Суставов О.А. Динамическая перекристаллизация кварца в жилах среди песчаников зоны метатекнеза (Куларский район, Якутия). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2018;(6):33–40. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-33-40>
- Sustavov O.A. Dynamic recrystallization of quartz in veins in sandstones of the metagenesis zone (Kularsky district, Yakutia). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018;(6):33–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2018-6-33-40>
14. Суставов О.А. Кварцевые жилы южной части Адыча-Эльгинского антиклинория и зоны Адыча-Тарынского разлома, Якутия. *Литосфера*. 2018;18(1):111–126. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126>
- Sustavov O.A. Quartz veins at the southern part of Adycha-Elgi anticlinorium and zone of Adycha-Taryn fault, Yakutia. *Lithosphere (Russia)*. 2018;18(1):111–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-1-111-126>
15. Япаскурт О.В. Аспекты теории постседиментационного литогенеза. *Литосфера*. 2005;(3):3–30.
- Yapaskurt O.V. The aspects of the postsedimental lithogenesis theory. *Lithosphere (Russia)*. 2005;(3):3–30. (In Russ.)
16. Turnbull I. M., Mortimer N., Craw D. Textural zones in the Haast Schist—a reappraisal. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2001;44(1):171–183.
17. Nakamura Y., Akai J. Microstructural evolution of carbonaceous material during graphitization in the Gyojama contact aureole: HRTEM, XRD and Raman spec-

troscopic study. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2013; 106(3):131–143. <https://doi.org/10.2465/jmps.120625>

18. Čopjaková R., Novák M., Franců E. Formation of authigenic monazite-(Ce) to monazite-(Nd) from Upper Carboniferous graywackes of the Drahany Upland: Roles of the chemical composition of host rock and burial temperature. *Lithos*. 2011;127:373–385. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.08.001>

19. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. и др. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений*. 2008;50(1):3–46.

Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., et al. Wall-rock metasomatism of carbonaceous terrigenous rocks in the Lena gold district. *Geology of Ore Deposits*. 2008;50(1):1–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/s1075701508010017>

20. Портнов А.М., Жаднова Т.П. Ильменитсодержащие метаморфические сланцы Патомского нагорья. *Известия АН СССР. Серия геологическая*. 1969;(2):124–127.

Portnov A.M., Zhadnova T.P. Ilmenite-bearing metamorphic shales of the Patom Highlands. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geologicheskaya [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geological Series]*. 1969;(2):124–127. (In Russ.)

21. Kidder S., Avouac J.-P., Chan Y.-C. Constraints from rocks in the Taiwan orogen on crustal stress levels and rheology. *Journal of Geophysical Research*. 2012; 117. <https://doi.org/10.1029/2012JB009303>

22. Кориковский С.П. *Фашии метаморфизма метапелитов*. М.: Наука; 1979. 263 с.

Korikovskiy S.P. *Facies of metapelite metamorphism*. Moscow: Nauka; 1979. 263 p. (In Russ.)

23. Константинов М.М., Константиновский Ф.Ф., Наталенко М.В. Типизация золоторудных районов в терригенно-сланцевых поясах России. *Региональная геология и металлогения*. 2013;(54):75–88.

Konstantinov M.M., Konstantinovskiy F.F., Natalenko M.V. Typification of gold mining areas in the terrigenous shale belts of Russia. *Regional Geology and Metallogeny*. 2013;(54):75–88. (In Russ.)

24. Prior D.J. Syntectonic porphyroblast growth in phyllites: textures and processes. *Journal of Metamorphic Geology*. 1987;(5):27–39.

25. Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В. и др. Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*. 2011;53(1):32–64.

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., et al. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits*. 2011;53(1):27–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>

26. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., et al. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*. 2007; 102(7):1233–1267. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>

27. Bell T.H., Sanislav I.V., Sapkota J. The control of deformation partitioning and strain localization on porphyroblast behaviour in rocks and experiments. *Geosciences Journal*. 2018;22:65–77. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0030-8>

Об авторе

СУСТАВОВ Олег Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, SPIN: 2135-3900, e-mail: olsustavov@mail.ru

About the author

SUSTAVOV, Oleg Anatol'evich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1880-5494>, SPIN: 2135-3900, e-mail: olsustavov@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 26.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.02.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024

Оригинальная статья

Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма

Е. В. Поспеева¹, А. В. Толстов^{✉,2}

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

✉tols61@mail.ru

Аннотация

Восполнение минерально-сырьевой базы в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (ДААР) Якутии связывается с выявлением новых коренных месторождений алмазов в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП). Территория развития палеозойских терригенно-карбонатных отложений в пределах поля осложнена интродуцированными телами (дайки, силлы, покровы) траппов, создающих весьма трудную геологическую задачу для поисков. Цель данного исследования – изучение особенностей глубинного строения земной коры (включая осадочный) чехол и их связи с проявлениями кимберлитового магматизма для выделения на территории с весьма сложным геологическим строением объектов кимберлитового магматизма геофизическими методами с учетом современных возможностей обработки и интерпретации первичных материалов. Результаты прогнозно-поисковых исследований с помощью магнитотеллурических зондирований (МТЗ), проведенных в пределах юго-западного фланга АМКП, рассмотрены с позиций структурного контроля размещения полей кимберлитов и их кустов. Показано, что основные факторы, контролирующие проявления кимберлитового магматизма на стадии среднемасштабных и локальных исследований: проводящие неоднородности в земной коре, расположенные в узлах пересечения Далдыно-Оленекской зоны глубинных разломов с разнонаправленными тектоническими нарушениями (малоамплитудными депрессиями), осложненными структурами противоположного знака. Подобные геолого-структурные предпосылки установлены на участках развития кимберлитовых тел, выявленных геологическими исследованиями в пределах АМКП. Усиленные благоприятными минералого-геохимическими результатами, эти предпосылки могут рассматриваться в качестве основных критериев прогнозирования новых кимберлитовых тел в хорошо изученном районе. По совокупности геолого-геофизических, минералогических и геохимических данных выделена центральная часть изученного профиля МТЗ, наиболее перспективная для прогнозирования и выявления новых алмазоносных объектов разряда отдельных кимберлитовых тел.

Ключевые слова: магнитотеллурические исследования, Далдыно-Алакитский алмазоносный район, Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, проводящие неоднородности, тектонические нарушения, кимберлитовый магматизм

Финансирование. Статья подготовлена в рамках государственного задания ИНГГ и ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Поспеева Е.В., Толстов А.В. Новые перспективы Алакит-Мархинского кимберлитового поля на проявление кимберлитового магматизма. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):20–37. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37>

Prospects of the southwestern part of the Alakit-Markha kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism: magnetotelluric studies

Elena V. Pospeeva¹, Alexander V. Tolstov^{✉,2}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉tols61@mail.ru

Abstract

The replenishment of the mineral resource base in the Daldyn-Alakit diamond-bearing region (Yakutia) is associated with the identification of new primary diamond deposits within the Alakit-Markha kimberlite field (AMKF). The development of Paleozoic terrigenous carbonate deposits within the field is complicated by intruded bodies of traps, thus creating a challenging geological task for prospecting. This study aimed to investigate the features of the deep structure of the Earth's crust, including sedimentary cover, and their relationship with the manifestations of kimberlite magmatism to isolate objects of kimberlite magmatism by geophysical methods in an area with a very complex geological structure. The results of predictive prospecting studies using magnetotelluric sounding (MTS) conducted within the southwestern flank of the AMKF are considered from the standpoint of structural control of the placement of kimberlite fields and their bushes. Our findings show that the main factors controlling the manifestations of kimberlite magmatism at the medium-scale stage, and local studies include conducting inhomogeneities in the Earth's crust located at the intersection points of the Daldyn-Olenek zone of deep faults with multidirectional tectonic disturbances and low-amplitude depressions complicated by structures of the opposite sign. Similar geological and structural prerequisites were established in the areas of development of kimberlite bodies identified by geological studies within the AMKF. Enhanced by favorable mineralogical and geochemical results, these prerequisites can be considered the main criteria for predicting new kimberlite bodies in a well-studied area. We specified the central part of the studied MTS profile based on the geological, geophysical, mineralogical, and geochemical data, which is the most promising for forecasting and identifying new diamond-bearing objects in the category of individual kimberlite bodies.

Keywords: magnetotelluric surveys, Daldyn-Alakit diamond-bearing area, Alakit-Markha kimberlite field, conducting inhomogeneities, tectonic disturbances, kimberlite magmatism

Funding. This article was prepared within the framework of the state assignment for the IPGG SB RAS and DPMGI SB RAS.

For citation: Pospeeva E.V., Tolstov A.V. Prospects of the southwestern part of the Alakit-Markha kimberlite field for the manifestation of kimberlite magmatism: magnetotelluric studies. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):20–37. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-20-37>

Введение

Далдыно-Алакитский алмазоносный район является одним из главных регионов интенсивной алмазодобычи в Республике Саха (Якутия), поскольку здесь сосредоточена значительная доля запасов алмазов Сибирской платформы (рис. 1). Восполнение минерально-сырьевой базы для действующих в данном регионе горно-обогачительных комбинатов – актуальная задача. Прирост запасов алмазов в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе (ДААР) сегодня связывается только с обнаружением новых коренных месторождений алмазов в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля (АМКП), где широко развиты палеозойские карбонатно-терригенные

отложения, интродуцированные пластовыми телами долеритов, создающие весьма сложную геологическую задачу для поисков. Прямым признаком высокого потенциала АМКП на обнаружение новых высокоалмазоносных кимберлитов являются находки алмазов и минералов-индикаторов кимберлита (ИМК) хорошей сохранности в перекрывающих верхнепалеозойских песчано-галечных отложениях. Наименее изучены юго-западный и западный фланги поля, которые являются переходной зоной к территории Моркокинского кимберлитового поля с единственной трубкой Моркока. Эта территория перспективна на обнаружение кимберлитовых тел, поскольку расположена в пределах Далдыно-Оленекской

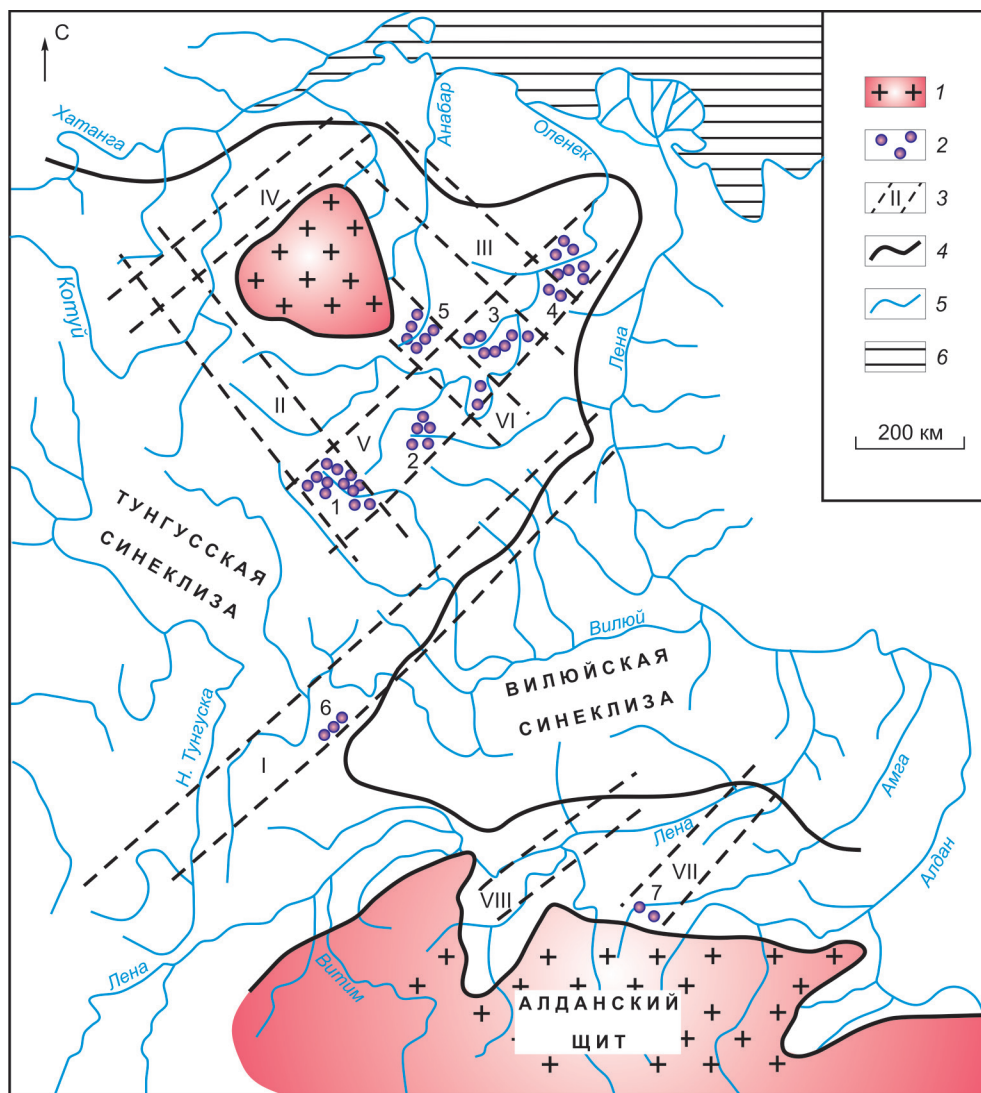


Рис. 1. Схема расположения дизъюнктивных структур восточной части Сибирской платформы [2]:

1 – выходы на поверхность кристаллического фундамента платформы; 2 – кимберлитовые трубки и дайки (1 – Алачит-Далдынская группа, 2 – Мунская группа, 3 – Средне-Оленекская группа, 4 – Куойско-Мэрчимденская группа, 5 – Анабарская группа; 6 – группа трубки «Мир», 7 – Алданская группа); 3 – дизъюнктивные зоны разломов (I – Ангара-Мунская, II – Мархинско-Котуйская, III – Молодо-Попигайская, IV – Котуйско-Анабарская, V – Мархинско-Оленекская, VI – Мунско-Анабарская, VII – Чугино-Ленская, VIII – Чарская); 4 – границы крупных платформенных структур; 5 – гидросеть; 6 – территория, занятая морем

Fig. 1. Layout of disjunctive structures of the eastern part of the Siberian platform [2]:

1 – outcrops to the surface of the crystalline basement of the platform; 2 – kimberlite pipes and dikes: 1 – Alakite-Daldyn group, 2 – Munsky group, 3 – Sredne-Olenek group, 4 – Kuoyisko-Merchimden group, 5 – Anabar group; 6 – Mir tube group, 7 – Aldan group; 3 – disjunctive fault zones: I – Angara-Munskaya, II – Markhinsko-Kotuyskaya, III – Molodo-Popigayskaya, IV – Kotuysko-Anabarskaya, V – Markhinsko-Olenekskaya, VI – Munsko-Anabarskaya, VII – Chugino-Lena, VIII – Charskaya; 4 – borders of large platform structures; 5 – hydro grid; 6 – territory occupied by the sea

кимберлитоконтролирующей зоны глубинных разломов, к которой тяготеет целый ряд кимберлитовых полей (см. рис. 1), а в верхнепалеозойских отложениях обнаружены находки алмазов и ореолы рассеяния ИМК неустановленного коренного источника [9]. Однако прогнозирование и поиски

здесь новых месторождений алмазов осложняются широким развитием в геологическом разрезе пластовых и даечных тел базитовых туфов и долеритов, что затрудняет применение на стадии локального прогноза традиционных геофизических методов – магнито-, грави- и электроразведки.

Возможность выделения объектов кимберлитового магматизма геофизическими методами определяется отличием их физических свойств от вмещающих пород. Опыт работ в Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) показал, что подавляющее большинство кимберлитовых тел ввиду их невысокой магнитности не отражаются в магнитном поле, а аномалии «трубчатого типа» зачастую имеют базитовую природу. Помимо этого, в сложном магнитном поле, обусловленном траппами и площадным распространением обогащенных магнитными минералами терригенно-карбонатных пород, выделение перспективных аномалий крайне затруднено, а порой и практически невозможно. В то же время, результаты изучения удельного электрического сопротивления Якутской и Архангельской кимберлитовых провинций показали, что сопротивление кимберлитов значительно изменяется от одной кимберлитовой трубки к другой, но в большинстве случаев обнаруживается идентичность их электрических свойств и характеристик по отношению к вмещающим толщам [10].

В связи с этим возникает необходимость поиска дополнительных геофизических критериев прогнозирования на базе выделения факторов структурно-тектонического контроля кимберлитового магматизма. Одним из технологических методов, позволяющих интерпретировать структурно-тектонические особенности и изучать глубинное строение земной коры алмазоносных территорий, является метод магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Результаты применения региональных и среднемасштабных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе показали его высокую информативность при прогнозировании разноранговых объектов кимберлитового магматизма. Установлено, что в пределах ЯАП наряду с ореолами ИМК, гравимагнитными минимумами и повышенной сейсмической гетерогенностью земной коры критерием прогнозирования кимберлитовых полей служит наличие проводящих субвертикальных неоднородностей на фоне высокоомного разреза земной коры. Кимберлитовые районы, как правило, располагаются в пределах крупных неоднородностей высокого сопротивления, а поля и кусты кимберлитовых трубок локализуются в пределах проводящих субвертикальных неоднородностей, связанных с системами региональных глубинных разломов, обуславливающих формирование структур рифтогенного растяжения.

Наличие проницаемых зон под кимберлитовыми полями не является их уникальной особенностью. Эндогенные рудогенерирующие системы построены по единой схеме, включающей три уровня: зону генерации (или глубинный источник мобильной фазы – магм или флюидов с растворенными в них рудными компонентами), транспортную зону (дренажную сеть, выводящую мобильную фазу в верхние горизонты земной коры) и зону консолидации, где мобильная фаза кристаллизуется – в случае магматических расплавов или сбрасывает рудную нагрузку или рассеивается – в случае флюидных потоков. Исходя из этого, можно предположить, что проводящие зоны могут представлять собой транспортную зону магматических расплавов в верхние горизонты земной коры и связаны с верхним уровнем эндогенной рудообразующей системы.

Многочисленные данные о глубинном строении рудных районов свидетельствуют об их очаговой природе, причем в большинстве случаев под ними устанавливаются очаги разуплотнения (в верхней мантии и земной коре), а также пологие зоны волноводов. Все это позволяет рассматривать рудные, в том числе и кимберлитовые, районы как многоочаговые постройки, отличающиеся повышенной проницаемостью. Существование отдельных проницаемых зон для объяснения пространственного размещения кимберлитового магматизма недостаточно. Необходимым условием для обеспечения «сквозной» мантийно-коровой проницаемости являются области пересечения или совмещения проницаемых зон. В этом случае возникает субвертикальная проницаемая область, обеспечивающая корово-мантийное взаимодействие и формирование благоприятных условий для размещения кимберлитовых районов и полей [16]. В этом плане особый интерес представляют проводящие неоднородности, расположенные в узлах пересечения Далдыно-Оленекской и Вилюйско-Котуйской зон глубинных разломов. Интересно отметить, что Сюльдюкарское кимберлитовое поле, открытое сравнительно недавно (2015 г.) в западной части Вилюйско-Мархинской кимберлитоконтролирующей зоны глубинных разломов [17], пространственно сопряжено с проводящей неоднородностью, выделенной нами по данным региональных МТЗ еще в конце 80-х годов прошлого столетия [22, 23] и рекомендованной для проведения алмазопромысловых работ (рис. 2).

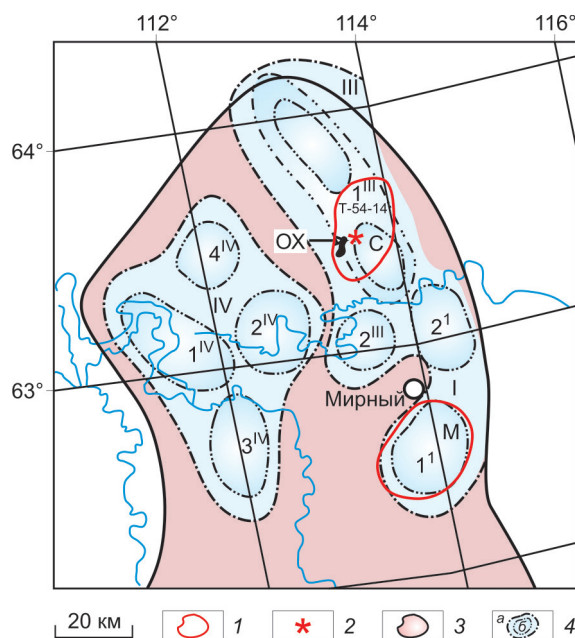


Рис. 2. Фрагмент Карты результатов региональных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазонасной провинции:

1 – контуры кимберлитовых полей (М – Мирнинское, С – Сюльдюкарское); 2 – новое кимберлитовое тело (аномалия Т-54-14); 3 – контуры высокоомной неоднородности; 4 – контуры проводящих неоднородностей первого (а) и второго (б) порядков (I – Ботубинская, III – Бахчинская, IV – Вилуйская, 1^I – Мирнинская, 2^I – Сюльдюкарская восточная, 1^{III} – Холмологинская, 2^{III} – Сюльдюкарская западная, 2^{IV} – Анняхская, 3^{IV} – Чернышевская, 4^{IV} – Ахтарандинская)

Fig. 2. Fragment of the Map of the results of regional magnetotelluric studies in the Yakut diamond-bearing province:

1 – contours of kimberlite fields: M – Mirninskoye, C – Syuldyukarskoye; 2 – a new kimberlite body (anomaly T-54-14); 3 – contours of high-resistance inhomogeneities; 4 – contours of conducting inhomogeneities of the first (a) and second (b) orders: I – Botubinskaya, III – Bakhchinskaya, IV – Vilyuiskaya, 1^I – Mirninskaya, 2^I – Syuldyukarskaya East, 1^{III} – Holomolokhinskaya, 2^{III} – Syuldyukarskaya West, 2^{IV} – Annyakhskaya, 3^{IV} – Chernyshevskaya, 4^{IV} – Akhtarandinskaya

Таким образом, к факторам, контролирующим проявления кимберлитового магматизма в ЯАП, можно отнести глубинные системы рифтогенных разломов, области их пересечения в пределах блоков земной коры с высокими значениями удельного электрического сопротивления и проводящие проницаемые зоны, расположенные в узлах пересечения разнонаправленных глубинных разломов. Поэтому целевым назначением настоящих исследований было изучение особенностей глубинного строения земной коры (включая осадочный) чехол и их связи с проявлениями кимберлитового магматизма, что предусматривало решение следующих задач:

- построение геоэлектрической модели осадочного чехла, определение латеральных размеров и мощности долеритовых пластовых интрузий;
- прослеживание разрывных нарушений в осадочном чехле на основе анализа данных электроразведки;
- выявление основных особенностей глубинного строения консолидированной части земной коры.

Краткий очерк геологического строения Далдыно-Алаakitского алмазонасного района (ДААР)

ДААР расположен в центральной части ЯАП в пределах северо-восточной окраины Тунгусской синеклизы на ее стыке с Анабарской антеклизой и включает в себя два кимберлитовых поля: Алаakit-Мархинское и Далдынское (см. рис. 1). В пределах зоны сочленения выделяются два структурных этажа Сибирской платформы, различающихся по строению и времени формирования: кристаллический фундамент и перекрывающий его платформенный осадочный чехол. Глубина залегания фундамента в ДААР составляет 2500 м на северо-востоке и 3100 м в его западной части [26, 28].

Слагающие фундамент породы входят в анабарский гранулитовый комплекс, относящийся к далдынской, верхнеанабарской и хапчанской сериям архея. В зонах слияния и дробления широко распространены полиметаморфические породы верхнеламайского комплекса, сформировавшиеся в результате диафтореза в условиях амфиболитовой фации в позднеархейское-раннепротерозойское время.

В геологическом строении осадочного чехла принимают участие палеозойские образования, относящиеся к двум циклам седиментации, вулканогенно-осадочные породы пермо-триаса, а также четвертичные отложения различных генетических типов. В северо-восточной части района, в бассейне р. Далдын преобладают карбонатные породы нижнего ордовика и верхнего кембрия: известняки, доломиты, аргиллиты и мергели.

На юго-западе, в бассейне верховьев рек Алаakit и Марха развиты пестроцветные глинисто-карбонатные отложения среднего ордовика и известняки нижнего силура. Помимо этого, здесь широко распространены верхнепалеозойские отложения среднего и верхнего отделов каменно-

угольной, а также нижнего и верхнего отделов пермской систем: глинистые сланцы, алевролиты и песчаники.

Современный рельеф поверхности фундамента сформирован блоковой тектоникой платформенного этапа развития. Наиболее древними являются глубинные разломы субмеридиональной ориентировки – межблоковые и внутриблоковые. Первые разделяют крупные структурные блоки фундамента (антиклинорные и синклинорные) и часто сопровождаются динамометаморфическими преобразованиями. Внутриблоковые разломы имеют локальное развитие и контролируют образование локальных структур – горстов и грабенов. Характер внутриблоковых нарушений преимущественно сбросовый с амплитудами, не превышающими 100 м. Разломы меридиональной ориентировки активизировались в конце раннего протерозоя.

Вилуйско-Котуйская зона глубинных разломов северо-западного направления контролировала проявления траппового магматизма позднего палеозоя–раннего мезозоя. С разломами этого этапа связаны трапповые интрузии долеритов.

Проявления кимберлитового магматизма в Далдыно-Алакитском районе многие исследователи связывают с Далдыно-Оленекской зоной глубинных разломов северо-восточного простирания. По результатам геофизических исследований в нижнем структурном ярусе осадочного чехла выявлены разрывные нарушения девон-карбоновой активизации: Северо-Восточный, Алакитский, Байтахский и другие разломы (рис. 3). Предполагается, что все эти нарушения имеют унаследованный характер, являются отражением позднепротерозойских разломов и имеют сбросовый характер с амплитудой смещения 20–50 м. В карбонатной толще нижнего структурного яруса разломы представляют собой зоны повышенной трещиноватости и дробления, имеют сложное строение и проявлены в нескольких сейсмических горизонтах.

В южной и западной частях района широко распространены породы траппового комплекса, сложенные пластовыми интрузиями и дайками. Кимберлитовые тела располагаются в виде прерывистой северо-восточной полосы протяженностью 150 км. Они концентрируются в пределах двух полей: на северо-востоке располагается Далдынское поле, а в центральной и юго-западной частях – Алакит-Мархинское. Пространственное распределение трубок в полях подчиняется ли-

нейно-кустовой группировке. Северо-восточный тектонический контроль (принадлежность к Далдыно-Оленекской минерагенической зоне) показан на рис. 4 [15].

Алакит-Мархинское кимберлитовое поле (АМКП). Согласно существующим представлениям, АМКП расположено на пересечении Вилуйско-Котуйской зоны глубинных разломов северо-западного простирания и Далдыно-Оленекской зоны северо-восточного простирания. Анализ положения разрывных нарушений, выявленных в пределах Алакит-Мархинского поля, показал, что здесь в разной степени проявлены разнонаправленные системы нарушений [2, 6, 12]. Четко выражена система дизъюнктивных нарушений северо-восточной ориентировки. Именно эти тектонические нарушения Далдыно-Оленекской системы глубинных разломов контролируют пространственное размещение большинства кимберлитовых тел АМКП. При этом значительная их часть приурочена к узлам пересечения разнонаправленных тектонических нарушений – к участкам с наибольшей проницаемостью земной коры. Кимберлитовые тела АМКП находятся в пределах Сохсолохского грабенообразного прогиба, амплитуда которого достигает 250 м. Ось грабена ориентирована ортогонально простиранию главных региональных структур фундамента [11, 12].

Внутреннее строение Сохсолохского прогиба отличается от строения прилегающих структурных блоков широким развитием пликативных и дизъюнктивных дислокаций северо-восточного простирания. Большая часть кимберлитовых тел приурочена к северо-восточному воздыманию прогиба, располагаясь на склонах сложнопостроенных локальных депрессий – Айхальской, Байтахской, Центральной и Алакитской. Помимо главных направлений тектонических нарушений – северо-восточного и северо-западного простирания, выделяются субширотные и субмеридиональные, формирование которых связывается с Безымянным глубинным разломом, ограничивающим с севера Сохсолохский грабенообразный прогиб (см. рис. 3).

Методика исследований

Изученный профиль располагается в пределах юго-западного окончания АМКП (рис. 5). В качестве основного метода исследований применялся метод МТЗ, обработка результатов выполнена с использованием технологий V5 System – 2000 аппаратурой «MTU-5A» компании «Phoenix

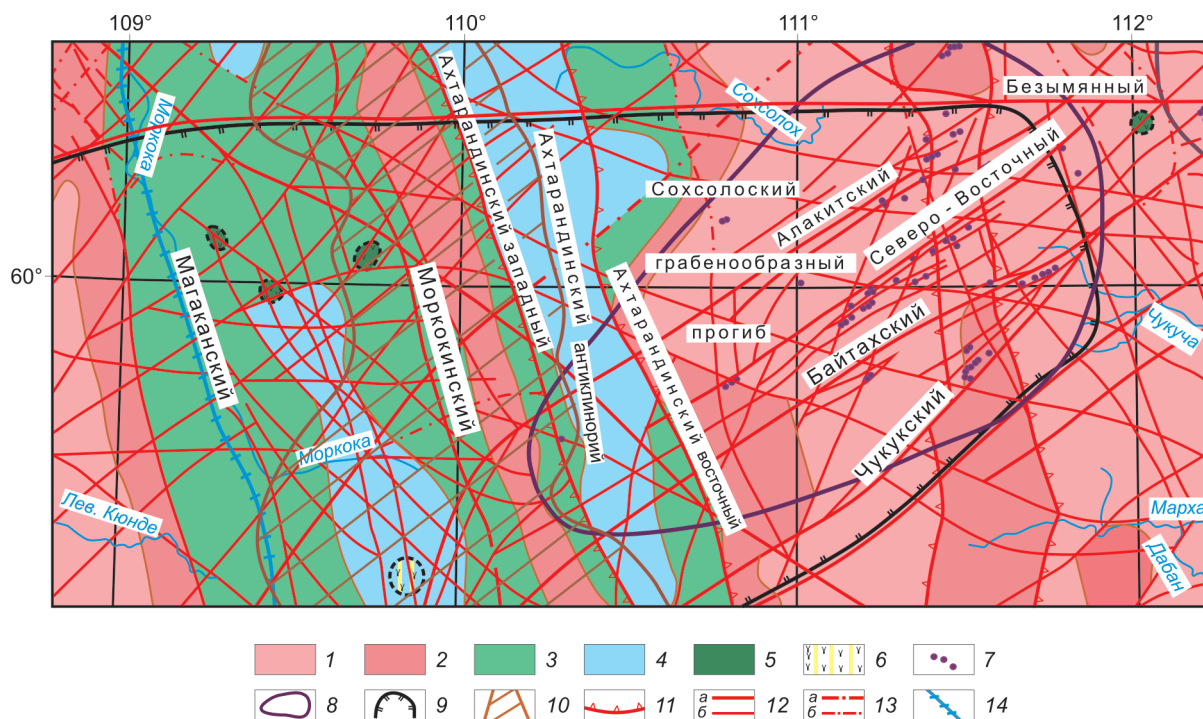


Рис. 3. Структурно-тектоническая схема Алакит-Мархинского кимберлитового поля, масштаб 1: 400 000:

Структурно-вещественные комплексы фундамента (Анабарский мегаблок, AR): 1 – преимущественно слабомагнитные и немагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов хапчанского комплекса), 2 – средне- и слабомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов верхнеанабарского и хапчанского комплексов); 3 – средне- и высокомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов верхнеанабарского комплекса); 4 – высокомагнитные разности кристаллических пород (аналоги гранулитов далдзского и верхнеанабарского комплексов); 5 – интрузивные массивы основного состава; 6 – массивы центрального типа щелочно-ультраосновного и карбонатитового составов, предполагаемые по комплексу геолого-геофизических данных; 7 – кимберлиты; 8 – Алакит-Мархинское кимберлитовое поле; 9 – рифтоподобные и рифтогенные структуры (грабены, грабенообразные прогибы); 10 – зоны тектонотермальной переработки пород архейского фундамента, заложенные в раннем протерозое; 11 – складчатые разломы фундамента, контролируемые крупными антиклинориями и синклинориями Анабарского мегаблока; 12 – секущие разломы, проявленные в фундаменте и в нижних горизонтах осадочного чехла (*a* – региональные, *b* – второстепенные); 13 – секущие разломы, трассируемые дайками долеритов (*a* – региональные, *b* – второстепенные); 14 – пограничные разломы складчато-блоковых структур первого порядка в пределах Анабарского мегаблока

Fig. 3. Structural and tectonic scheme of the Alakit-Markha kimberlite field (1:400 000 scale):

Structural and material complexes of the foundation (Anabar megablock, AR): 1 – mainly weakly magnetic and non-magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Hapchan complex), 2 – medium weakly and weakly magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Upper Anabar and Hapchan complexes); 3 – medium and high magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Upper Anabar complex); 4 – high-magnetic differences of crystalline rocks (analogues of granulites of the Daldyn and Upper Anabar complexes); 5 – intrusive massifs of the main composition; 6 – massifs of the central type of alkaline-ultrabasic and carbonatite compositions, assumed from a complex of geological and geophysical data; 7 – kimberlites; 8 – Alakite-Markhinsky kimberlite field; 9 – rift-like and riftogenic structures (Grabens, graben-like deflections); 10 – zones of tectonic-thermal processing of rocks of the Archean basement, laid in the early Proterozoic; 11 – interlaced basement faults controlling large anticlinoria's and synclinories of the Anabar megablock; 12 – secant faults manifested in the foundation and in the lower horizons of the sedimentary cover (a – regional, δ – secondary); 13 – secant faults traced by dolerite dikes (a – regional, δ – secondary); 14 – boundary faults folding-block structures of the first order within the Anabar megablock

Geophysics». Регистрация четырех компонент магнитотеллурического поля (E_x , E_y , H_x , H_y) осуществлялась с шагом 1 км в течение 14–17 часов с применением крестообразной установки с длиной приемных линий 100 м, ориентированных по шкале магнитологов с ориентацией оси X на севере, а Y на восток. Плановая и высотная при-

вязка пунктов зондирования проводилась с помощью системы GPS.

Обработка и интерпретация исходных данных состояла из следующих этапов:

1. Обработка четырехкомпонентных записей магнитотеллурического поля в программе SSMT-2000, реализующей современные алгоритмы спек-

трального анализа в режимах одиночных («local», SS) и при необходимости синхронных зондирований с удаленной базой («remote reference», RR).

2. Приведение симметричного тензора к его главным осям. При вращении тензора импеданса можно получить множество амплитудных и фазовых кривых ρ_{xy} , ρ_{yx} и φ_{xy} , φ_{yx} [3], конфигурация которых существенно зависит от их ориентации, и они могут противоречить друг другу. Поэтому после первичной обработки полевых данных на каждом пункте зондирования проводился анализ амплитудных и фазовых полярных диаграмм тензора импеданса и определялся угол α , характеризующий его главные направления. После этого вновь проводилась обработка данных с поворотом системы координат на этот угол.

3. Анализ магнитотеллурических параметров, выполненный на основе упрощенного теста М.Н. Бердичевского [3]. Анализируемые параметры – N_{mt} – параметр неоднородности [3], $Skew_S$ – параметр асимметрии [31], $Skew_B$ – фазочувствительный параметр асимметрии [29] оценивались по отношению к пороговым значениям δ , лежащим в интервале $0,05 \div 0,15$. Анализ показал, что на высоких частотах ($\sqrt{T} < 2 \text{ с}^{1/2}$) в северо-западной и юго-восточной частях профиля параметр лежит в пределах пороговых значений. В диапазоне $\sqrt{T} = 0,2 \div 10 \text{ с}^{1/2}$ они возрастают до 0,3, а на самых низких периодах ($\sqrt{T} > 10 \text{ с}^{1/2}$) до 0,5. Центральная часть профиля характеризуется сложным распределением значений параметра как по вертикали, так и по латерали. Здесь на высоких периодах ($\sqrt{T} < 1 \text{ с}^{1/2}$) отмечается чередование областей с пороговыми значениями и областей со значениями, близкими к ним (0,2), а с понижением частоты значения параметра N_{mt} постепенно увеличиваются до 0,6.

Аналогичная ситуация отмечается и на частотных разрезах параметров $Skew_S$ и $Skew_B$. В северо-западной и юго-восточной частях профиля они лежат в пределах пороговых значений на периодах $\sqrt{T} = 0,05 \div 5 \text{ с}^{1/2}$, постепенно возрастая с понижением частоты до 0,4–0,5. Повышенным значениям $Skew_S$ отвечают повышенные значения $Skew_B$. Таким образом, согласно Бару [29], глубинный региональный фон можно рассматривать как двухмерную среду. Об этом свидетельствует и форма полярных диаграмм тензора импеданса.

4. Инверсия магнитотеллурических данных. Особенность количественной интерпретации кривых МТЗ, полученных на изученном профиле,

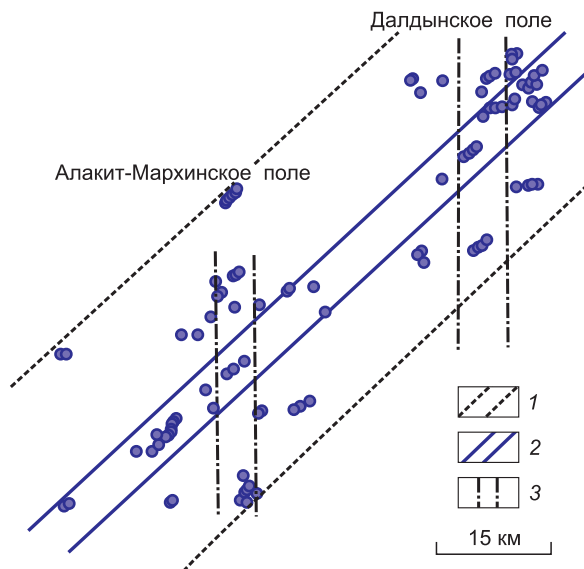


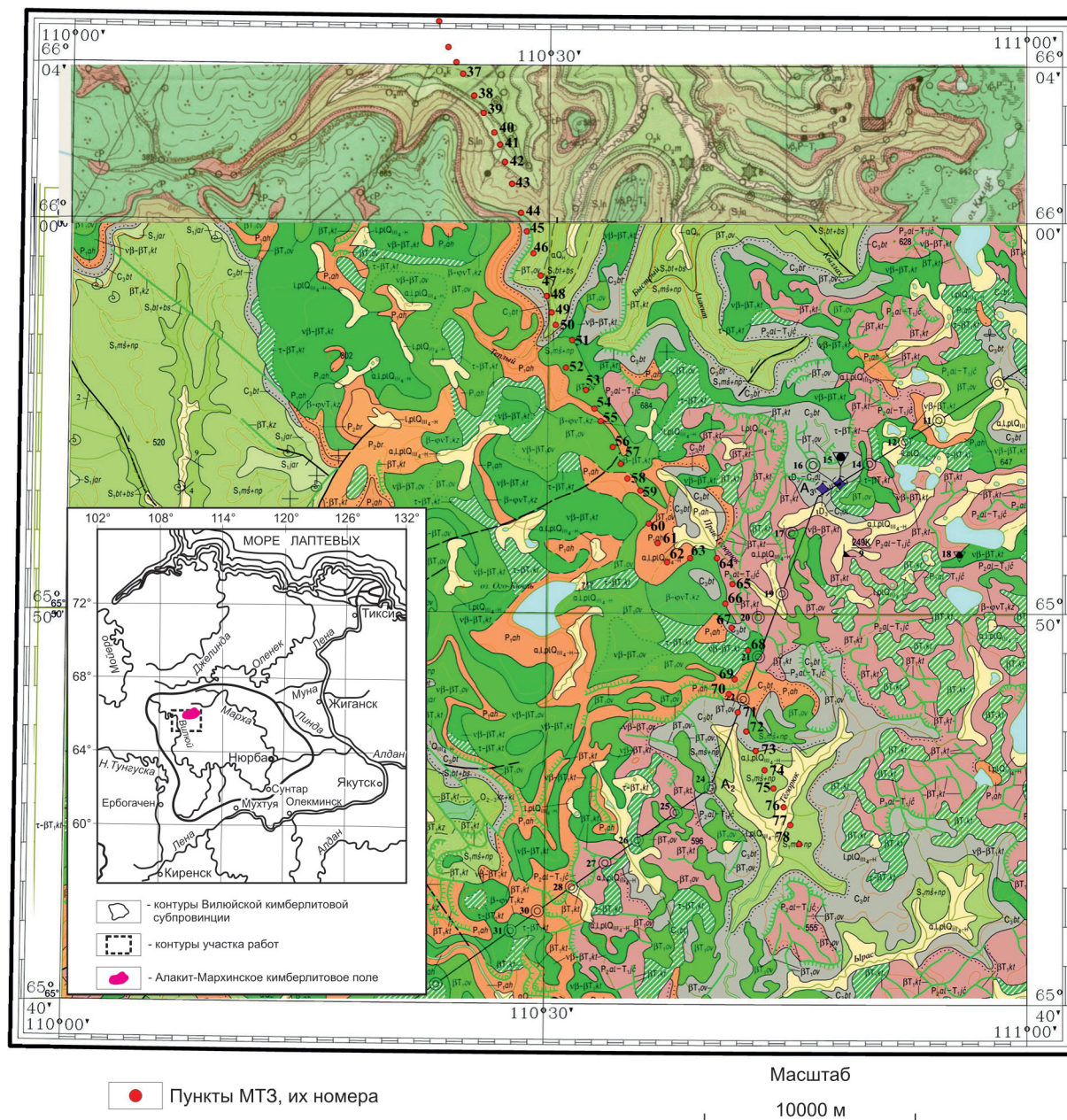
Рис. 4. Схема расположения трубок Далдынского и Алакит-Мархинского полей [15]:
1 – контуры зоны, вмещающей все трубки; 2 – центральная зона шириной 6 км; 3 – предполагаемые субмеридиональные зоны

Fig. 4. Layout of the pipes in the Daldyn and Alakit-Markha fields [15]:

1 – the contours of the zone containing all the tubes; 2 – the central zone with a width of 6 km; 3 – the proposed submeridional zones

обусловлена сложным геологическим строением Далдино-Алакитского алмазоносного района. Здесь в разрезе земной коры (включая осадочный чехол) существует несколько типов геоэлектрических структур, оказывающих влияние на кривые МТЗ. В зависимости от поляризации магнитотеллурического поля (МТ-поля) проявляются два типа искажающих эффектов – индукционные и гальванические [3]. Первые вызваны избыточными токами, индуцированными в телах с высокой электропроводностью. Вторые связаны с обтеканием электрическим током высокоомных объектов и его концентрацией в проводящих объектах. В изученном районе проявляются оба типа искажающих эффектов.

Многолетнемерзлые породы, включающие силлы траппов, часто выходящие на дневную поверхность, формируют в МТ-поле гальванические искажения – так называемый «р-эффект», который приводит к статическому сдвигу («static shift») поперечных кривых по оси сопротивления вверх. При этом продольные кривые остаются близкими к локально-нормальной. Кроме объектов, формирующих гальванические эффекты, в осадочном чехле Алакит-Мархинского поля вы-



деляется мощная проводящая неоднородность ($S > 500 \text{ См}$), прослеживающаяся на расстояние более 100 км [18], оказывающая индукционное влияние на продольные кривые МТЗ. По данным глубинных сейсмических зондирований [26], здесь отмечается аномалия пониженных скоростей до значений 6,2 км/с. Аномальная область приурочена к породам средне- и нижнекембрийских водоносных комплексов с минерализацией, достигающей значений 403 г/см^3 [1].

Эффект статического смещения исключался с помощью процедуры «нормализации» путем смещения кривых МТЗ к уровню кривых ЗСБ. Анализировалась каждая пара кривых, зарегистрированных в едином пункте зондирования (рис. 6). Различия в способе нормирования электромагнитных сигналов и характере распространения поля приводят к разнице глубинности и разрешающей способности методов МТЗ и ЗСБ, а также к различному поведению кривых.

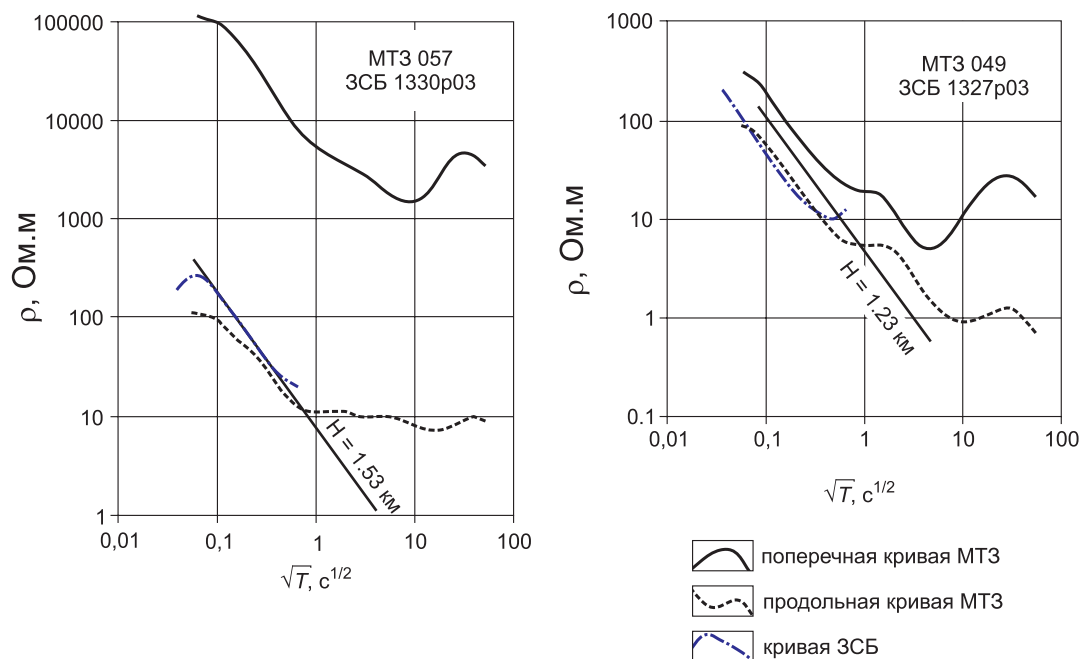


Рис. 6. Пример совмещения кривых МТЗ и ЗСБ в едином пункте зондирования

Fig. 6. Example of combining MTZ and ZSB curves in a single sensing point

Для кривых МТЗ восходящие и нисходящие асимптотические ветви симметричны относительно оси ρ , а кривые ЗСБ имеют разный наклон асимптот при $\rho_2 \rightarrow \infty$ и $\rho_2 \rightarrow 0$ [21]. Это обстоятельство приводит к тому, что при простом совмещении кривых ρ_k в системе $\rho = f(t)$ наблюдается значительное расхождение экстремумов, восходящих и нисходящих ветвей кривых МТЗ и ЗСБ. Для представления кривых МТЗ и ЗСБ в графическом виде в качестве абсцисс лучше всего использовать $\sqrt{T}$ и $\sqrt{2\pi t}$, где T и t – период гармонического поля и время наблюдения. При этом квадратный корень показывает, что изменение эффективной глубины зондирования пропорционально изменению абсцисс кривых [5].

В настоящее время существует несколько способов совмещения кривых МТЗ и ЗСБ. В данном случае совмещение проводилось нами по уровню ρ_k и параметрам S (интегральная проводимость надопорной толщи) и H (глубина залегания надопорной толщи) по методике, детально рассмотренной в литературе [19] (см. рис. 6). После проведения нормализации осуществлялась количественная интерактивная 1D и 2D инверсия.

Обсуждение результатов

По особенностям распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) геоэлектрический разрез изученного профиля разде-

ляется на три части: северо-западную (блок I, п.п. 39–56), центральную (блок II, п.п. 56–72) и юго-восточную (блок III, п.п. 72–87) (рис. 7–9), ограниченные разломами.

В структуре осадочного чехла первый и третий блоки представляют собой валообразные поднятия, а центральный – грабенообразный прогиб. Протяженность поднятий и прогиба составляет 17, 16 и 15 км соответственно.

Платформенный чехол, сложенный терригенно-карбонатными и сульфатно-галогенно-карбонатными породами венда–нижнего палеозоя и несогласно перекрывающими их вулканогенно-терригенными образованиями верхнего палеозоя–нижнего мезозоя, подразделяются на шесть геоэлектрических горизонтов:

$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4 > \rho_5 < \rho_6$ (см. рис.7).

Первый (I) геоэлектрический горизонт развит, преимущественно, в центральной части профиля (блок II) и выклинивается в северо-западном (блок I) и юго-восточном (блок III) направлениях. Горизонт приурочен к пермским отложениям алаkitской (P_{2al}), боруллойской (P_{2br}), ахтарандинской (P_{2ah}) свит и ботубинской (C_{3br}) свиты верхнего отдела каменноугольной системы. Породы представлены песчаниками, алевролитами, углисто-глинистыми сланцами, конгломератами и углями. Мощность горизонта составляет 40–100 м. На контакте со вторым геоэлектриче-

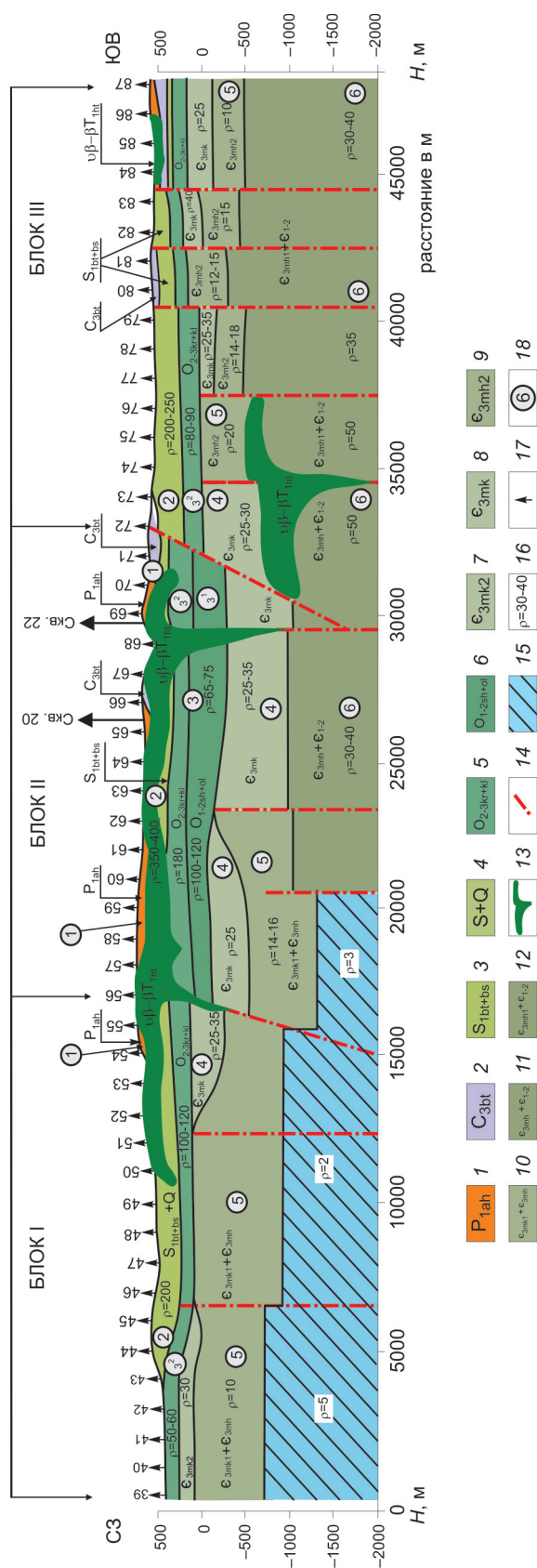


Рис. 7. Геоэлектрический разрез осадочного чехла:

1 – отложения ахтардинской свиты верхней перми; 2 – отложения ботубинской свиты верхнего карбона; 3 – объединенные отложения байтахской и башенной свит нижнего силура; 4 – отложения яральинской, машковской и неперендинской свит нижнего силура и нерасчлененные гравийно-галечные образования позднего неоплейстоцена и голоцена; 5 – объединенные отложения криволуцкой и кылахской свит среднего-верхнего ордовика; 6 – отложения сохолохской и одондинской свит нижнего-среднего ордовика; 7 – нерасчлененные отложения моркинской свиты верхнего кембрия; 8 – отложения верхней посвиты мархинской свиты верхнего кембрия; 9 – отложения верхнемархинской подсвиты верхнего кембрия; 10 – объединенные отложения нижнемаркокинской подсвиты и мархинской свиты верхнего кембрия; 11 – объединенные отложения мархинской свиты и нерасчлененные отложения нижнего-верхнего кембрия; 12 – объединенные отложения нижнемархинской подсвиты верхнего кембрия и нерасчлененные отложения среднего кембрия; 13 – пермо-триасовые долериты; 14 – разломы, предполагаемые по данным МТЗ; 15 – геоэлектрическая неоднородность с низкими значениями УЭС; 16 – значения УЭС в Ом·м; 17 – разведочные скважины; 18 – номера геоэлектрических горизонтов

Fig. 7. Geoelectric section of the sedimentary cover:

Fig. 1. Geoelectric section of the sedimentary cover.

1 – deposits of the Akhtarandin formation of the Upper Permian; 2 – deposits of the botuobin formation of the upper carboniferous; 3 – combined deposits of the baytakh and tower formations of the lower silurian; 4 – deposits of the yaralinsky, mashkov and nepperendinsky formations of the lower silurian and undifferentiated gravel-pebble formations of the late pleistocene and holocene; 5 – combined deposits of the krivolutsky and ky/lakh formations of the middle-upper ordovician; 6 – sediments of the sokhsolokhs kaya and oldondinskaya formations of the lower-middle ordovician; 7 – undifferentiated deposits of the morkokinsky formation of the upper cambrian; 8 – deposits of the upper ordovician formation of the lower-middle ordovician; 9 – deposits of the upper markhinsky sub-formation of the upper cambrian; 10 – combined deposits of the Lower Markokinsky sub-formation and the markhinsky formation of the upper cambrian; 11 – combined deposits of the markhinsky formation and undifferentiated deposits of the lower-upper cambrian; 12 – combined deposits of the lower-arkhim sub-formation of the upper cambrian and undifferentiated deposits of the lower-middle cambrian; 13 – permo-triassic dolerites; 14 – faults assumed according to MTZ data; 15 – geoelectric heterogeneity with low UES values; 16 – UES values in Ohms·m; 17 – exploration wells; 18 – numbers of geoelectric horizons

ским горизонтом пермские и каменноугольные отложения перекрыты интрузивными телами долеритов. Среднее сопротивление горизонта порядка 200 Ом·м.

Второй (II) геоэлектрический горизонт включает объединенные отложения машковской и неперендинской (S_{lms+np}) свит и объединенные отложения байтахской и башенной (S_{bt+bs}) свит нижнего силура, а также нерасчлененные гравийно-галечные образования позднего неоплейстоцена и голоцена. Породы нижнего силура представлены глинистыми и алевроитистыми известняками, доломитами, мергелями. Горизонт выдержан и по мощности, и по значениям удельного сопротивления, которые составляют 250–270 м и 210–250 Ом·м соответственно. Исключения составляют юго-восточное окончание профиля, где его мощность сокращается до 50–70 м, и северо-западное окончание (блок I, п.п. 39–43), где он полностью выклинивается (см. рис. 7).

Третий (III) геоэлектрический горизонт представлен отложениями ордовикской системы и подразделяется на два подгоризонта. В состав верхнего (III^2) подгоризонта входят объединенные отложения криволуцкой и кылахской ($O_{2-3 kr+kl}$) свит среднего–верхнего ордовика, представленные песчаниками, известняками, доломитами, прослоями алевролитов и аргиллитов. Мощность подгоризонта составляет 100–150 м. Значения УЭС уменьшаются от центральной части профиля в северо-западном и юго-восточном направлениях со 180 до 50–60 и 80–90 Ом·м соответственно. Нижний (III^1) подгоризонт приурочен к отложениям сохолохской ($O_{1-2 sh}$) свиты нижнего–среднего ордовика и олдондинской (O_{1ol}) свиты нижнего ордовика и развит только в центральной части профиля (блок II). Отложения данного горизонта представлены доломитами, известняками и мергелями. Их мощность нарастает в юго-восточном направлении с 250 (п.п. 56–62) до 400 м (п.п. 62–71). В этом же направлении уменьшаются значения УЭС со 100–120 до 65–75 Ом·м. IV, V и VI геоэлектрические горизонты приурочены к мощной толще разновозрастных кембрийских отложений (от ϵ_1 до ϵ_3) и характеризуют геоэлектрический разрез в интервале глубин 250–2000 м (см. рис. 7).

Четвертый (IV) геоэлектрический горизонт, включающий отложения моркокинской (ϵ_{3mk}) свиты верхнего кембрия, развит в центральной части профиля (блок II). Отложения этого горизонта представлены глинистыми известняками, мерге-

лями, аргиллитами, доломитами и песчаниками. Мощность его около 350 м, среднее удельное сопротивление 25–35 Ом·м. В первом блоке мощность сокращается, и верхняя подсвита (ϵ_{3mk2}) выклинивается в районе п.п. 5–52, а нижняя (ϵ_{3mk1}) входит в состав V геоэлектрического горизонта (см. рис. 7). На северо-западном окончании профиля (п.п. 39–46) мощность горизонта составляет 150–170 м и включает отложения только верхней подсвиты. В III блоке мощность IV горизонта не превышает 180 м и в районе п.п. 79–82 замещается пятым геоэлектрическим горизонтом.

Пятый (V) геоэлектрический горизонт, представленный известняками, доломитами и мергелями верхней подсвиты мархинской свиты верхнего кембрия (ϵ_{3mh2}), прослеживается только в пределах III блока (см. рис. 7). Мощность его составляет 350–400 м, среднее значение УЭС 10–15 Ом·м. В юго-восточной части центрального блока (п.п. 60–72) горизонт не прослеживается, а в северо-западной части и в I блоке в его состав входят породы нижней подсвиты моркокинской свиты (ϵ_{3mk1}) и мархинская свита (ϵ_{3mh}). Отложения представлены преимущественно глинистыми известняками и глинистыми доломитами. Для V геоэлектрического горизонта характерны самые низкие значения УЭС (10–15 Ом·м), обусловленные приуроченностью карбонатных разностей моркокинской и мархинской свит к повсеместно развитому верхнекембрийскому водоносному комплексу (ϵ_3). Состав подземных вод комплекса хлоридный магниевый-кальциевый и кальциевый-магниевый с минерализацией, достигающей 252 г/дм³ [1].

Шестой (VI) геоэлектрический горизонт прослеживается в юго-восточной части II блока (п.п. 60–72) и в III блоке (см. рис. 7). В состав горизонта входят отложения нижней подсвиты мархинской свиты (ϵ_{3mh1}) и нерасчлененные отложения нижнего–среднего кембрия (ϵ_{1-2}), представленные глинистыми доломитами, известняками и мергелями. Мощность горизонта увеличивается в юго-восточном направлении с 1000 до 1500 м. Значения УЭС варьируют от 30 до 50 Ом·м.

В пределах первого блока в этом интервале глубин выделяется мощная проводящая неоднородность с сопротивлением 2–5 Ом·м и латеральной протяженностью около 20 км (см. рис. 7). По данным гидрогеохимических исследований [1], частое переслаивание и интенсивная трещиноватость участков плотных известняков обусловили наличие нижнекембрийского (ϵ_1) водонос-

ного комплекса с подмерзлотными высокоминерализованными коллекторами, гидравлически связанными друг с другом. Состав рассолов комплекса хлоридный кальциевый, минерализация около 400 г/дм³.

Рассолоносные комплексы не содержат выдержанных пластов каменной соли, а сложены преимущественно гипсоносными карбонатными породами и интрузиями траппов, интенсивная тектоническая переработка которых обуславливает существование единой гидродинамической системы взаимосвязанных зон дробления, способных свободно дренировать рассолы во вмещающих породах [1]. Эти зоны формируют в магнитотеллурическом поле региональные высокопроводящие электрические аномалии.

По данным проведенных исследований, в осадочном чехле изученного профиля выделена серия дизъюнктивных нарушений, образующих систему структурных блоков (см. рис. 7). К настоящему времени установлено, что значительная часть кимберлитовых тел Алакит-Мархинского кимберлитового поля в пределах рудовмещающих разломов приурочена к структурным узлам, представляющим собой участки пересечения (сочленения) нескольких разноориентированных тектонических нарушений, имеющих максимальную проницаемость земной коры [6, 12, 14, 19, 20]. Кимберлитоконтролирующие разломы отражают на дневной поверхности унаследованные глубинные разломы первого порядка, которые в осадочном чехле разветвляются в разрывные нарушения второго и третьего порядков и затем постепенно переходят в зоны повышенной трещиноватости и дробления [13, 17, 24].

В результате региональных и среднемасштабных исследований методом МТЗ на Сибирской платформе установлено, что наряду с ореолами ИМК, гравимагнитными минимумами и повышенной сейсмической гетерогенностью земной коры дополнительным критерием прогнозирования кимберлитовых полей служит наличие проводящих субвертикальных неоднородностей на фоне высокоомного разреза консолидированной земной коры. АМКП располагается в пределах сложнопостроенной геоэлектрической неоднородности с глубиной залегания около 6 км и шириной более 55 км [4].

Данная неоднородность пространственно сопряжена с узлом пересечения Далдыно-Оленекской и Вилуйско-Котуйской зон глубинных раз-

ломов и представляет собой сочетание относительно высокоомных и проводящих блоков со значениями удельного сопротивления 50–100 и 5–20 Ом·м соответственно. К последним приурочены известные кимберлитовые тела Алакит-Мархинского поля, включая алмазные месторождения (рис. 8).

В пределах изученного профиля подобная проводящая зона выделяется в центральной части второго блока (п.п. 061–069) на фоне высокоомного разреза земной коры. Глубина залегания верхней кромки выделенной зоны составляет около 6 км, удельное сопротивление варьирует в пределах 6–10 Ом·м. Эта неоднородность накладывается на другую – более высокого порядка с явно выраженным наклоном ее боковых границ (рис. 9).

В верхней части разреза неоднородность соответствует зоне сочленения выделенных I и II блоков. Согласно предыдущим результатам исследований большинства геологов [11, 12], именно подобные структуры наиболее благоприятны для проявления кимберлитового магматизма. Аналогичные геолого-структурные предпосылки установлены на участках развития кимберлитовых тел, выявленных в последние годы геологами в АМКП [12, 13]. По нашему мнению, эти геофизические признаки, подкрепленные и усиленные геолого-тектоническими, петрологическими и минералого-геохимическими предпосылками [25, 30], хорошо зарекомендовавшими себя при выявлении кимберлитовых тел в хорошо изученных районах [27], могут рассматриваться в качестве дополнительных критериев прогнозирования новых кимберлитовых объектов в районах со сложной геологической обстановкой.

Выводы

1. Особенности УЭС в пределах АМКП позволяют выделить в геоэлектрическом разрезе изученного профиля три крупных структурных блока, ограниченных зонами тектонических нарушений: северо-западный (блок I), центральный (блок II) и юго-восточный (блок III).

2. В структуре осадочного чехла I и III блоки представляют собой валлообразные поднятия, а центральный – грабенообразный прогиб. Протяженность поднятий и прогиба составляет, соответственно, 17, 16 и 15 км. В пределах второго блока отмечены триасовые долеритовые интрузии мощностью от 150 до 450 м и латеральной протяженностью до 20 км.

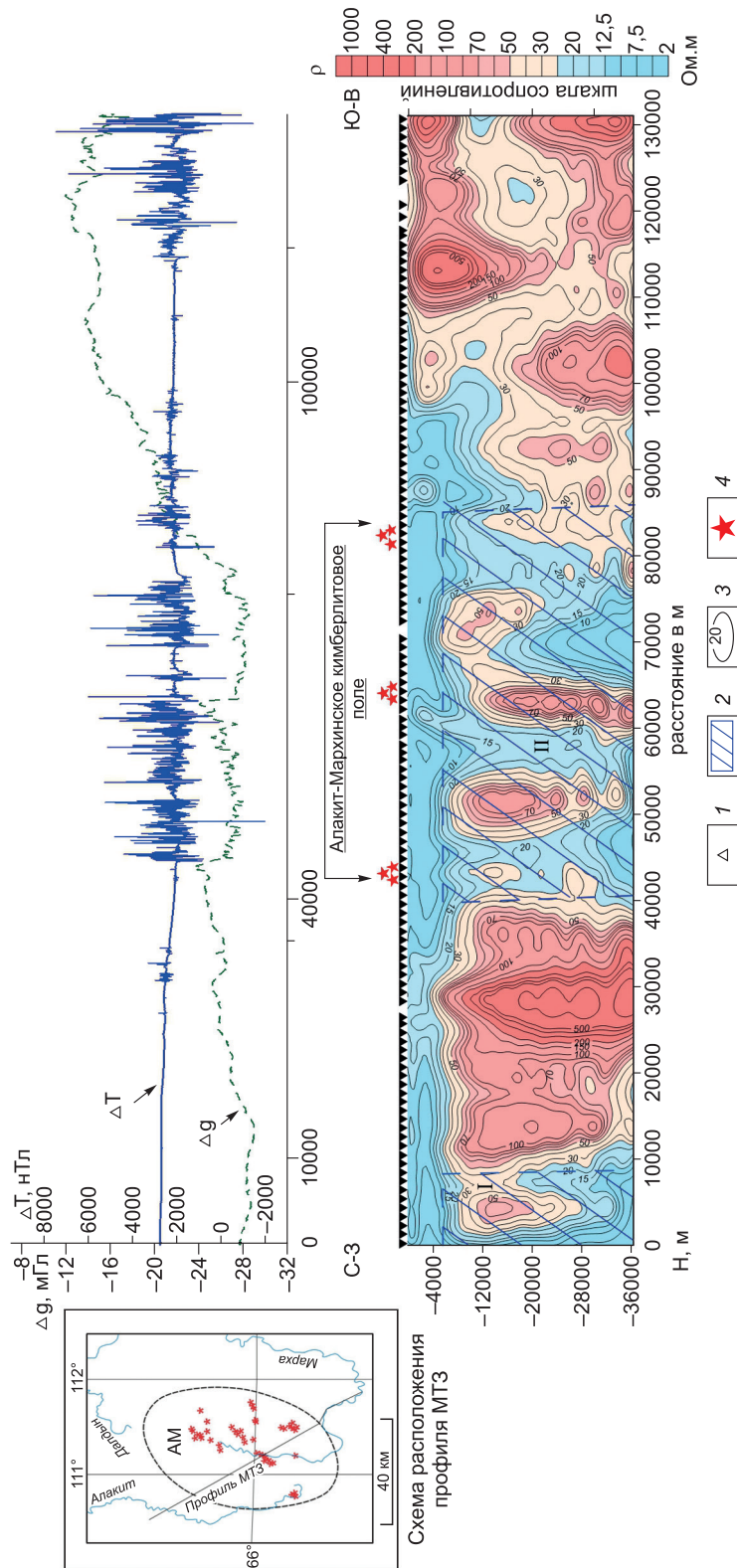


Рис. 8. Глубинный геоэлектрический разрез через Алакит-Мархинское кимберлитовое поле:
1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – контуры проводящих неоднородностей; 3 – изолинии УЭС в Ом·м; 4 – кимберлитовые трубки

Fig. 8. Deep geoelectric section through the Alakit-Markha kimberlite field:
1 – magnetotelluric sounding points; 2 – contours of conducting inhomogeneities; 3 – UES isolines in ohms m; 4 – kimberlite tubes

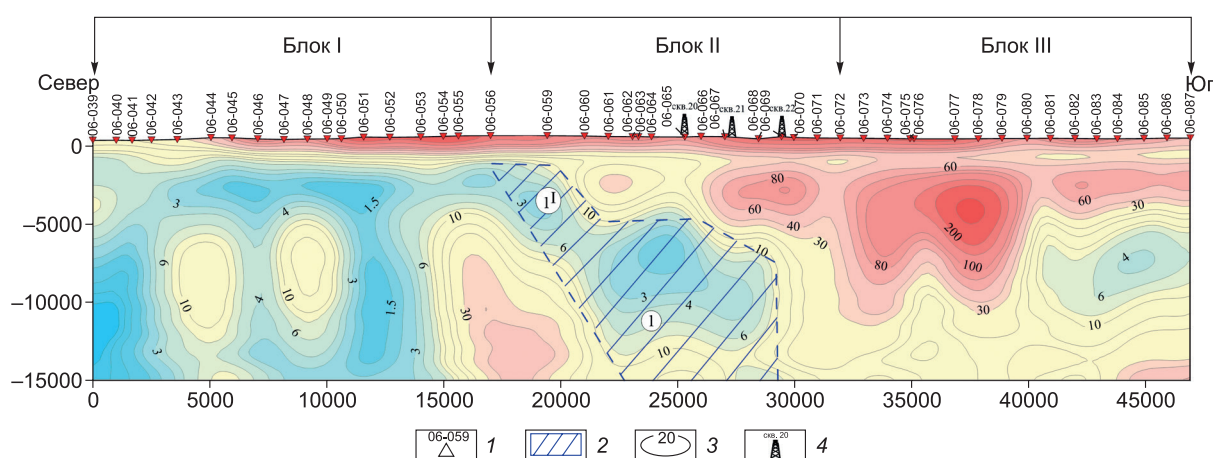


Рис. 9. Глубинный геоэлектрический разрез юго-западной части Алаakit-Мархинского кимберлитового поля:

1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – проводящая неоднородность; 3 – изолинии УЭС в Ом · м; 4 – скважины разведочного бурения

Fig. 9. Deep geoelectric section of the southwestern part of the Alakite-Markhinsky kimberlite field:

1 – magnetotelluric sounding points; 2 – conducting heterogeneity; 3 – UES isolines in Ohms m; 4 – exploration drilling wells

3. В осадочном чехле АМКП выделяется серия структурных блоков – участков, ограниченных разноориентированными тектоническими нарушениями, выделяющихся в геоэлектрическом разрезе по максимальной проницаемости земной коры.

4. Геоэлектрический разрез консолидированной коры I и III структурных блоков характеризуется преобладанием абсолютно низких значений УЭС, обусловленных экранирующим влиянием проводящей аномальной зоны, приуроченной к отложениям верхнего кембрия.

5. В центральной части II структурного блока на фоне высокоомного разреза земной коры отчетливо выделяется проводящая неоднородность со значениями УЭС 6–10 Ом · м и глубиной залегания верхней кромки 6 км, накладывающаяся на неоднородность более высокого порядка с явно выраженным наклоном боковых границ. В верхней части разреза она соответствует зоне сочленения первого и второго структурных блоков.

6. По совокупности геолого-геофизических и геохимических данных следует уверенно констатировать, что центральная часть изученного профиля (блок II) является наиболее перспективной для прогнозирования новых алмазоносных объектов разряда отдельных кимберлитовых тел.

Список литературы / References

1. Алексеев С.В., Алексеева Л.П. Литиеносные россыли Далдыно-Алаkitского района (Западная Якутия). *География и природные ресурсы*. 2008;(2):103–109.

Alekseev S.V., Alekseeva L.P. Lithium-bearing brines of the Daldino-Alakitskiy district (Western Yakutia). *Geography and natural resources*. 2008;(2):103–109. (In Russ.)

2. Арсеньев А.А. Трещинная тектоника и алмазность восточной части Сибирской платформы. В кн.: Рожков И.С. (ред.). *Геология алмазных месторождений. Серия геологическая*. М.: Акад. наук СССР; 1963:39–44.

Arseniyev A.A. Fractured tectonics and diamond bearing of the eastern part of the Siberian platform. In: Rozhkov I.S. (ed.) *Geology of diamond deposits. Geological series*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1963:39–44. (In Russ.)

3. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Модели и методы магнитотеллурики*. М.: Научный мир; 2009. 679 с. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I. *Models and methods of magnetotellurics*. Moscow: Nauchnyi mir; 2009. (In Russ.)

4. Бессмертный С.Ф., Поспеева Е.В., Овчинникова О.И. Изучение особенностей строения консолидированной коры Далдыно-Алаkitского района по данным региональной сейсморазведки МОВ-ОГТ и электроразведки МТЗ. В кн.: *Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: Материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» г. Мирный, 18–20 марта 2008 г.* Якутск: Издательство ЯНЦ СО РАН; 2008. С. 55–62.

Bessmertny S.F., Pospeyeva E.V., Ovchinnikova O.I. Studying specific features of Daldyn-Alakit diamondiferous region consolidated crust structure according to regional seismics data by CMP method and electrical prospecting by MT sounding. In: *Problems of forecasting and prospecting of diamond deposits on closed territories: Proceedings of the conference dedicated to the 40th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA, Mirny*,

March 18–20, 2008. Yakutsk: YaSC SB RAS Publishing House; 2008, pp. 55–62. (In Russ.)

5. Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир; 1997. 218 с.

Van'yan L.L. *Electromagnetic sensing*. Moscow: Nauchnyi mir; 1977. 218 p. (In Russ.)

6. Гапотченко П.И., Морозова Н.Е. Разломы и кимберлитовый магматизм Далдыно-Алакитского кимберлитового района. В кн.: *Геология минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, г. Якутск, 05–07 апреля 2017 года. Том II*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. С. 432–439.

Gapotchenko P.I., Morozova N.E. Faults and kimberlite magmatism of the Daldyn-Alakit kimberlite region. In: *Geology mineral resources of the Northeast of Russia: Proceedings of the 7th All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 60th anniversary of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, April 05–07, 2017, V. 2*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2017, pp. 432–439. (In Russ.)

7. Горев Н.И. Тектонические исследования при прогнозировании коренных источников алмазов. В кн.: Зинчук Н.Н. (ред.). *Геология алмазов – настоящее и будущее: Геологи к 50-летию юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России*. Воронеж: Воронежский государственный университет; 2005. С. 1175–1202.

Gorev N.I. Tectonic studies in predicting the primary sources of diamonds. In: Zinchuk N.N. (ed.). *Geology of diamonds – present and future: Geologists on the 50th anniversary of Mirny and diamond mining industry in Russia*. Voronezh: Voronezh State University; 2005, pp. 1175–1202. (In Russ.)

8. Зинчук Н.Н. Постмагматические минералы кимберлитов. М.: Недра; 2000. 537 с.

Zinchuk N.N. *Postmagmatic minerals of kimberlites*. Moscow: Nedra; 2000. 538 p. (In Russ.)

9. Зинчук Н.Н. О контроле кимберлитового магматизма рифтогенными структурами. *Руды и металлы*. 2015;(4):51–66.

Zinchuk N.N. About control of kimberlite magmatism by rift-related structures. *Ores and Metals*. 2015;(4):51–66. (In Russ.)

10. Зинчук Н.Н., Бондаренко А.Т., Гарат М.Н. *Петрофизика кимберлитов и вмещающих пород*. М.: Недра; 2002. 694 с.

Zinchuk N.N., Bondarenko A.T., Garat M.N. *Petrophysics of kimberlites and their country rocks*. Moscow: Nedra; 2002. 694 p. (In Russ.)

11. Иванов Д.В., Салихов Р.Ф., Толстов А.В. и др. Особенности поисков кимберлитов в пределах Алакит-Мархинского поля. В кн.: *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Материалы VII Всероссийской научно-практической конфе-*

ренции, посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, г. Якутск, 05–07 апреля 2017 года. Том I. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. С. 266–271.

Ivanov D.V., Salikhov R.F., Tolstov A.V., et al. Features of kimberlite prospecting within the Alakit-Markha field. In: *Geology and mineral resources of the Northeast of Russia: Proceedings of the 7th All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, April 05–07, 2017, V. 1*. Yakutsk: NEFU Publishing House; 2017, pp. 266–271. (In Russ.)

12. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Структурно-тектонические критерии поисков кимберлитовых тел в Алакит-Мархинском поле. *Руды и металлы*. 2019;(2):55–60. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>

Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. Structural and tectonic criteria for searching for kimberlite bodies in the Alakit-Markha field. *Ores and metals*. 2019;(2):55–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2019-10014>

13. Иванов Д.В., Толстов А.В., Иванов В.В. Роль пликативных структур как прогнозных критериев на алмазоносные кимберлиты в Алакит-Мархинском поле. *Руды и металлы*. 2021;(3):6–13. <https://rm.tsnigri.ru/index.php/main/article/view/145>

Ivanov D.V., Tolstov A.V., Ivanov V.V. The role of plicative structures as forecast criteria for diamond-bearing kimberlites in the Alakit-Markhinsky field. *Ores and metals*. 2021;(3):6–13. (In Russ.). <https://rm.tsnigri.ru/index.php/main/article/view/145>

14. Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедин П.А. Связь кимберлитовых полей с трансоровыми и корово-мантийными структурами, отображаемыми в аномалиях сейсмических моделей гетерогенных систем. *Технологии сейсморазведки*. 2008;(1):80–90.

Karaev N.A., Biezais Ya.Ya., Lebedkin P.A. Relationship of kimberlite fields with transcrustal and crust-mantle structures displayed in anomalies of seismic models of heterogeneous systems. *Seismic technologies*. 2008;(1):80–90. (In Russ.)

15. Костровицкий С.И., Яковлев Д.А., Алымова Н.В. Кимберлитовый вулканизм Якутской провинции – тектонический контроль, мантийные источники. В кн.: Гордеев Е.И. (ред.). *Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии, г. Петропавловск-Камчатский, 22–27 сентября 2009 г.* Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 2009. С. 381–384.

Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Alyмова N.V. Kimberlite volcanism of the Yakut province – tectonic control, mantle sources. In: Gordeev E.I. (ed.). *Proceedings of the 4th All-Russian symposium on volcanology and paleovolcanology, Petropavlovsk-Kamchatsky, September 22–27, 2009*. Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of

- the Russian Academy of Sciences; 2009, pp. 381–384. (In Russ.).
16. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Тектонические критерии выделения таксонов кимберлитового магматизма Архангельской алмазоносной провинции. В кн.: *Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минералогия Северо-Запада России: Материалы Всероссийской конференции, г. Петрозаводск, 12–15 ноября 2007 г.* Петрозаводск: Институт геологии Карельского Научного центра РАН; 2007. С. 226–230.
- Kutinov Yu.G., Chistova Z.B. Tectonic criteria for the allocation of taxa of kimberlite magmatism of the Arkhangelsk diamond-bearing province. In: *Geodynamics, magmatism, sedimentogenesis and mineralogy of the North-West of Russia: Proceedings of the All-Russian conference, Petrozavodsk, November 12–15, 2007*. Petrozavodsk: Institute of Geology of the Karelian Research Center RAS; 2007, pp. 226–230. (In Russ.).
17. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2016;(3):86–94.
- Maltsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2016;(3):86–94. (In Russ.).
18. Манаков А.В., Романов Н.Н., Полторацкая О.Л. *Кимберлитовые поля Якутии*. Воронеж: Воронежский госуниверситет; 2000. 82 с.
- Manakov A.V., Romanov N.N., Poltoratskaya O.L. *Kimberlite fields in Yakutia*. Voronezh: Voronezh State University, 2000. P. 82. (In Russ.).
19. Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В., Санчаа А.М. Интерпретация данных комплексных электромагнитных методов в сейсмоактивных районах (на примере Чуйской впадины Горного Алтая). *Физика Земли*. 2011;(11):63–75.
- Nevedrova N.N., Pospeeva E.V., Sancha A.M. Interpretation of the data of complex electromagnetic methods in seismically active areas (on the example of the Chui depression of the Altai Mountains). *Physics of the Earth*. 2011;(11):63–75. (In Russ.).
20. Подчасов В.М., Минорин В.Е., Богатых И.Я. и др. *Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Кн. 1. Коренные месторождения*. Якутск: Издательство СО РАН; 2004. С. 548.
- Podchasov V.M., Minorin V.E., Bogath I.Y., et al. *Geology, forecasting, methods of prospecting, evaluation and exploration of primary diamond deposits. Book 1. Primary deposits*. Yakutsk: SB RAS Publishing House; 2004. P. 548. (In Russ.).
21. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А. и др. *Современная практическая электроразведка*. Новосибирск: Академическое издание «Гео»; 2018. 231 с. <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>
- Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., et al. *Modern applied electroprospecting*. Novosibirsk: “Geo”; 2018. P. 231. (In Russ.). <https://doi.org/10.21782/B978-5-9909584-1-8>
22. Поспеева Е.В. *Электромагнитные исследования Якутской алмазоносной провинции: Автореф. дис. ... канд. геол. минерал. наук*. Иркутск; 1990. 20 с.
- Pospeeva E.V. *Electromagnetic studies of the Yakut diamond-bearing province: Abstr. ... Diss. Cand. Sci.*, Irkutsk; 1990. 20 p. (in Russ.).
23. Поспеева Е.В., Поспеев В.И. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазоносной провинции. В кн.: Михалевский В.И. (ред.). *Обеспечение научно-технического прогресса геофизических исследований в Восточной Сибири*. Иркутск; Новосибирск: СНИИГГИМС; 1987. С. 107–116.
- Pospeeva E.V., Pospeev V.I. Results of deep magnetotelluric studies in the Yakut diamond-bearing province. In: Mikhalevsky V.I. (ed.). *Ensuring scientific and technological progress of geophysical research in Eastern Siberia*. Irkutsk; Novosibirsk: SNIIGGIMS; 1987, pp. 107–116. (In Russ.).
24. Проценко Е.В., Толстов А.В., Горев Н.И. Критерии поисков кимберлитов и новые перспективы коренной алмазоносности Якутии. *Руды и металлы*. 2018;(4):14–28. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10009>
- Protsenko E.V., Tolstov A.V., Gorev N.I. Kimberlite prospecting criteria and new prospects for Yakutia primary diamond potential. *Ores and metals*. 2018;(4):14–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2018-10009>
25. Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А. и др. Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в северо-восточной части Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2018;59(10):1365–1379. <https://doi.org/10.15372/GiG20181012>
- Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., et al. Prospects of search for diamondiferous kimberlites in the northeastern Siberian platform. *Geology and geophysics*. 2018;59(10):1365–1379. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20181012>
26. Суворов В.Д., Мельник Е.А., Манаков А.В. Глубинное строение Далдыно-Алакитского кимберлитового района по данным ГСЗ и гравитационного моделирования (Западная Якутия). *Физика Земли*. 2005; (5):35–47.
- Suvorov V.D., Melnik E.A., Manakov A.V. Structure of the Daldin-Alakit kimberlite area (Western Yakutia) from DSS data and gravity modeling results. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2005;(5):35–47. (In Russ.).
27. Толстов А.В., Разумов А.Н., Минин В.А. и др. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской кимберлитовой провинции. *Геология и геофизика*. 2009;50(3):227–240.
- Tolstov A.V., Razumov A.N., Minin V.A., et al. A new body of highly diamond-bearing kimberlites in the Nakyn field of the Yakut kimberlite province. *Geology and geophysics*. 2009;50(3):227–240. (In Russ.).

28. Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. *Коренные месторождения алмазов мира*. М.: Недра; 1998. 555 с.

Harkiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I. *The primary diamond deposits in the world*. Moscow: Nedra, 1998. P. 555. (In Russ).

29. Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *Journal of Geophysics*. 1988;62(1):119–127.

30. 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;45(12):1197–1209. <https://doi.org/10.1134/S0016702907120026>

31. Swift C.M. *A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States*. Ph.D. Dissertation, MIT. Cambridge 1967. 211 p.

Об авторах

ПОСПЕЕВА Елена Валентиновна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>, SPIN: 9960-1010, e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN:7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

About the authors

POSPEEVA, Elena Valentinovna, Dr. Sci (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5714-5652>, SPIN: 9960-1010, e-mail: pospeevaev@ipgg.sbras.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilevich, Dr. Sci (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN:7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 17.06.2023

Поступила после рецензирования / Revised 11.12.2023

Принята к публикации / Accepted 24.01.2024

УДК 551.24+552.57+553+553.078+553.98(571.56)
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-38-47>

Оригинальная статья

Возраст кимберлитовой трубки Обнаженная (северо-восток Сибирской платформы)

В. С. Гриненко^{✉1}, М. Г. Ощепкова¹, О. С. Дзюба², Б. Н. Шурыгин²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация;

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

✉grinenkovs52@mail.ru

Аннотация

Обсуждается возрастной диапазон формирования кимберлитовой трубки Обнаженная (Куойкское поле, северо-восток Сибирской платформы) в свете недавней уникальной находки представителя тоар-раннеааленских (конец ранней–начало средней юры) белемнитов и результатов ревизии ранее известных белемнитов верхне-юрского–нижнемелового возраста. На изученной территории выполнены исследования специфики и общего генезиса фаций в сложной по набору пород вертикальной структуре разрезов. Дана оценка роли древнекиммерийской, данлапской и новокиммерийской фаз киммерийской тектоно-магматической активизации в становлении Куойкского и Хорбусуонского кимберлитовых полей. Рассмотрена новая модель эруптивной системы кимберлитовых полей мезозойского возраста. Откорректированы существующие палеогеографические схемы тоар-раннеабатского интервала северо-востока Сибирской платформы. Исследуемое местонахождение является важным свидетельством масштабности исчезновения следов морских ингрессий в геологической летописи.

Ключевые слова: Сибирская платформа, киммерийская эпоха тектоно-магматической активизации, триасовый и юрский периоды, кимберлиты, белемниты

Финансирование. Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН (проекты № 2024-0005; № 2024-0007) и ИНГГ СО РАН (проект № 2022-0004).

Для цитирования: Гриненко В.С., Ощепкова М.Г., Дзюба О.С., Шурыгин Б.Н. Возраст кимберлитовой трубки Обнаженная (северо-восток Сибирской платформы). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024; 29(1):38–47. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-38-47>

Original article

Age of the Obnazhennaya kimberlite pipe (northeastern Siberian platform)

Vitaliy S. Grinenko^{✉1}, Mariya G. Oshchepkova¹,
Oksana S. Dzyuba², Boris N. Shurygin²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation,

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

✉grinenkovs52@mail.ru

Abstract

In this article, we discuss the age range for the formation of the Obnazhennaya kimberlite pipe (Kuoyka field, northeastern Siberian platform) considering the recent unique discovery of a representative of the Toarcian-Early Aalenian

(end of the Early–beginning of the Middle Jurassic) belemnites along with the revision of previously known belemnites of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous age. We investigated the specifics and general genesis of the facies in the complex vertical structure of the sections. In addition, we assessed the role of the ancient Kimmerian, Dunlap, and New Cimmerian phases of Cimmerian tectono-magmatic activation in the stabilization of the Kuoika and Khorbusuon kimberlite fields. Moreover, a new model of the eruptive system of Mesozoic kimberlite fields was considered. The existing paleogeographic schemes of the Toarcian–Early Bathonian interval northeast of the Siberian Platform have been corrected. The study location provides important evidence of the disappearance scale of marine ingression traces in the geological record.

Keywords: Siberian Platform, Cimmerian epoch of tectono-magmatic activation, Triassic, Jurassic, kimberlites, belemnites

Funding. This study was conducted within the state assignment for the DMPGI SB RAS (projects No. 2024-0005; No. 2024-0007) and for the IPGG SB RAS (project No. 2022-0004).

For citation: Grinenko V.S., Oshchepkova M.G., Dzyuba O.S., Shurygin B.N. Age of the Obnazhennaya kimberlite pipe (northeastern Siberian platform). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):38–47. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-38-47>

Введение

Формирование среднемезозойской части (с рэтского по волжский ярусы) верхоянского терригенного комплекса Восточно-Сибирского борельного осадочного палеобассейна происходило в три стадии – раннюю, промежуточную и позднюю (зрелую), рубежи которых совпадают с фазами глобальной активизации тектонических движений – древнекиммерийской, данлапской и новокиммерийской [1]. Известно также, что на поздний триас–юру пришлось финальные эпизоды кимберлитового магматизма на Сибирском кратоне, а наиболее молодые магматические образования представлены куойкским (или куойкско-молодинским) и хорбусуонским кимберлитовыми комплексами [2, 3]. В связи с этим особый интерес представляет оценка роли отдельных фаз тектоно-магматической активизации в становлении Куойкского и Хорбусуонского кимберлитовых полей.

Объектом исследований являются как стратифицированные морские осадочные, так и нестратифицированные магматические образования, сформированные в течение позднего триаса–юры на территории западной периферии Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающих к ней основных краевых отрицательных структур древней Сибирской платформы. Цель исследования – разработка новой модели эруптивной системы в Куойкском и Хорбусуонском кимберлитовых полях. Реализация этой цели в контексте с анализом палеогеографических реконструкций исследуемой территории позволит оптимизировать поиски экзогенных алмазоносных россыпей в осадочных отложениях, продуктивные горизонты которых приурочены к определенным стратиграфическим уровням и фациальным обстановкам.

Материал и методологические подходы к исследованию

Материалом для построения новой модели формирования трубки Обнаженная, а также модели эруптивной фидерной системы в Куойкском и Хорбусуонском кимберлитовых полях на северо-востоке Сибирской платформы послужили данные, изложенные в территориальных фондовых материалах ГУП «Сахагеоинформ» и подготовленные к открытой печати по Куойкскому и Хорбусуонскому ареалам магматизма. К палеогеографическим реконструкциям авторами привлечены палеонтологические данные по юре Северо-Востока Азии, включая недавно описанную новую уникальную находку белемнита из кимберлитов трубки Обнаженная и ревизованные представления о прежних определениях белемнитов в том же местонахождении [4].

Для определения этапов формирования кимберлитов трубки Обнаженная использовались имеющиеся в литературе геологические свидетельства процессов тектоно-магматической активизации на западной периферии Верхояно-Колымской орогенной области и на прилегающих территориях Сибирской платформы, общие сведения об эволюции Восточно-Сибирского осадочного палеобассейна, а также многочисленные геохронологические датировки в соизмерении с палеонтологическими данными. Принимается, что остатки белемнитов оказались в кимберлитовой трубке при внедрении магмы в слабо литифицированный, существенно обводненный осадок [4, 5], т. е. относительно вскоре после захоронения остатков белемнитов в осадке морского палеобассейна и формирования тафоценоза (в период существования установленных таксонов либо в мас-

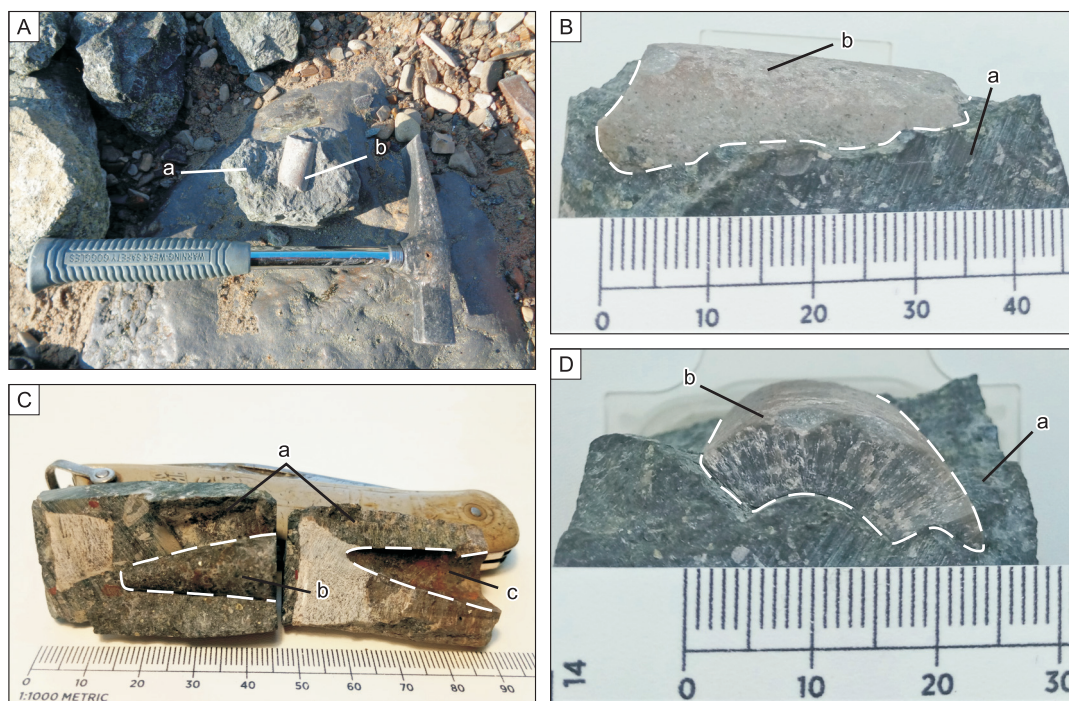


Рис. 1. Остатки тоар-раннеааленского белемнита, описанного как *Arcobelus cf. krimholzi* (Sachs, 1970) [4], в кимберлите трубки Обнаженная.

A, B, D: а – кимберлит, b – фрагмент ростра белемнита; C: а – продольные расколы фрагмента ростра белемнита, b – кимберлитовая порода, заполняющая альвеолу ростра белемнита, c – альвеола.

На диапазон существования белемнитов рода *Arcobelus* приходится этап кимберлитового магматизма в $177 \pm 1,5$ млн лет на северо-востоке Сибирского кратона [4]

Fig. 1. Remains of the Toarcian-Early Aalenian belemnite, described as *Arcobelus cf. krimholzi* (Sachs, 1970) [4], in kimberlite of the Obnazhennaya pipe.

A, B, D: a – kimberlite, b – belemnite rostrum fragment; C: a – longitudinal splits of the belemnite rostrum fragment, b – kimberlite rock filling the alveolus of the belemnite rostrum, c – alveolus.

The stage of kimberlite magmatism of 177 ± 1.5 Ma in the northeastern part of the Siberian craton falls on the time of the existence of belemnites of the genus *Arcobelus* [4]

штабах геологического времени несущественно позже), когда ростры могли легко отделяться от вмещающей породы (осадка) и при этом, благодаря наличию воды, не подвергнуться полному уничтожению. Возможность их попадания в кимберлитовый расплав в более поздний период мы исключаем, поскольку все известные находки белемнитов (фрагменты роствров) происходят не из ксенолитов, а установлены непосредственно в кимберлитовой породе [4–7] (рис. 1).

К изученности трубок взрыва Куойкского и Хорбусуонского кимберлитовых полей и находкам белемнитов из трубки Обнаженная

Трубка Обнаженная вскрывается в береговом обрыве (высота обнажения до 15 м) на р. Куойка (левый приток р. Оленек), в 3,5 км выше устья.

Относится к Куойкскому кимберлитовому полю, территориально обозначена в одноименном ареале магматизма Якутской алмазоносной провинции и тектонически сопряжена с древним Оленекским поднятием кристаллического фундамента (северо-восток Сибирской платформы) [2]. Из территориальных фондовых литературных источников следует, что для Куойкского и близрасположенного Молодинского кимберлитового поля характерными являются кимберлитовые трубки взрыва, сложенные базальтоидными, слюдяными кимберлитовыми брекчиями массивными и автолитовыми; среди них изредка наблюдаются пикриты монтичеллитовые [2]. В отдельных кимберлитовых телах установлена убогая алмазоносность. Для Хорбусуонского кимберлитового поля (возраст 170–160 млн лет, Rb-Sr метод) характерными являются трубки взрыва, штоко-

образные тела, кимберлитовые брекчии массивные и автолитовые с пиропами и хромшпинелидами, редко с пикроильменитами [2].

В трубке Обнаженная Куойкского кимберлитового поля установлены как коровые ксенолиты, так и ксенолиты из более глубоких горизонтов литосферы. Однако алмазность в этой трубке пока не подтверждена. Согласно имеющимся обобщениям [2, 4], кимберлиты трубки Обнаженная имеют различные возрастные датировки – от 161 млн лет (Rb-Sr метод) и 167 млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод) до 185 ± 10 – 418 ± 14 млн лет (K-Ar метод), по палеомагнитным данным – либо 151 ± 14 млн лет, либо 168 ± 11 млн лет (в зависимости от способа пересчета данных).

Известность среди исследователей, занимающихся минерагенией алмазов на северо-востоке Сибирской платформы, трубка Обнаженная завоевала еще и тем, что непосредственно в кимберлитах были найдены белемниты семейства *Cylindroteuthididae*, как предполагалось, позднеюрского–раннемелового возраста [5–8]. Этот очень важный геологический факт до недавнего времени находился в противоречии с имеющимися геохронологическими датировками [2]. Недавно в кимберлитах этой трубки впервые был обнаружен фрагмент ростра белемнита тоар–раннеааленского рода *Arcobelus* из семейства *Megateuthididae* – *Arcobelus* cf. *krumholzi* (Sachs, 1970), а также показано, что найденные здесь ранее представители цилиндротеутидид могут иметь позднебайосский–раннебатский возраст, учитывая ревизованное определение (*Pachyteuthis* cf. *optima* Sachs et Nal'njaeva, 1966) единственного относительно хорошо сохранившегося ростра [4]. Тем самым существенно уточнились представления о возрастном диапазоне белемнитов, встречающихся в кимберлитах трубки Обнаженная, – с позднеюрского–раннемелового на конец ранней–часть средней юры. В связи с этим было предложено откорректировать существующие палеогеографические схемы тоар–раннебатского интервала северо-востока Сибирской платформы, распространив на этих схемах внутреннюю часть шельфа на территорию Куойкского кимберлитового поля. В той же работе отмечено [4], что на диапазон существования белемнитов рода *Arcobelus* (тоар–ранний аален) приходится этап кимберлитового магматизма в $177 \pm 1,5$ млн лет (поздний тоар) на северо-востоке Сибирского кратона, ранее установленный по данным U–Pb-геохронологии [9], а на позднебайосский–раннебатский диапазон су-

ществования вида *Pachyteuthis optima* – $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датировка (167 млн лет) [10] и одна из палеомагнитных датировок (168 ± 11 млн лет) по трубке Обнаженная [11] (ранний бат).

Обсуждение модели становления Куойкского и Хорбусуонского кимберлитовых полей

Ранее установлено, что эволюция Восточно-Сибирского бореального осадочного палеобассейна тесно связана с древнекиммерийской, данлапской и новокиммерийской фазами тектономагматической активизации, что нашло отражение в палеогеографических реконструкциях по трем стадиям – ранней (поздний рэт–плинсбах), промежуточной (тоар–ранний бат) и поздней, или зрелой (поздний бат–волжский век) [1, 12]. Настоящая работа развивает и дополняет эти исследования. Актуализированные палеогеографические схемы не противоречат существующим данным, изложенным в материалах по изученной территории палеобассейна, охватывающего западную периферию Верхояно-Колымской орогенной области и прилегающие территории востока Сибирской платформы [2, 13, 14 и др.].

Тектонические процессы и нередко напрямую с ними связанные трансгрессивно-регрессивные события относятся к числу важнейших факторов, определявших расселение бореальной поздне триасовой–юрской биоты в различных биомических зонах палеобассейна наряду с климатическим и эвстатическим факторами, а также изменениями в системе течений, солёности вод, аноксидными событиями и пр. [15, 16 и др.]. В позднем триасе–юре выделяется ряд существенно различающихся стадий перестройки режимов седиментации и развития биоты бореальных палеобассейнов, которые фиксируются по реликтам биотических и абиотических событий. Перестройки часто приурочены к границам ярусов и имеют отчетливо выраженную периодичность. Позднетриасово–раннеюрская стадия совпадает с тектоно-седиментационным циклом и отчетливо прослеживается в планетарном масштабе [1, 17–19].

Ранняя стадия эволюции Восточно-Сибирского осадочного палеобассейна (см. рис. 2, врезка А'), сопряженная с древнекиммерийской (Km) фазой тектоно-магматической активизации, характеризуется широким распространением терригенных обломочных и песчано-глинистых отложений, включающих многочисленные остатки разно-

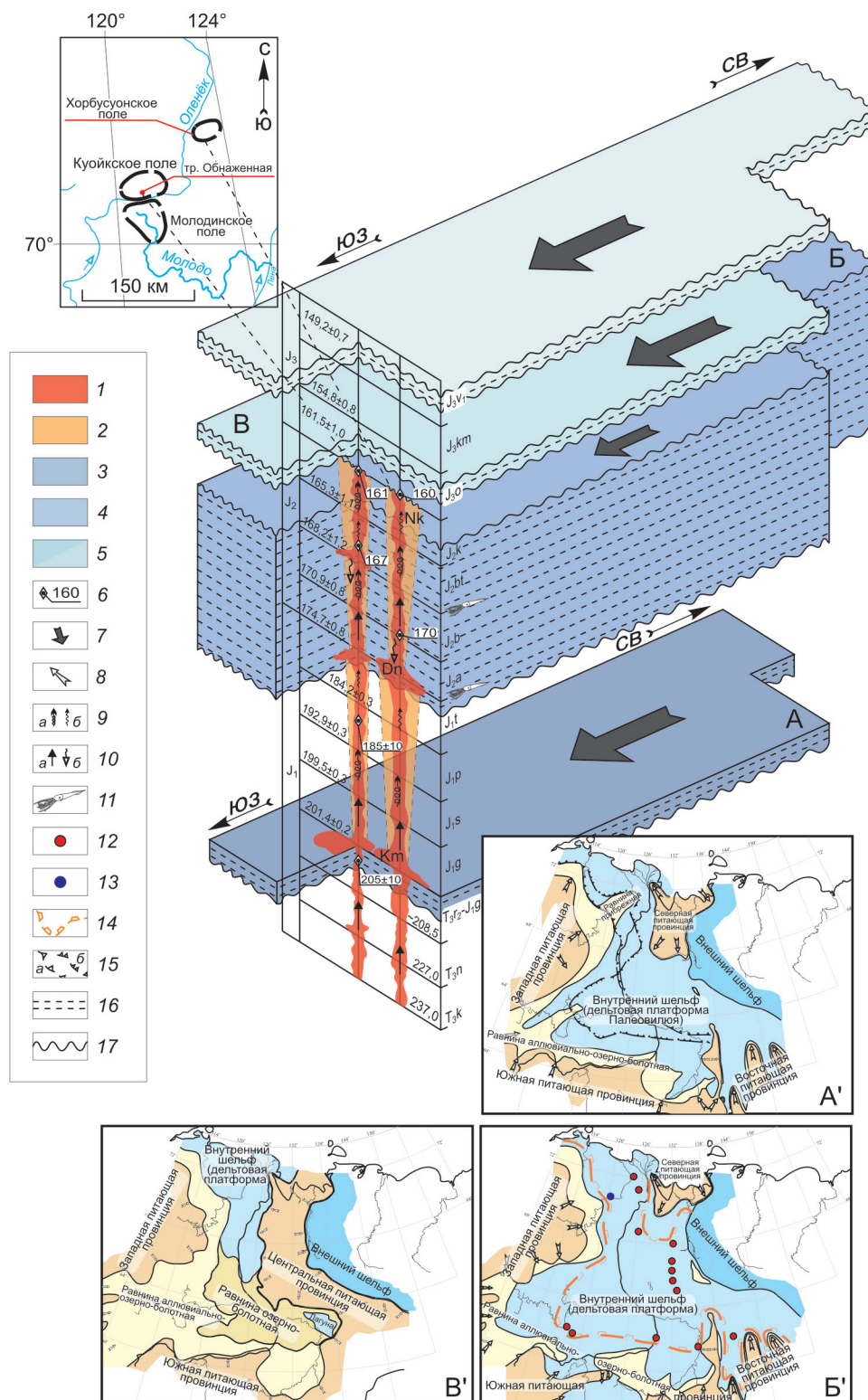


Рис. 2. Модель эруптивной фидерной системы в Куойкском и Хорбусуонском кимберлитовых полях и местонахождение трубки Обнаженная (Оленекское поднятие, северо-восток Сибирской платформы).

1 – эруптивный трещинный канал проводимости; 2 – эруптивный трещинный канал обрушения; 3–5 – киммерийская бассейновая тектоника (на модели (А–В) и площадных врезках (А'–В')): 3 – А – перерыв в осадконакоплении в позднем нории–раннем рэте, трансгрессия в позднем рэте–геттанге и синхронная этим процессам древнекиммерийская (Km) фаза тектоно-магматической активизации, выраженная формированием позднетриасовой эруптивной системы и экзогенного

продуктивного рэтского алмазоносного уровня [2, 12, 14]; 4 – Б – перерыв в осадконакоплении в раннем тоаре, нередко вплоть до раннего аалена, трансгрессия в позднем тоаре и синхронная этим процессам данлапская (Dn) фаза тектоно-магматической активизации, выраженная формированием в рэте–раннем тоаре эруптивной системы и экзогенного продуктивного тоарского–бат-келловейского алмазоносного уровня [2, 12, 14]; 5 – В – перерыв в осадконакоплении в ранневолжское время, последующая трансгрессия и синхронная этим процессам новокиммерийская (Nk) фаза тектоно-магматической активизации, выраженная формированием экзогенного продуктивного поздневолжского алмазоносного уровня [2, 12, 14]; 6 – геохронологические датировки (млн лет); 7 – положение в пространстве уровней трансгрессий; 8 – основные направления транзита обломочного материала в пределах абриса питающих провинций; 9 – глубинный энергосток (*a* – интенсивное движение газов к поверхности вдоль эруптивной системы канала проводимости, синхронные процессы глубинной ремобилизации и регенерации; *b* – заполнение эруптивного канала трубки в процессе сквозного телескопирования сопутствующих флюидов к поверхности, захват флюидами ксенолитов, транспортировка их по эруптивному каналу к поверхности); 10 – массоперенос: (*a* – изменение PT условий, проявление нового этапа тектоно-магматической активизации; резкое динамическое воздействие на эруптивную трещинную систему теплового, газового, гидро- и минерализованного потоков с одновременной транспортировкой к поверхности ранее сформированной излившейся на поверхности «шапки» вулканического покрова – продуктов расплава эффузивной деятельности; *b* – ксенолиты – продукты обрушения в пределах основного эруптивного трещинного канала системы и его стенок в виде щебнистых, остроугольных обломков, разноразмерные валуны и глыбы); 11 – приблизительные уровни находок белемнитов; 12 – местонахождения выходов глинистых толщ сунтарской свиты с фауной тоарского (китербуятский горизонт)–ааленского (лайдинский горизонт) ярусов; 13 – местонахождение белемнитов в кимберлитах трубки Обнаженная; 14 – контур ареала белемнитов в тоар-среднеюрском палеобассейне; 15 – изопахиты обстановок осадконакопления, сформированные (*a* – в индско-норийское время; *b* – в рэтское время); 16 – песчано-глинистые или аргиллит-алевролитовые отложения; 17 – стратиграфический перерыв

Fig. 2. A model of the eruptive feeder system in the Kuoika and Khorbusuonka kimberlite fields and the location of the Obnazhennaya pipe (Olenek uplift, northeastern Siberian Platform).

1 – eruptive fractured conduction channel; 2 – eruptive fractured collapse channel; 3–5 – Cimmerian basin tectonics (on the model and areal insets): 3 – A – break in sedimentation in the Late Norian–Early Rhaetian, transgression in the Late Rhaetian–Hettangian and synchronous with these processes, the Early Cimmerian (Km) phase of tectono-magmatic activation, expressed by the formation of the Late Triassic feeder system and the exogenous productive Rhaetian diamond-bearing level [2, 12, 14]; 4 – Б – break in sedimentation in the Early Toarcian, often up to the Early Aalenian, transgression in the Late Toarcian and synchronous with these processes, the Dunlap (Dn) phase of tectonic-magmatic activation, expressed by the formation in the Rhaetian–Early Toarcian of an eruptive system and exogenous productive Toarcian–Bathonian–Callovian diamond-bearing level [2, 12, 14]; 5 – В – break in sedimentation in the Early Volgian, subsequent transgression and synchronous with these processes, the New Cimmerian (Nk) phase of tectono-magmatic activation, expressed by the formation of an exogenous productive Late Volgian diamond-bearing level [2, 12, 14]; 6 – geochronological dating (million years); 7 – position in space of transgression levels; 8 – main directions of clastic material transit within the outline of the feeding provinces; 9 – deep energy flow: *a* – intense movement of gases to the surface along the eruptive system of the conduction channel, synchronous processes of deep remobilization and regeneration; *b* – filling of the tube eruptive channel in the process of through-telescoping of accompanying fluids to the surface, capture of xenoliths by fluids, their transportation along the eruptive channel to the surface; 10 – mass transfer: *a* – change of PT conditions, manifestation of a new stage of tectono-magmatic activation; sharp dynamic impact on the eruptive fracture system of thermal-, gas-, hydro- and mineralized flows with simultaneous transport to the surface of the previously formed eruptive volcanic cover “cap” – melt products of effusive activity; *b* – xenoliths – collapse products within the main eruptive fracture channel of the system and its walls in the form of rubble, sharp-angled debris, different-sized boulders and blocks; 11 – approximate levels of belemnites records; 12 – locations of outcrops of clayey strata of the Sutar Formation with the fauna of the Toarcian (Kiterbyut Horizon) – Aalenian (Layda Horizon) stages; 13 – location of belemnites in the kimberlites of Obnazhennaya pipe; 14 – contour of the belemnite areal in the Toarcian-Middle Jurassic paleobasin; 15 – isopachytes of sedimentation settings formed: *a* – in the Induan–Norian; *b* – in the Rhaetian; 16 – arenaceous-argillaceous or mudstone-siltstone deposits; 17 – stratigraphic gaps

образных групп фоссилей [1, 20]. Вследствие мощной трансгрессии, резко сменившей в позднем триасе–ранней юре предшествующий относительно вялый режим озерно-болотной седиментации, сформировался рэтский экзогенный алмазоносный уровень в осадочном чехле над Куойкским, Молодинским и Хорбусуонским полями (см. рис. 2, А). Этот уровень позволяет коррелировать в пространстве указанные кимберлитовые поля. Примечательно, что одна из имеющихся по кимберлитовой трубке Обнаженная К–Ar-датировок (205 ± 10 млн лет [2]) приходится на рэтский век.

Данлапская (Dn) фаза тектоно-магматической активизации Восточно-Сибирского осадочного палеобассейна характеризуется новым импульсом кимберлитового магматизма (см. рис. 2, Б). Очередное внедрение магмы и ее транспортировка по эруптивной системе рассматриваемых кимберлитовых полей фиксируется между 185 ± 10 млн лет (трубка Обнаженная) и 170 ± 0 млн лет (данные по Хорбусуонскому кимберлитовому полю) [2]. В пределах изученной территории палеобассейна обозначен тоарский уровень мощной трансгрессии, который маркирует новую ниже-среднеюрскую осадочную

призму, а также раннюю (позднеоарскую), ювенильную фазу формирования тоарского–бат-келловейского экзогенного алмазоносного уровня. Этот поисковый экзогенный уровень широкого возрастного диапазона отмечает становление Куойкского, Молодинского и Хорбусуонского кимберлитовых полей. Тоар-ааленская его часть широко прослеживается в изученном палеобассейне по обнажениям глинистых толщ сунтарской и сходных с ней по составу свит, в которых найдены макрофоссилии тоарского (китербютский горизонт)–ааленского (надояхский горизонт) ярусов (см. рис. 2, врезка Б') [21]. В ориктоценозах многочисленны и ростры белемнитов [2], обычно встречающиеся в аргиллито-глинистых и песчано-глинистых отложениях, формирование которых связывается с внутренним шельфом дельтовой платформы морского палеобассейна (см. рис. 2, врезка Б'). Уникальная находка ростра белемнита тоар-раннеааленского возраста непосредственно в кимберлите [4] может быть свидетельством специфического этапа кимберлитового вулканизма, совпавшего по времени с распространением на крайнюю северо-западную часть палеобассейна мощной трансгрессии. С учетом новых представлений о систематическом положении и стратиграфическом распространении других ростров белемнитов из кимберлитов трубки Обнаженная [4], ранее считавшихся позднеюрско-раннемеловыми [5–8], на этапе завершения Данлапской фазы может быть реконструирован еще один эпизод активизации кимберлитового вулканизма – предположительно раннебатский (см. рис. 2, Б).

Новокиммерийская (Nk) фаза тектоно-магматической активизации Восточно-Сибирского осадочного палеобассейна связана с новым импульсом кимберлитового магматизма, который имеет близкие геохронологические датировки по кимберлитам Куойкского (трубка Обнаженная) и Хорбусуонского полей – 161 и 160 млн лет соответственно [2] (см. рис. 2, В).

С позднебатского времени на изученной территории Восточно-Сибирского осадочного бассейна усиливается тектоническая активность, заметно увеличивается площадь материковой суши и обособляется ряд питающих провинций (в виде расчлененной суши), происходит расширение площади распространения наземных ландшафтов и усиление их дифференциации (см. рис. 2, врезка В'). В этой связи на большей части территории ранее существовавшего прибрежно-

морского бассейна устанавливается режим доминирования аллювиальных и озерно-болотных равнин. По данным глубокого бурения, терригенный разрез на востоке платформы представлен осадочными призмами морских, прибрежно-морских, лагунных и континентальных осадков. В западной складчатой периферии, в пределах внутреннего шельфа, естественные разрезы представлены морскими, прибрежно-морскими и лагунными фациями. В ранне-средневожское время на некоторых площадях Вилюйской синеклизы, а также на временном отрезке, отвечающем границе континентальных верхнеюрской бергеинской и нижнемеловой батылыхской свит в Лено-Вилюйском междуречье, проявляются очаги излияний андезитовых лав, покровы дацитовых лав и литовитрокластических туфов (сургуевский комплекс дацитовый) (150,8–145,5 млн лет) [22]. Эти геологические события, следы которых установлены также на территории Лено-Алданского междуречья [22], указывают, что повсеместно вдоль западной периферии Восточно-Сибирского осадочного палеобассейна установился континентальный режим осадконакопления. Лишь на крайнем северо-востоке платформы, в Лено-Анабарском прогибе, в это же время морской режим еще сохраняется, и регрессия палеобассейна намечается лишь с начала готерива.

Нет оснований утверждать, что новокиммерийская фаза тектоно-магматической активизации не завершила свое развитие в средневожское время на Оленекском поднятии и в пределах Атырканского порога в низовьях р. Лена. На палеогеографических схемах порог реконструирован в северном торцовом замыкании Предверхооянского краевого прогиба с Лено-Анабарским прогибом [1, 23]. Судя по геолого-геофизическим данным, этот порог, скорее всего, маркирует на глубине своим поперечным выступом погребенную кровлю свода крупного Нижнеленского плутона, подчеркивая при этом завершение новокиммерийской фазы тектоно-магматической активизации и в целом мощную инверсию фундамента на обширной территории Ленской ветви Предверхооянского прогиба. Как следствие, в региональных геофизических полях (Δg и ΔT_a) и по промысловым геолого-геофизическим материалам скважин глубокого бурения на нефть и газ (в том числе гидрогеологического и колонкового бурения) в изученном интервале мы наблюдаем формирование погребенных площадных сводовых поднятий кристаллического фундамен-

та (Мунского, Джарджанского), а также линейной морфологии поднятий в виде валообразных выступов, выдвинутых в осадочный чехол в виде относительно мощных (500–1000 м) пологих кристаллических «пластин-козырьков» (Ундюлюнский, Нижнесинский [24]).

Заключение

Полученные результаты раскрывают весьма интересный аспект геологических исследований, связанный с вопросами глубинного строения и обстановок осадконакопления в Восточно-Сибирском бореальном осадочном палеобассейне, что важно при рассмотрении локального прогноза как эндогенной, так и экзогенной минерализации, проявившейся на северо-востоке Сибирской платформы в обрамлении Оленекского поднятия.

Палеонтологическое сопровождение выполненных исследований позволило существенно изменить сложившиеся представления о таксономической принадлежности и датировках остатков макрофауны, обнаруженных в кимберлите, и дает серьезное основание для проведения ревизии палеогеографических реконструкций в пределах востока Сибирской платформы и ее складчатого обрамления на тоар-среднеюрское время. Соответственно корректируются представления о возрастных диапазонах этапов становления кимберлитовой трубки Обнаженная. В ходе общения палеонтологических и стратиграфических данных, а также геологических и геолого-геофизических материалов по Оленекскому поднятию разработана новая модель формирования эруптивной системы в Куойкском и Хорбусуонском кимберлитовых полях.

Список литературы / References

1. Гриненко В.С., Князев В.Г., Девятков В.П. Палеогеография позднего триаса и юры востока Сибирской платформы и складчатого обрамления. *Вестник Госкомгеологии*. 2012;11(1):63–79.

Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P. Paleogeography of the Late Triassic and Jurassic of the eastern Siberian Platform and folded framing. *Vestnik Goskomgeologii*. 2012;11(1):63–79. (In Russ.)

2. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилуйская. Лист R-51–Джарджан. Объяснительная записка. Авторы-составители Л.И. Сметанникова, В.С. Гриненко и др. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ; 2013. 397 с.

State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd generation). Anabar-Vilyui series. R-51–Jarjan. Explanatory note. Authors-compilers: L.I. Sme-

tannikova, V.S. Grinenko, et al. St. Petersburg: Kartfabrika, Russian Geological Research Institute; 2013. 397 p. (In Russ.)

3. Sun J., Liu C.-Z., Tappe S., et al. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U–Pb and Sr–Nd perovskite isotope analysis. *Earth Planetary Science Letter*. 2014;404:283–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>

4. Дзюба О.С., Гриненко В.С., Ощепкова М.Г., Шурыгин Б.Н. Первая находка тоар-нижнеалейского белемнита в кимберлитах трубки Обнаженная (северо-восток Сибирской платформы). *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2023;513(2):231–236. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601394>

Dzyuba O.S., Grinenko V.S., Oshchepkova M.G., Shurygin B.N. The First Record of a Representative of the Toarcian–Early Aalenian Belemnites in Kimberlites of the Obnazhennaya Pipe (Northeastern Siberian Platform). *Doklady Earth Sciences*. 2023;513:1344–1348. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23601876>

5. Мальков В.А., Густомесов В.А. Юрская фауна в кимберлитах Оленекского поднятия и возраст кимберлитового вулканизма на северо-востоке Сибирской платформы. *Доклады АН СССР*. 1976;229(2):435–438.

Mal'kov V.A., Gustomesov V.A. Jurassic fauna in kimberlites of the Olenek Uplift and the age of kimberlite volcanism in the northeast Siberian platform. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1976;229(2):435–438. (In Russ.)

6. Милашев В.А., Шульгина Н.И. Новые данные о возрасте кимберлитов Сибирской платформы. *Доклады АН СССР*. 1959;126(6):1320–1322.

Milashhev V.A., Shul'gina N.I. New data on the age of kimberlites of the Siberian Platform. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. 1959;126(6):1320–1322. (In Russ.)

7. Мальков В.А. Белемниты и экологиты в кимберлитах трубки Обнаженной на Оленекском поднятии (Якутия). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2008;126(6):12–14.

Mal'kov V.A. Belemnites and eclogites in kimberlites of the Obnazhennaya pipe on the Olenek Uplift (Yakutia). *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the RAS*. 2008;(6):12–14. (In Russ.)

8. Сакс В.Н., Нальняева Т.И. Верхнеюрские и нижнемеловые белемниты севера СССР. Роды *Pachyteuthis* и *Acroteuthis*. М.: Наука; 1966. 260 с.

Saks V.N., Nal'nyaeva T.I. Upper Jurassic and Lower Cretaceous belemnites of the Northern USSR. The genera *Pachyteuthis* and *Acroteuthis*. Moscow: Nauka; 1966. 260 p.

9. Мальковец В.Г., Шацкий В.С., Дак А.И. и др. Свидетельства многоэтапности и полихронности щелочно-ультраосновного мезозойского магматизма в районе алмазоносных россыпей бассейна реки Эбелях (восточный склон Анабарского щита). *Доклады РАН. Науки о земле*. 2021;496(1):49–54.

- Malkovets V.G., Shatsky V.S., Dak A.I., et al. Evidence for Multistage and Polychronous Alkaline–Ultrabasic Mesozoic Magmatism in the Area of Diamondiferous Placers of the Ebelyakh River Basin (Eastern Slope of the Anabar Shield). *Doklady Earth Sciences*. 2021;496(1):49–54.
10. Соловьева Л.В., Калашникова Т.В., Костровицкий С.И. и др. Флогопитовые и флогопит-амфиболовые парагенезисы в литосферной мантии Биректинского террейна Сибирского кратона. *Доклады РАН. Науки о земле*. 2017;475(3):310–315.
- Solov'eva L.V., Kalashnikova T.V., Kostrovitsky S.I., et al. Phlogopite and phlogopite–amphibole parageneses in the lithospheric mantle of the Birekte terrane (Siberian craton). *Doklady Earth Sciences*. 2017;475:822–827. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17070273>
11. Blanco D., Kravchinsky V.A., Konstantinov K.M., Kabin K. Paleomagnetic dating of Phanerozoic kimberlites in Siberia. *Journal of Applied Geophysics*. 2013;88: 139–153. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.002>
12. Гриненко В.С. История формирования верхнетриасовых-юрских отложений Восточно-Сибирского осадочного бассейна (восток Сибирской платформы и складчатое обрамление): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Иркутск. 2010. 19 с.
- Grinenko V.S. *History of the formation of Upper Triassic–Jurassic sediments of the East Siberian sedimentary basin (East Siberian platform and folded framing): Abstr. ... Diss. Cand. Sci. Irkutsk*. 2010. 19 p. (In Russ.)
13. Шурыгин Б.Н., Девятков В.П., Захаров В.А. и др. Стратиграфия юры Восточной Сибири (состояние изучения, основные проблемы и способы их решения). *Вестник Госкомгеологии. Материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия)*. 2001;(1):112–129.
- Shurygin B.N., Devyatov V.P., Zakharov V.A. et al. Stratigraphy of the Jurassic of Eastern Siberia (state of study, main questions and methods of their solution). *Vestnik Goskomgeologii: Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia)*. 2001;(1):112–129. (In Russ.)
14. Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Гриненко В.С. и др. О кимберлитовом магматизме юго-восточного фланга Вилюйской синеклизы. *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2020;490(2):1–5.
- Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P., Grinenko V.S., et al. Kimberlitic Magmatism in the South-Western Flank of the Vilui Basin. *Doklady Earth Sciences*. 2020;490:51–54. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20020038>
15. Басов В.А., Веренинова Т.А., Захаров В.А. и др. *Палеогеография севера СССР в юрском периоде*. Отв. ред. К.В. Боголепов. Новосибирск: Наука; 1983. 190 с.
- Basov V.A., Vereninova T.A., Zakharov V.A., et al. *Paleogeography of the northern USSR in the Jurassic period*. Ed. K.V. Bogolepov. Novosibirsk: Nauka; 1983. 190 p. (In Russ.)
16. Захаров В.А., Бейзель А.Л., Богомолов Ю.И. и др. Этапность и периодичность в эволюции морских экосистем бореального мезозоя. М.: *Экосистемные перестройки и эволюция биосферы*. 1994. С. 138–151
- Zakharov V.A., Beisel A.L., Bogomolov Yu.I., et al. Stages and periodicity in the evolution of marine ecosystems of the Boreal Mesozoic. Moscow: *Ecosystem restructuring and evolution of the biosphere*. 1994; pp. 138–151. (In Russ.)
17. Казаков А.М., Константинов А.Г., Курушин Н.И. и др. *Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Триасовая система*. Новосибирск: Гео; 2002. 322 с.
- Kazakov A.M., Konstantinov A.G., Kurushin N.I., et al. *Stratigraphy of oil and gas basins of Siberia. Triassic system*. Novosibirsk: Geo; 2002. 322 p. (In Russ.)
18. Гриненко В.С., Князев В.Г., Девятков В.П. и др. Этапы формирования и палеогеография лаптевского подкомплекса Восточно-Сибирского осадочного бассейна (поздний триас–юра). *Вестник Госкомгеологии. Материалы по геологии и полезным ископаемым Республики Саха (Якутия)*. 2011;1(10):63–70.
- Grinenko V.S., Knyazev V.G., Devyatov V.P., et al. Stages of formation and paleogeography of the Laptev subcomplex of the East Siberian sedimentary basin (Late Triassic–Jurassic). *Vestnik Goskomgeologii: Materials on geology and minerals of the Republic of Sakha (Yakutia)*. 2011;1(10):63–70. (In Russ.)
19. Гриненко В.С., Баранов В.В., Блэджетт Р.Б., Горячева А.А. Палеогеография, палеобиогеография, геодинамика палеобассейнов Земли в позднем триасе и стратиграфия терминального триаса Бореальной надобласти. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(1):5–17. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-5-17>
- Grinenko V.S., Baranov V.V., Blodgett R.B., Goryacheva A.A. Paleogeography, paleobiogeography, geodynamics of the Earth's paleobasins in the Late Triassic and stratigraphy of the Terminal Triassic of the Boreal superregion. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1):5–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-5-17>
20. Девятков В.П., Трущелев А.М., Гриненко В.С. Стратиграфия триасовых отложений Верхоянской фациальной области (Центральная Якутия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2012;2(10): 24–37.
- Devyatov V.P., Trushchelev A.M., Grinenko V.S. Stratigraphy of Triassic deposits of Verkhoyansk facies region (Central Yakutia). *Geology and mineral resources of Siberia*. 2012;2(10):24–37. (In Russ.)
21. Слостенов Ю.Л., Гриненко В.С., Петров В.Б., Сапьяник В.В. Новые данные по стратиграфии морских юрских отложений Лено-Алданского междуречья. *Геология и геофизика*. 1989;11:139–142.
- Slastenov Yu.L., Grinenko V.S., Petrov V.B., Sapyanik V.V. New data on the stratigraphy of marine Jurassic sediments of the Lena-Aldan interfluvium. *Geologiya i Geofizika*, 1989;11:139–142. (In Russ.)

22. Гриненко В.С., Баранов В.В. Алдано-Вилуйская вулканическая палеосуша как следствие проявления в позднем мезозое на востоке Сибирской платформы и в ее складчатом обрамлении эпох тектоно-магматической активизации. В кн.: *Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Материалы Одиннадцатого Всероссийского совещания г. Томск, 19–24 сентября 2022 г.* Томск: Изд-во ТГУ; 2022. С. 91–94.

Grinenko V.S., Baranov V.V. The Aldan-Vilyui volcanic paleoland as a result of the occurrence of periods of tectonic-magmatic activation in the late Mesozoic in the east of the Siberian Platform and in its folded framing. In: *Cretaceous System of Russia and Neighboring Countries: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. Proceedings of the 11th All-Russian meeting, Tomsk, September 19–24, 2022, pp. 91–94.* Tomsk: TSU Publishing; 2022, pp. 91–94. (In Russ.)

23. Гриненко В.С., Князев В.Г. Девятков В.П. и др. Новые данные о стратиграфии верхнетриасовых-

юрских отложений перспективных на алмазы районов Сибирской платформы. *Наука и образование.* 2009;56(4):21–30.

Grinenko V.S., Knyazev V.G. Devyatov V.P., et al. New data on the stratigraphy of Upper Triassic-Jurassic deposits of diamond-promising areas of the Siberian Platform. *Nauka i Obrazovanie.* 2009;56(4):21–30. (In Russ.)

24. Баранов В.В., Гриненко В.С., Афанасьев В.П. и др. Свидетельства возможного существования вулканогенного магматизма в бассейне р. Синяя на южном фланге Вилуйской синеклизы. *Геодинамика и тектонофизика.* 2023;14(5):0719. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0719>

Baranov V.V., Grinenko V.S., Afanasiev V.P., et al. Possible evidence for the existence of volcanogenic magmatism in the Sinyaya River Basin at the Southern Flank of the Vilyui Syncline. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2023;14(5):0719. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0709> (In Russ.)

Об авторах

ГРИНЕНКО Виталий Семенович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5242-2200>, SPIN: 1671-4670, e-mail: grinenkovs52@mail.ru

ОЩЕПКОВА Мария Геннадьевна, ведущий инженер, <https://orcid.org/0000-0002-2777-0449>, SPIN: 2649-5300, e-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

ДЗЮБА Оксана Сергеевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-1523-8153>, ResearcherID: I-8639-2018, Scopus Author ID: 15060141700, SPIN: 9898-1674, e-mail: dzyubaos@ipgg.sbras.ru

ШУРЫГИН Борис Николаевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5512-7509>, ResearcherID: I-8387-2018, Scopus Author ID: 6602242880, SPIN: 1639-2200, e-mail: shuryginbn@ipgg.sbras.ru

About the authors

GRINENKO, Vitaliy Semenovish, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5242-2200>, SPIN: 1671-4670, e-mail: grinenkovs52@mail.ru

OSHCHEPKOVA, Mariya Gennadievna, Leading Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-2777-0449>, SPIN: 2649-5300, e-mail: oshchepkovamg28@mail.ru

DZYUBA, Oksana Sergeevna, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1523-8153>, ResearcherID: I-8639-2018, Scopus Author ID: 15060141700, SPIN: 9898-1674, e-mail: dzyubaos@ipgg.sbras.ru

SHURYGIN, Boris Nikolaevich, Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5512-7509>, ResearcherID: I-8387-2018, Scopus Author ID: 6602242880, SPIN: 1639-2200, e-mail: shuryginbn@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию / Submitted 27.07.2023

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2024

Принята к публикации / Accepted 19.02.2024

Оригинальная статья

Моделирование онтогенетических изменений поперечного сечения раковин древнейших (позднепермских) представителей рода *Otoceras* (Ammonoidea)

Р. В. Кутыгин✉, А. Н. Килясов

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

Аннотация

Впервые для древнейшего (позднепермского) представителя рода *Otoceras* сделаны поперечные сечения раковин. По этим сечениям реконструированы онтогенетические изменения формы раковины *O. concavum* Tozer на стадиях от мельчайших до очень крупных размеров. При мельчайших размерах умеренно широкая раковина, обладающая умеренно узким умбиликом, интенсивно сужается, становясь узкой. На стадии очень мелких размеров раковина расширяется, вновь превращаясь в умеренно широкую, а умбилик незначительно сужается, по-прежнему оставаясь умеренно узким. При мелких размерах изменение указанных характеристик происходит в том же направлении, но с усилившейся интенсивностью. Важные изменения наблюдаются на стадии средних размеров, когда расширение раковины прекращается, а умбилик становится узким. В конце изученного онтогенеза морфологическое развитие моллюска направлено на формирование умеренно узкой формы с очень узким умбиликом. Из ранее установленного у аммонойд многообразия форм раковины, насчитывающего 35 типов, представители вида *O. concavum* на протяжении изученного онтогенеза приобретают только три: субдискокон, тумарикон и пахикон. Построенная онтогенетическая модель наглядно демонстрирует особенности развития поперечного сечения раковин *O. concavum* в процессе их роста, подчеркивая вышерассмотренные онтогенетические тренды изменения важнейших показателей раковины. Выявленные преобразования формы раковины способствуют диагностике мелкорослых отоцерасов и может послужить основой для последующей реконструкции морфогенетического развития семейства Otoceratidae.

Ключевые слова: поздняя пермь, чансинский век, цератиты, *Otoceras*, онтогенез, форма раковины, Южное Верхоянье

Финансирование. Исследования выполнены за счет Российского научного фонда и Республики Саха (Якутия) (грант № 22-24-20112, <https://rscf.ru/project/22-24-20112/>).

Для цитирования: Кутыгин Р.В., Килясов А.Н. Моделирование онтогенетических изменений поперечного сечения раковин древнейших (позднепермских) представителей рода *Otoceras* (Ammonoidea). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):48–59. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-48-59>

Original article

Modeling of ontogenetic changes in the shell cross section of the most ancient (Late Permian) representatives of *Otoceras* (Ammonoidea)

Ruslan V. Kutygin✉, Afanasy N. Kilyasov

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

Abstract

For the first time, shell cross-sections were made for the most ancient (Late Permian) representatives of the genus *Otoceras*. From these cross-sections, ontogenetic changes in the shell shape of *O. concavum* Tozer were reconstructed at size stages ranging from tiny to very large. A moderately wide shell with a moderately narrow umbilicus narrows

intensely to its tiny size, becoming a narrow shell. At the stage of very small size, the shell expands, again becoming moderately wide, and the umbilicus narrows slightly, remaining moderately narrow. However, at small sizes, the change in these characteristics occurs in the same direction, but with increased intensity. Moreover, important changes are observed at the medium-sized stage, when the expansion of the shell stops and the umbilicus becomes narrow. At the end of the studied ontogenesis, the morphological development of the mollusk was aimed at the formation of a moderately narrow shape with a very narrow umbilicus. Of the variety of shell shapes previously established among ammonoids, numbering 35 types, representatives of the species *O. concavum* throughout the studied ontogenesis had only three: subdiscocone, tumaricone, and pachycone. Finally, the constructed ontogenetic model clearly demonstrated the features of the development of the cross-sectional shape of *O. concavum* shells during their growth, emphasizing ontogenetic trends in changes in the most important parameters of the shell. We conclude that the identified transformations of the shell shape contribute to the diagnosis of small-sized *Otoceras*, and can serve as the basis for the subsequent reconstruction of the morphogenetic development of the family Otoceratidae.

Keywords: Late Permian, Changhsingian, ceratitids, *Otoceras*, ontogeny, shell shape, Southern Verkhoyanie

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation and the Republic of Sakha (Yakutia) (grant No. 22-24-20112, <https://rscf.ru/en/project/22-24-20112/>).

For citation: Kutygin R.V., Kilyasov A.N. Modeling of ontogenetic changes in the shell cross section of the most ancient (Late Permian) representatives of *Otoceras* (Ammonoidea). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):48–59. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-48-59>

Введение

В прошлом столетии с отоцерасами связывалось начало триасового периода, а вмещающие их отложения (*Otoceras* bed) относились к базальной части индского яруса, триасовой системы и всего мезозоя [1–6; и др.]. В настоящее время граница между пермью и триасом стала проводиться выше – внутри отоцерасовых слоев [7], что существенно усложнило обоснование нижней границы триаса по аммоноидеям и потребовало дополнительных детальных морфологических исследований на представительном и хорошо привязанном к разрезу материале.

В Арктической Канаде [8] и Верхоянье [9] отоцерасовые слои разделены на две последовательные зоны – *Otoceras concavum* и *O. boreale*. Ранее считалось, что в южной части Верхоянья зона *concavum* выделяется лишь в басс. р. Сеторым [10] Аллах-Юньской структурно-фациальной зоны (СФЗ) [11], тогда как вышележащий биостратон в указанной СФЗ распространен шире и к тому же вскрывается в верховьях р. Томпо Томпонской СФЗ. Существовало обоснованное мнение, что во всех направлениях р. Сеторым вначале выпадает зона *concavum*, а затем и зона *boreale* [12]. Однако недавнее детальное изучение разреза на р. Кобюме [13] позволило не только установить присутствие отоцерасовых слоев в Кобюминской СФЗ, но и выявить в основании некучанской свиты зону *concavum*, которая перекрывается зоной *boreale* [14]. Присутствие зоны *concavum* недавно нами было установлено

и южнее Сеторымского разреза – в верховьях р. Дыба [15, 16]. Все это свидетельствует о более широком распространении нижнего биостратона отоцерасовых слоев в Верхоянье, чем считалось ранее.

В процессе изучения мелкорослых раковин отоцерасов из разреза Тирях-Кобюме [17] мы столкнулись с серьезной проблемой их диагностики, поскольку для наиболее древних видов рода *Otoceras* какие-либо данные об онтогенезе раковины отсутствовали, а отличительные признаки ранее были приведены лишь для очень крупных экземпляров [8, 18]. В связи с необходимостью уточнения зонального деления отоцерасовых слоев в Южном Верхоянье и выявления различий между видами рода *Otoceras* на ранних и средних оборотах впервые для его древнейшего представителя (вида *Otoceras concavum* Tozer) выполнены детальные онтогенетические и морфометрические исследования, результаты которых приведены ниже.

Материал и методика исследований

В последние годы мы вели целенаправленные поиски аммоноидей в пограничных пермско-триасовых отложениях басс. р. Сеторым. Собран обширный материал [19, 20], позволяющий проводить онтогенетическое изучение видов-индексов обоих зональных стратонов. На первом этапе исследований монографически обработаны коллекции аммоноидей из зоны *concavum*, относящейся к чансинскому ярусу верхней перми [21]. Основные сборы раковин *O. concavum* сделаны

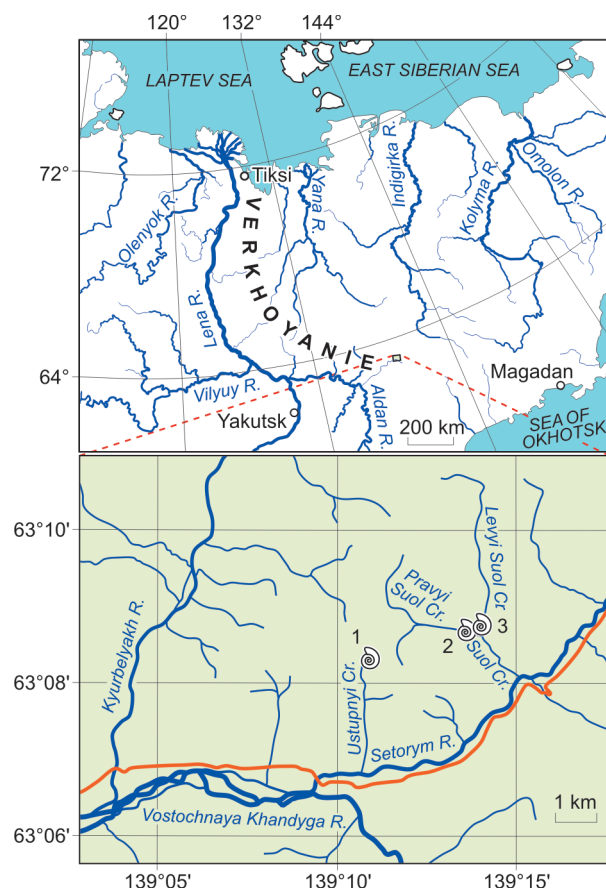


Рис. 1. Местонахождения аммоноидей *Otoceras concavum* Tozer с изученными поперечными сечениями раковин: 1 – руч. Уступный, обн. 17R1, 2 – руч. Правый Суол, обн. PS, 3 – руч. Левый Суол, обн. LS

Fig. 1. Locations of the ammonoid *Otoceras concavum* Tozer with studied shell cross-section: 1 – Ustupnyi Creek, outcrop 17R1, 2 – Pravyy Suol Creek, PS outcrop, 3 – Levyy Suol Creek, LS outcrop

на ручьях Суол и Уступный правобережья р. Сеторым (рис. 1).

Для изучения онтогенеза аммоноидей информативными являются поперечные сечения раковин [22], позволяющие проследить историю индивидуального развития внешней формы и конфигурации оборотов. Выполненные сечения шлифовались на стекле с использованием абразивных порошков. Затем они сканировались на планшетном сканере и фотографировались под микроскопом. Измерения (рис. 2) проводились на компьютере в графическом редакторе.

Чтобы выяснить закономерности индивидуального развития формы раковины аммоноидей, проведено моделирование изменения поперечных сечений в онтогенезе по ранее рассмотренной методике [23, 24].

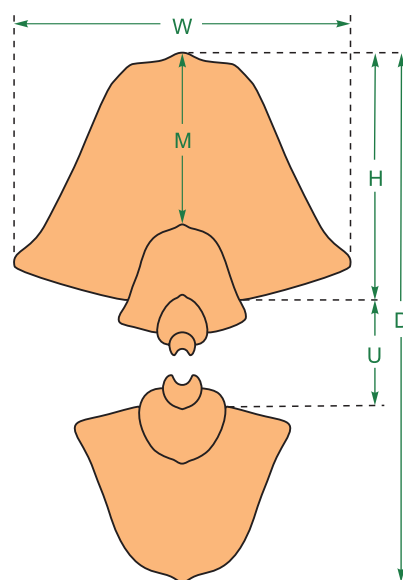


Рис. 2. Основные измерения аммоноидей: D – диаметр раковины; W, H и M – ширина, высота и медиальная высота оборота; U – диаметр умбилика

Fig. 2. Main measurements of ammonoids: D – shell diameter; W, H and M – whorl width, height and medial height; U – umbilical diameter

Изученные экземпляры хранятся в Институте геологии алмаза и благородных металлов (ИГАБМ) СО РАН.

Результаты и обсуждение

В коллекции аммоноидей из зоны *Otoceras concavum* басс. р. Сеторым преобладают умеренно широкие экземпляры, удовлетворяющие диагностическим признакам вида-индекса зоны. Реже встречаются раковины с узкой уплощенной формой и менее выраженной оттянутостью умбиликального края. Отличия экземпляров этой немногочисленной группы от *O. concavum* Tozer позволили отнести их к отдельному виду, предварительно обозначенному как *O. aff. concavum* Tozer. Однако выполненное поперечное сечение лучшего экземпляра (рис. 3), выявило серьезную деформацию внутренних оборотов и, вероятно, пластичное смятие внешнего оборота, произошедшее после жизни моллюска. В связи с этим мы не можем исключить того, что отличительные признаки *O. aff. concavum* возникли не в результате морфогенеза отоцерасов, а в процессе литогенеза вмещающей породы.

Несмотря на внешне хорошую сохранность, ряд разрезанных экземпляров *O. concavum* также оказались деформированными. Форму оборотов

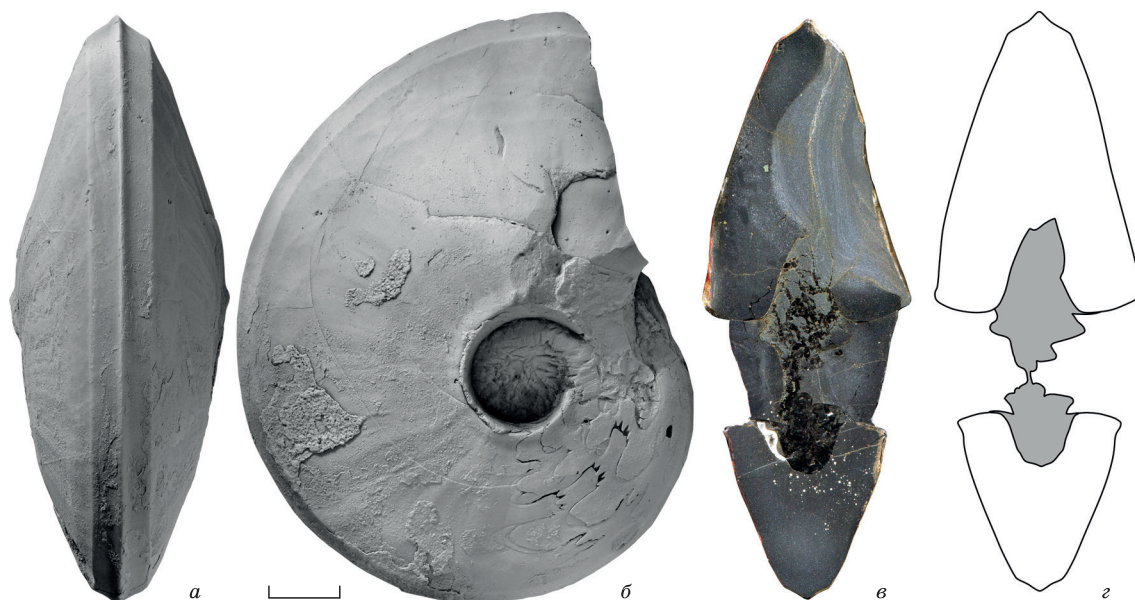


Рис. 3. *Otoceras* aff. *concavum* Tozer, экз. № 234/208: *a* – с вентральной стороны, *б* – сбоку; *в*, *г* – поперечное сечение раковины и его реконструкция. Руч. Левый Суол, обр. 16LS-3-2р, некучанская свита, в 2 м выше ее подошвы, верхнечансинский подъярус, зона *Otoceras concavum*. Длина масштабного отрезка 1 см

Fig. 3. *Otoceras* aff. *concavum* Tozer, specimen no. 234/208: *a* – ventral view, *б* – lateral view, *в*, *г* – shell cross-section and its reconstruction. Levyi Suol Creek, sample 16LS-3-2p, Nekuchan Formation, 2 m above its base, Upper Changhsingian, *Otoceras concavum* Zone. Scale bar 1 cm

сохранили лишь два изученных образца (рис. 4), для которых и была выполнена реконструкция поперечных сечений (рис. 3), позволившая выявить особенности онтогенетического развития древнейших представителей рода *Otoceras*. Наиболее ранние стадии онтогенеза можно наблюдать в экземпляре с руч. Правый Суол (см. рис. 4, *г*–*ж*, рис. 5, *б*), но и у него, к сожалению, протоконх и первые обороты не сохранились. Второй экземпляр, обнаруженный в разрезе руч. Уступный (см. 4, *а*–*в*, рис. 5, *а*), наращивает онтогенез предыдущего. По этим двум раковинам нам удалось составить общую модель поперечного сечения (рис. 5, *в*), представляющую преобразования в их форме при размерах от 3,2 до 122 мм (рис. 5, *г*).

Выполненные измерения (см. таблицу) полуоборотов в поперечных сечениях экземпляров (рис. 5, *а*, *б*) и в их модели (рис. 5, *в*) показывают отчетливые тенденции в изменении основных показателей, что является важным шагом к морфогенетической увязке с ранее установленными данными онтогенетического развития более молодого вида (*O. boreale*) [25, 26].

Для выяснения геометрии раковин аммоидей и определения экологических морфотипов

большое внимание ранее уделялось показателю Д.М. Раупа [27, 28], равному отношению квадратов большого и малого радиусов раковины за полуоборот и называемому *whorl expansion rate* (скорость возрастания оборотов). Для анализа изменения этого показателя в онтогенезе необходимо наличие в измеряемом экземпляре протоконха. Поскольку последний в поперечных сечениях раковин *O. concavum* не сохранился, мы не имеем возможности использовать этот показатель в морфометрических исследованиях.

Взамен сложно определяемого показателя Д.М. Раупа исследователями предложен одноименный показатель WER, равный $(D/(D-M))^2$ [29, 30]. Как отмечено одним из авторов настоящей статьи, существует прямая зависимость между WER и M/D , а диаграммы изменения этих показателей в онтогенезе почти идентичны [31]. Исходя из этого, для изучения формы навивания оборотов мы ограничимся анализом изменения возрастания спирали (M/D).

Преобразования формы медиальной спирали (рис. 6, *а*) на внутренних оборотах не имеют хорошо выраженного однонаправленного тренда – показатель M/D колеблется в интервале от 0,31 до 0,33. На средних оборотах у *O. concavum* про-



Рис. 4. *Otoceras concavum* Tozer. *а-в* – экз. № 234/241-1: *а, в* – сбоку, *б* – с вентральной стороны; руч. Уступный, обр. 17R1-71-1.1р, некучанская свита, в 1,1 м выше ее подошвы. *г-ж* – экз. № 234/370-1: *г, ж* – сбоку, *д, е* – с вентральной стороны; руч. Правый Суол, обр. 22PS-3-0.5р, некучанская свита, в 0,5 м выше ее подошвы. Верхняя пермь, чансинский ярус, верхний подъярус

Fig. 4. *Otoceras concavum* Tozer. *а-в* – specimen no. 234/241-1: *а, в* – lateral views, *б* – ventral view; Ustupnyi Creek, sample 17R1-71-1.1р; Nekuchan Formation, 1.1 m above its base. *г-ж* – specimen no. 234/370-1: *г, ж* – lateral views, *д, е* – ventral views; Pravyi Suol Creek, sample 22PS-3-0.5р; Nekuchan Formation, 0.5 m above its base. Upper Permian, Changhsingian Stage, Upper Changhsingian Substage

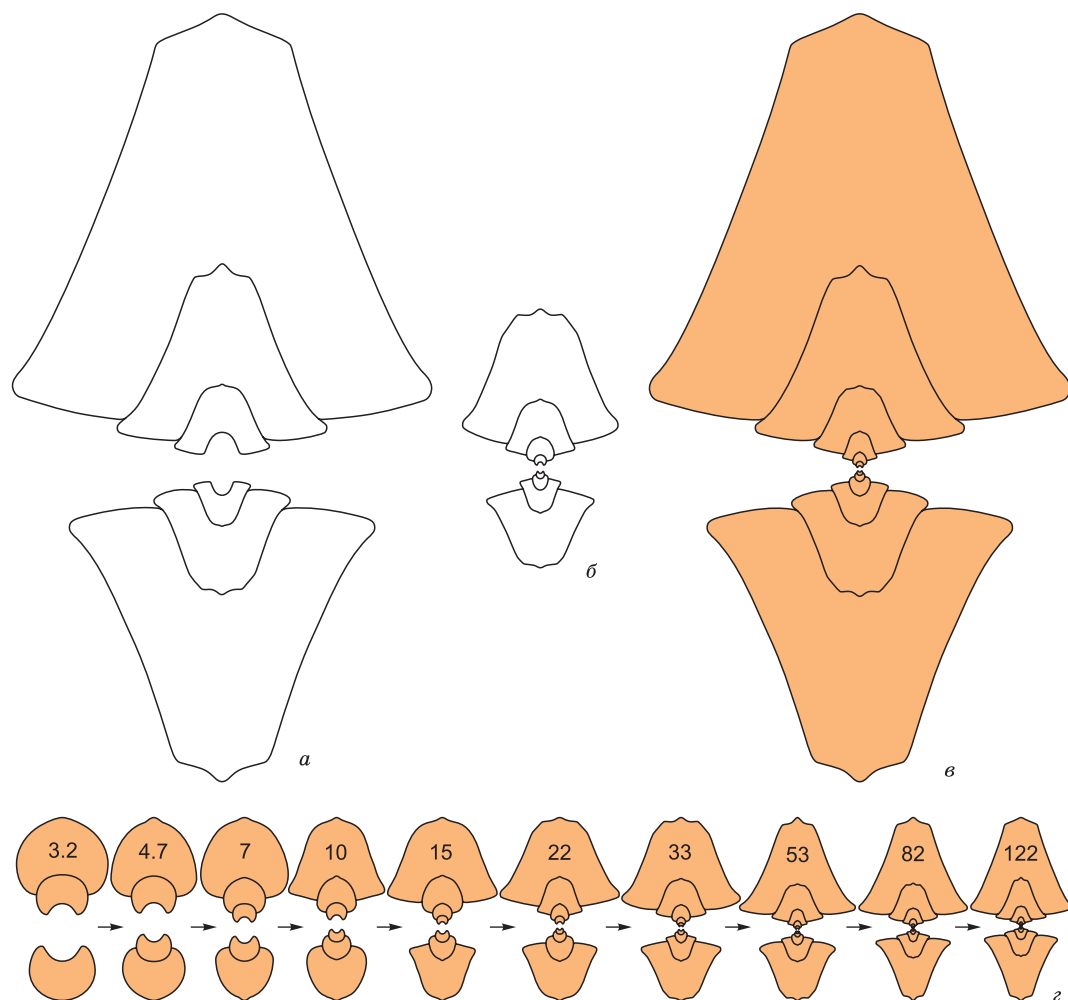


Рис. 5. Поперечные сечения раковин *Otoceras concavum*: а – экз. № 234/241-1 при D = 122 мм; б – экз. № 234/370-1 при D = 41 мм; в, з – модель при D = 122 мм (в) и последовательность ее полуоборотов (з). На сечениях указаны диаметры раковин в мм

Fig. 5. Shell cross-sections of *Otoceras concavum*: а – specimen no. 234/241-1 at D = 122 mm, Ustupnyi Creek, sample 17R1-71-1.1p; б – specimen no. 234/370-1 at D = 41 mm, Pravyi Suol Creek, sample 22PS-3-0.5p; в, з – a model at D = 122 mm and the sequence of its half-whorls. Shell diameter in millimeters is shown on the cross-section

исходит интенсивное растяжение спирали, при этом максимальные значения M/D превышают 0,36. На внешних оборотах спираль интенсивно сжимается, приобретая форму навивания, близкую к мелкоразмерным раковинам. В завершающей фазе онтогенеза показатель M/D становится меньше 0,33.

Как видно из диаграммы (рис. 6, б), при очень мелких размерах (D 5,7 мм) раковина достигает наиболее узкой формы ($W/D = 0,44$), что является фазой максимального сужения раковины. В дальнейшем происходит интенсивное расширение раковины (увеличение показателя W/D). Наиболее широкими раковины становятся при D

20–30 мм. На этом промежутке онтогенеза, обозначаемом как фаза максимального расширения, W/D достигает 0,64–0,67. В дальнейшем, до конца существования особи, вероятно, происходит непрерывное сужение раковины (уменьшение W/D). Изменения показателей H/D и U/D у нормально навивающихся аммоноидей обычно взаимосвязаны и противоположны по направлению. Для представителей *O. concavum* характерны увеличение относительной высоты оборота и уменьшение размера умбилика (рис. 6, в, з). Отношение ширины оборота к его высоте (рис. 6, д) практически повторяет направление и интенсивность изменений выше рассмотренного показателя

Размеры (мм) раковин *O. concavum* Tozer

Dimensions (in mm) of *O. concavum* Tozer

Экз. No	П/о	D	W	H	U	M	W/D	H/D	U/D	W/H	M/D
234/241-1	1	15,2	9,10	7,10	3,40		0,599	0,467	0,224	1,282	
	*	20,0	12,93	9,69	4,05		0,646	0,485	0,202	1,333	
	2	22,6	15,00	11,10	4,40	7,4	0,664	0,491	0,195	1,351	0,327
	3	33,4	21,70	16,70	5,60	10,8	0,650	0,500	0,168	1,299	0,323
	*	50,0	31,69	26,52	7,51		0,634	0,530	0,150	1,195	
	4	52,5	33,20	28,00	7,80	19,1	0,632	0,533	0,149	1,186	0,364
	5	82	48,50	43,50	10,50	29,5	0,591	0,530	0,128	1,115	0,360
	*	100	56,74	52,95	12,08		0,567	0,530	0,121	1,071	
	6	122	66,80	64,50	14,00	40,0	0,548	0,529	0,115	1,036	0,328
234/370-1	1	2,6	1,30	1,10			0,500	0,423		1,182	
	2	3,8	1,90	1,60	1,10	1,2	0,500	0,421	0,289	1,188	0,316
	*	5,0	2,28	2,14	1,45		0,456	0,427	0,289	1,067	
	3	5,7	2,50	2,45	1,65	1,9	0,439	0,430	0,289	1,020	0,333
	4	8,4	4,30	3,75	2,20	2,7	0,512	0,446	0,262	1,147	0,321
	*	10,0	5,18	4,49	2,52		0,518	0,449	0,252	1,155	
	5	12,2	6,40	5,50	2,95	3,8	0,525	0,451	0,242	1,164	0,311
	6	18,1	11,00	8,60	4,00	5,9	0,608	0,475	0,221	1,279	0,326
	*	20,0	12,33	9,62	4,20		0,616	0,481	0,210	1,282	
Модель	7	26,7	17,00	13,20	4,90	8,6	0,637	0,494	0,184	1,288	0,322
	8	41,0	25,00	21,30	6,50	14,3	0,610	0,520	0,159	1,174	0,349
	1	2,2	1,15	0,95			0,523	0,432		1,211	
	2	3,2	1,60	1,35	0,90	1,0	0,500	0,422	0,281	1,185	0,313
	3	4,7	2,20	2,02	1,33	1,5	0,468	0,430	0,283	1,089	0,319
		5,0	2,35	2,16	1,40		0,470	0,432	0,281	1,089	
	4	7,0	3,35	3,08	1,90	2,3	0,479	0,440	0,271	1,088	0,329
	*	10,0	5,21	4,51	2,51		0,521	0,451	0,251	1,157	
	5	10,3	5,40	4,65	2,57	3,3	0,524	0,451	0,250	1,161	0,320
	6	15,1	9,00	7,05	3,40	4,8	0,596	0,467	0,225	1,277	0,318
	*	20,0	12,74	9,60	4,11		0,637	0,480	0,206	1,327	
	7	22,3	14,50	10,80	4,45	7,2	0,650	0,484	0,200	1,343	0,323
	8	33,4	21,70	16,80	5,80	11,1	0,650	0,503	0,174	1,292	0,332
	*	50,0	31,69	26,36	7,63		0,634	0,527	0,153	1,202	
	9	52,5	33,20	27,80	7,90	19,1	0,632	0,530	0,150	1,194	0,364
	10	82	48,50	43,50	10,70	29,5	0,591	0,530	0,130	1,115	0,360
	*	100	56,74	52,95	12,19		0,567	0,530	0,122	1,071	
	11	122	66,80	64,50	14,00	40,0	0,548	0,529	0,115	1,036	0,328

Примечание. П/о – полуоборот, * линейная интерполяция показателей.

Note. П/о – half-turn, * linear interpolation of indicators.

теля W/D. В фазу максимального сужения раковины (D 5,7 мм) значения высоты и ширины оборота становятся близкими, тогда как в осталь-

ные периоды индивидуального развития, исключая внешние обороты, ширина существенно превосходит высоту, причем в фазу максимального

расширения раковины (D 20–30 мм) W/H может превышать 1,3. На внешних оборотах значения W и H вновь уравниваются.

При изучении морфологии нормально навивающихся аммоноидей ранее было показано, что взаимоотношение размера умбилика (U/D) и относительной ширины оборота (W/D) во многом отражает внешнюю форму их раковины [23, 32]. Но куда важнее выяснить не само взаимоотношение отношение U/D и W/D , а их изменение в процессе роста раковины, которое у отдельных видов являются неповторимым [23], что делает этот признак крайне важным для разграничения и диагностики таксонов.

Для рассмотрения этапности изменения формы раковины онтогенез разбит на ряд размерных стадий [23, 24] (рис. 7). Учитывая сублогарифмический характер навивания раковины (медиальной спирали), выделенные размерные стадии являются соразмерными по длине оборотов.

На фоне выдержанных значений U/D мельчайшая раковина (рис. 7, а) в онтогенезе сужается, превращаясь из умеренно широкой в узкую. При очень мелких размерах (рис. 7, б) раковина расширяется, вновь становясь умеренно широкой. На этой стадии незначительно сужается умбилик, оставаясь по-прежнему умеренно узким. Изменение обсуждаемых показателей (W/D и U/D) на стадии мелких размеров (рис. 7, в) продолжается в том же направлении, но его интенсивность усиливается. Важные преобразования в онтогенезе наблюдаются при средних размерах раковины (рис. 7, з), когда расширение (увеличение W/D) прекращается, а умбилик становится узким. На завершающих стадиях изученного онтогенеза (рис. 7, д, е), при медленном сокращении размера умбилика, раковина сужается. Здесь мы наблюдаем онтогенетический тренд, направленный на формирование умеренно узкой формы с очень узким умбиликом (субоппеликон по классификации [23]).

Построенная модель (рис. 8) наглядно демонстрирует особенности развития формы поперечного сечения раковин *Otoceras concavum* в процессе их роста, подчеркивая рассмотренные выше онтогенетические тренды изменения размера умбилика и относительной ширины раковины.

При этом из установленного ранее многообразия U/D – W/D форм, насчитывающих 35 типов [23], изученные представители вида *O. con-*

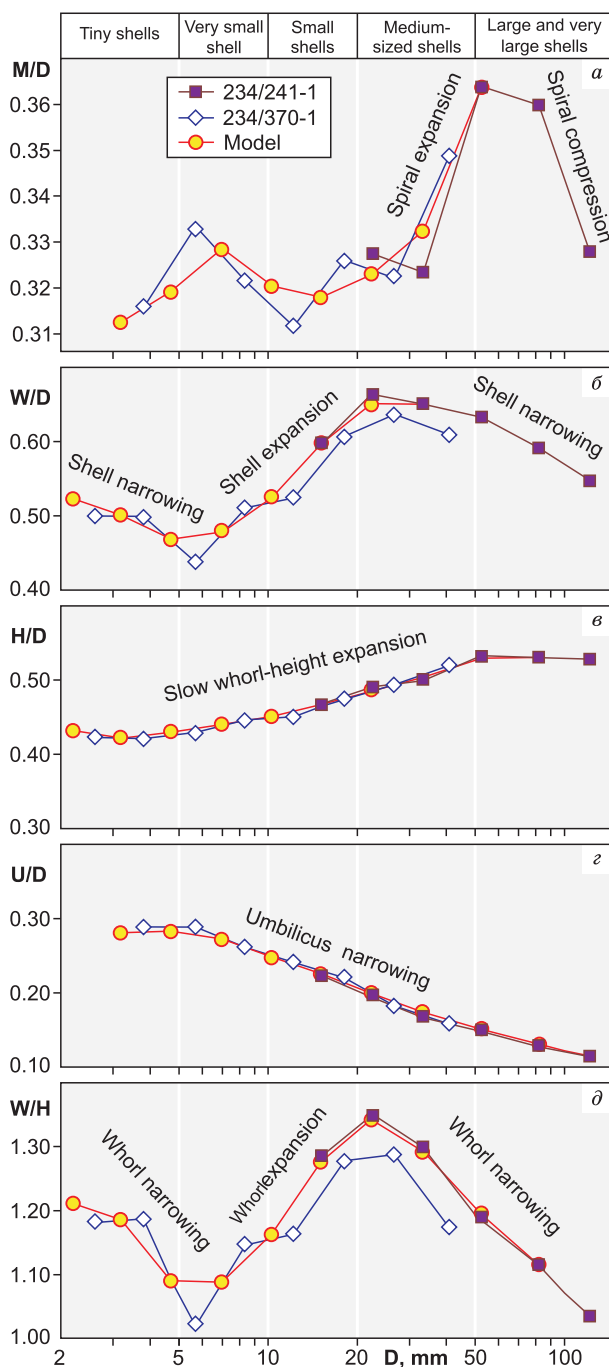


Рис. 6. Диаграммы изменения M/D (а), W/D (б), H/D (в), U/D (г) и W/H (д) в онтогенезе *Otoceras concavum*. Tiny shells – мельчайшие раковины, Very small shell – очень мелкие раковины, Small shells – мелкие раковины, Medium-sized shells – среднеразмерные раковины, Large and very large shells – крупные и очень крупные раковины, Spiral expansion – растяжение спирали, Spiral compression – сжатие спирали, Shell narrowing – сужение раковины, Shell expansion – расширение раковины, Slow whorl-height expansion – слабое расширение сечения оборота, Umbilicus narrowing – сужение умбилика, Whorl narrowing – сужение оборота, Whorl expansion – расширение оборота

Fig. 6. Diagrams of changes of M/D (a), W/D (б), H/D (в), U/D (г) and W/H (д) in the ontogeny of *Otoceras concavum*

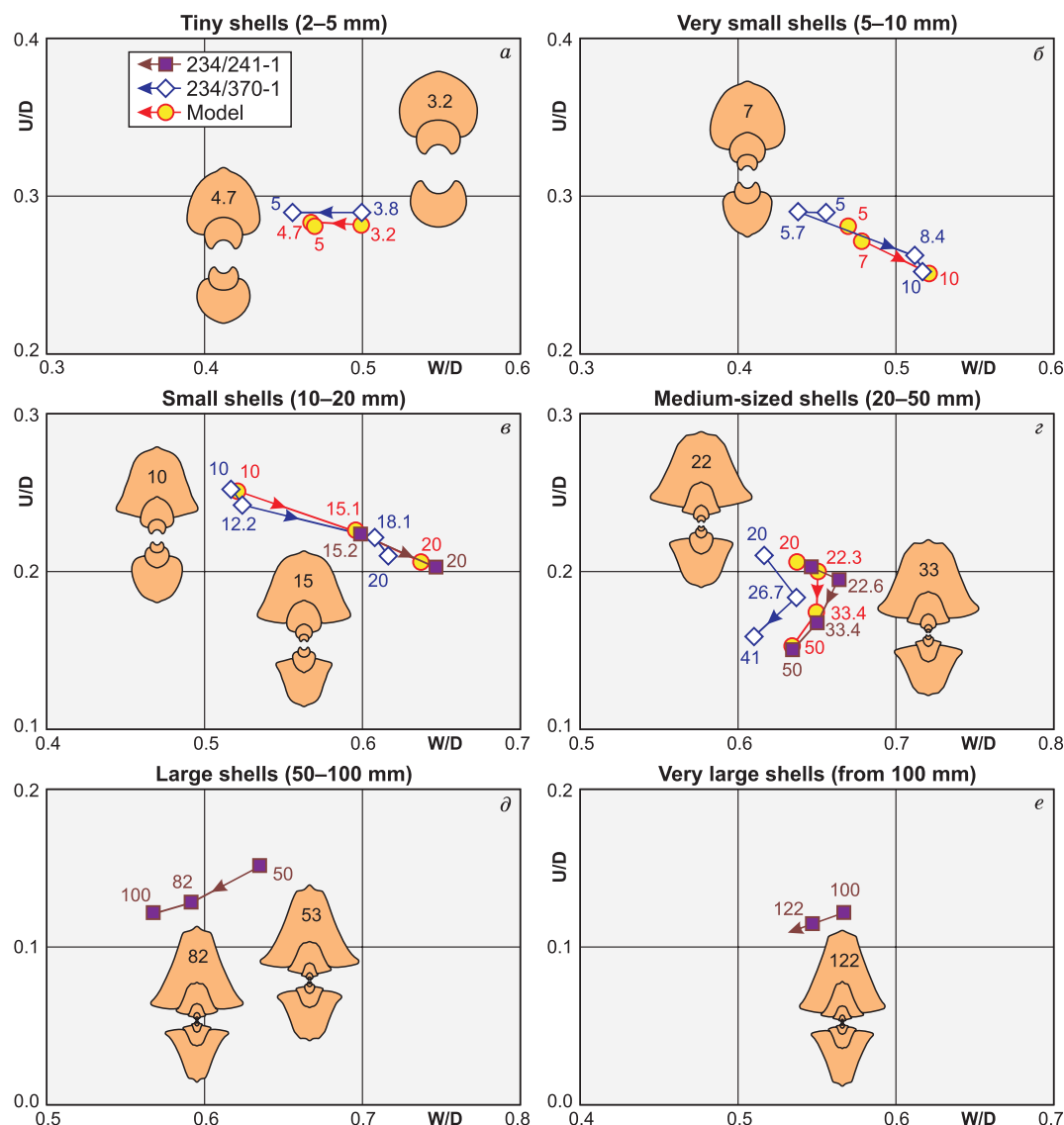


Рис. 7. Изменение формы раковин *Otoceras concavum* на отдельных размерных стадиях онтогенеза (а–е). На сечениях и возле маркеров показаны диаметры раковин в мм. Ост. пояснения см. рис. 6.

Fig. 7. Ontogenetic changes in the shell shape of *Otoceras concavum* at different size stages (a–e). Shell diameter in millimeters is shown on the cross-section and near the markers. For other explanations, see Fig. 6

savum приобретают только три, в следующей последовательности: тумарикон → субдискокон → тумарикон → пахикон.

Закключение

По изученным поперечным сечениям построены модели онтогенетического изменения формы раковин вида *Otoceras concavum* Tozer на стадиях от мельчайших до очень крупных размеров. Выявлено однонаправленное уменьшение размера умбилика и увеличение относительной высоты оборота в процессе роста раковины. Изменение

общей формы сечения оборота и его относительной ширины носит циклический характер. На стадии мельчайших размеров происходит сужение раковины, которое при очень мелких и мелких размерах сменяется интенсивным расширением. После периода стабилизации W/H и W/D, наблюдаемой при средних размерах, до окончания жизни моллюска происходит уменьшение этих показателей – сужение раковины и сечения оборота. Отсутствие подобных детальных исследований изменения формы раковины в онтогенезе других представителей рода *Otoceras* существенно

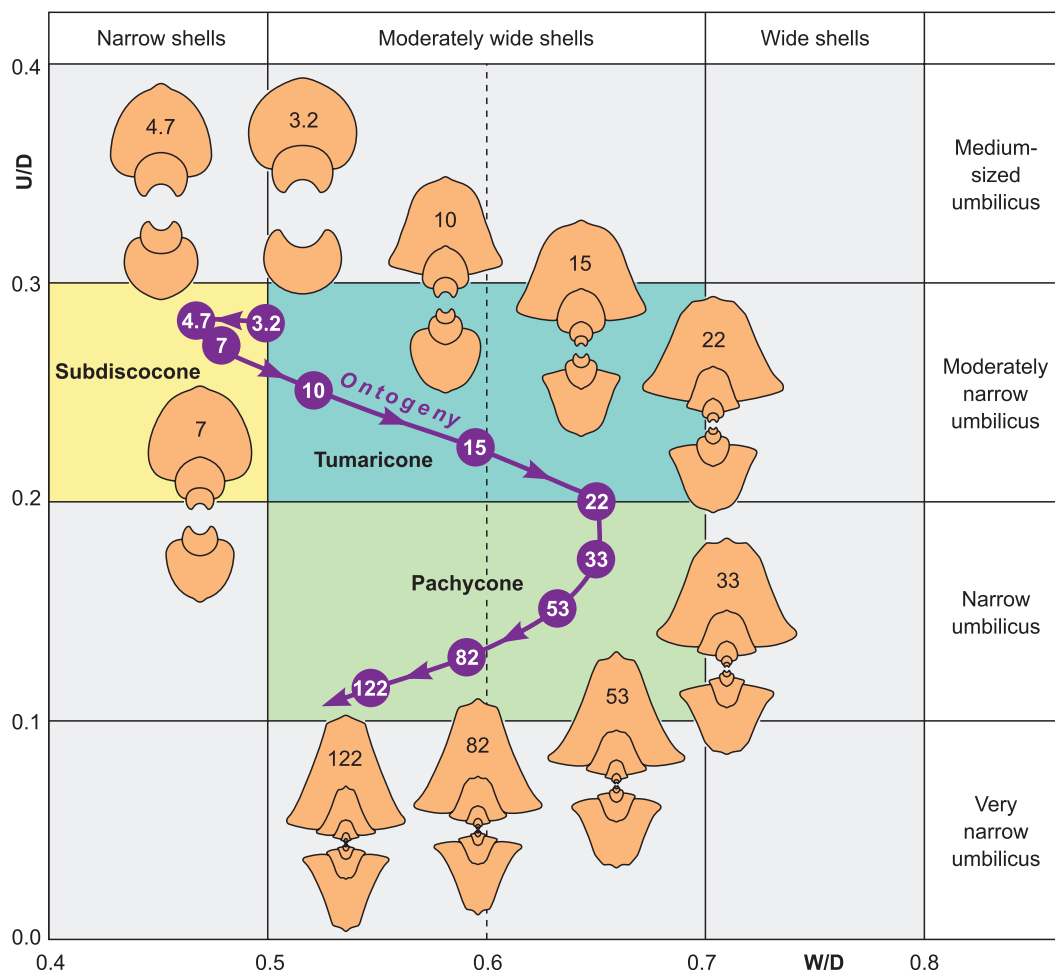


Рис. 8. Модель развития формы раковин *Otoceras concavum* в онтогенезе. На сечениях и маркерах показаны диаметры раковин в мм. Narrow shells – узкие раковины, Moderately wide shells – умеренно широкие раковины, Wide shells – широкие раковины, Medium-sized umbilicus – умбилик среднего размера, Moderately narrow umbilicus – умеренно узкий умбилик, Narrow umbilicus – узкий умбилик, Very narrow umbilicus – очень узкий умбилик, Subdiscocone – субдискоконе, Tumaricone – тумарикон, Pachycone – пахикон, Ontogeny – онтогенез

Рис. 8. Model depicting the ontogeny of the shell shape of *Otoceras concavum*. Shell diameter in mm is shown on the cross-section and near the markers

усложняет решение сложной проблемы происхождения и морфогенетического развития семейства Otoceratidae.

Список литературы / References

1. Diener C. Ueber das Alter der *Otoceras* beds des Himalaya. *Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Palaeontologie*. 1901;(16):513–518.
2. Кипарисова Л.Д., Попов Ю.Н. Расчленение нижнего отдела триасовой системы на ярусы. *Докл. АН СССР*. 1956;109(4):842–845.
3. Kiparisova L.D., Popov Yu.N. Division of the Lower Triassic System into Stages. *Doklady AN SSSR*. 1956; 109(4):842–845. (In Russ.)
4. Tozer E.T. Triassic stratigraphy and faunas, Queen Elizabeth Island Arctic Archipelago. *Memoirs of the Geological Survey of Canada*. 1961;(316):1–116.
5. Шевырев А.А. Аммоноидеи и хроностратиграфия триаса. М.: Наука; 1990. 178 с.
6. Ермакова С.П. Нижняя граница триаса. *Отечественная геология*. 1999;(4):33–34.
7. Ermakova S.P. Lower boundary of the Triassic. *Otechestvennaya geologiya*. 1999;(4):33–34. (In Russ.)
8. Shevyrev A.A. Triassic Biochronology: State of the Art and Main Problems. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2006;14(6):629–641. <https://doi.org/10.1134/S0869593806060037>
9. Tozer E.T. A standard for Triassic time. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*. 1967;(156):1–103.

9. Дагис А.С., Дагис А.А., Казаков А.М. и др. Биостратиграфия нижнего инда Восточного Верхоянья. *Биостратиграфия мезозоя Сибири и Дальнего Востока*. Новосибирск: Наука; 1986:21–31.
- Dagys A.S., Dagys A.A., Kazakov A.M., et al. Biostratigraphy of the Lower Induan in Eastern Verkhoyanie. *Biostratigrafiya mezozoya Sibiri i Dal'nego Vostoka [Mesozoic biostratigraphy of Siberia and the Far East]*. Novosibirsk: Nauka; 1986:21–31. (In Russ.)
10. Ермакова С.П. Зональный стандарт бореального нижнего триаса. М.: Наука; 2002. 109 с.
- Ermakova S.P. *Zone Standard of the Boreal Lower Triassic*. Moscow: Nauka, 2002. 109 p. (In Russ.)
11. Решения Третьего межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и мезозою Северо-Востока России. Ред. Т.Н. Корень, Г.В. Котляр. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ; 2009. 268 с.
- Resolutions of the Third Interdepartmental Regional Conference on the Stratigraphy of the Precambrian, Paleozoic, and Mesozoic of Northeastern Russia*. T.N. Koren' and G.V. Kotlyar (eds.) St. Petersburg: Vseross. Nauchno-Issled. Geol. Inst.; 2009. 268 p. (In Russ.)
12. Ermakova S.P., Kutygin R.V. The Induan Stage in the Eastern upper Yana region. *Russian Geology and Geophysics*. 2000;41(5):649–656.
13. Davydov V.I., Budnikov I.V., Kutygin R.V., et al. Possible bipolar global expression of the P3 and P4 glacial events of eastern Australia in the Northern Hemisphere: Marine diamictites and glendonites from the middle to upper Permian in southern Verkhoyanie, Siberia. *Geology*. 2022;50(8):874–879. <https://doi.org/10.1130/G50165.1>
14. Biakov A.S., Kutygin R.V. First record of the genus *Unionites* Wissmann (Bivalvia) in the boreal Permian of Northeast Russia. *Paleontological Journal*. 2021;55(4):372–377. <https://doi.org/10.1134/S0031030121040055>
15. Кутыгин Р.В., Килиасов А.Н. Стратиграфическое положение аммоноидей рода *Paramexioceras* Попов в пермско-триасовых отложениях Южного Верхоянья, Северо-Восток России. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):475–485. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-475-485>
- Kutygin R.V., Kilyasov A.N. Stratigraphic position of the ammonoid *Paramexioceras* Popov in the Permian-Triassic deposits of the Southern Verkhoyanie, Northeast Russia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):475–485. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-475-485> (In Russ.)
16. Kutygin R.V., Kilyasov A.N., Biakov A.S. The first record of the goniatite genus *Paramexioceras* in the Changhsingian deposits of the Upper Permian in Northeastern Asia. *Doklady Earth Sciences*. 2023;509(1):144–147. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601936>
17. Кутыгин Р.В., Будников И.В., Бяков А.С. и др. Первые находки цератитов рода *Otoceras* в Кобьюминской зоне Южного Верхоянья, Северо-Восток России. *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. 2019;161(4):550–570. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.4.550-570>
- Kutygin R.V., Budnikov I.V., Biakov A.S., et al. First findings of *Otoceras* (Ceratitida) in the Kobyuma Zone of the Southern Verkhoyansk Region, Northeastern Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2019;161(4):550–570. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2019.4.550-570> (In Russ.)
18. Dagys A., Ermakova S. Induan (Triassic) Ammonoids from North-Eastern Asia. *Revue de Paléobiologie*. 1996;15(2):401–447.
19. Biakov A.S., Kutygin R.V., Goryachev N.A., et al. Discovery of the Late Changhsingian Bivalve complex and two fauna extinction episodes in Northeastern Asia at the end of the Permian. *Doklady Biological Sciences*. 2018;480(1):78–81. <https://doi.org/10.1134/S0012496618030018>
20. Zakharov Y.D., Biakov A.S., Horacek M., et al. Environmental control on biotic development in Siberia (Verkhoyansk Region) and neighbouring areas during Permian–Triassic large igneous province activity. *Morphogenesis, Environmental Stress and Reverse Evolution*. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG; 2020:197–231. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47279-5_10
21. Ogg J.G., Chen Z.-Q. The Triassic Period. *Geologic Time Scale 2020*. Elsevier; 2020:903–953.
22. Руженцев В.Е. О методике исследования и описания аммоноидей. *Палеонтологический журнал*. 1964;(1):120–130.
- Ruzhencev V.E. On the methodology for studying and describing ammonoids. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1964;(1):120–130. (In Russ.)
23. Kutygin R.V. Shell shapes of Permian ammonoids from Northeastern Russia. *Paleontological Journal*. 1998;32(1):19–29.
24. Кутыгин Р.В., Князев В.Г. Особенности онтогенетического развития формы раковин ранних представителей позднеюрского рода *Amoeboceras* (Ammonoidea). *Наука и образование*. 2017;85(1):20–28.
- Kutygin R.V., Knyazev V.G. Shell shape ontogenetic development features of ancient representatives of the Late Jurassic genus *Amoeboceras* (Ammonoidea). *Nauka i Obrazovanie*. 2017;85(1):20–28. (In Russ.)
25. Захаров Ю.Д. *Otoceras* Бореальной провинции. *Палеонтологический журнал*. 1971;(3):50–59.
- Zaharov Yu.D. *Otoceras* of the Boreal Province. *Paleontologicheskij zhurnal*. 1971;(3):50–59. (In Russ.)
26. Zakharov Yu.D. Ammonoid succession of Setorym River (Verkhoyansk Area) and problem of Permian-Triassic Boundary in Boreal Realm. *Journal of China University of Geosciences*. 2002;13(2):107–123.
27. Raup D.M. Geometric analysis of shell coiling: Coiling in ammonoids. *Journal of Paleontology*. 1967;41(1):43–65.
28. Barskov I.S., Boiko M.S., Kononova V.A., et al. Cephalopods in the Marine Ecosystems of the Paleozoic. *Paleontological Journal*. 2008;42(11):1167–1284. <https://doi.org/10.1134/S0031030108110014>

29. Klug C. Life-cycles of some Devonian ammonoids. *Lethaia*. 2001;34(3):215–233.
30. Korn D. Morphospace occupation of ammonoids over the Devonian-Carboniferous boundary. *Paläontologische Zeitschrift*. 2000;74(3):247–257.
31. Kutygin R.V. Shell ontogeny of the type species of the genus *Neouddenites* (Ammonoidea, Medlicottiidae) from the Kungurian of Western Verkhoyanie. *Paleontological Journal*. 2023;57(5):507–515. <https://doi.org/10.1134/S0031030123050039>
32. Korn D. A key for the description of Palaeozoic ammonoids. *Fossil Record*. 2010;13(1):5–12. <https://doi.org/10.1002/mmng.200900008>

Об авторах

КУТЫГИН Руслан Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, Scopus Author ID: 9277169500, SPIN: 2547-9417, e-mail: rkutygin@mail.ru

КИЛАСОВ Афанасий Николаевич, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7469-2132>, ResearcherID: AАН-6016-2021, SPIN: 7741-4120, e-mail: kilyasov1993@mail.ru

About the authors

KUTYGIN, Ruslan Vladimirovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Laboratory, <https://orcid.org/0000-0003-4115-5976>, ResearcherID: J-3318-2018, Scopus Author ID: 9277169500, SPIN: 2547-9417, e-mail: rkutygin@mail.ru

KILYASOV, Afanasy Nikolaevich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7469-2132>, ResearcherID: AАН-6016-2021, SPIN: 7741-4120, e-mail: kilyasov1993@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 27.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 21.12.2023

Принята к публикации / Accepted 17.01.2024

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.524;551.345

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-60-68>

Оригинальная статья

Температурный режим холодного периода в Арктической зоне Якутии за 1960–2022 гг.

М. С. Васильев^{✉,1,2}, А. Н. Петрова¹

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]vms_1984@mail.ru

Аннотация

Наблюдаемые изменения в Арктике имеют глобальные последствия. Рост температуры воздуха и изменение холодного периода в целом могут оказать влияние на уязвимую экосистему с многолетнемерзлой литогенной основой Арктической зоны Якутии. Приведены результаты исследований по установлению дат начала и окончания холодного периода весной и осенью в двух многолетних периодах (1961–1990 и 1991–2022 гг.) северо-западной и северо-восточной частей Арктической зоны Якутии с расчетом разности температур и скорости изменения ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за 1960–2022 гг. Использованы метеорологические ряды по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»: ст. Оленек (Оленекский район), ст. Жиганск (Жиганский), ст. Чокурдах (Аллаиховский) и ст. Среднеколымск (Среднеколымский). Установлено, что за 1991–2022 гг. в северо-западной части Арктической зоны Якутии наблюдалось сокращение холодного периода – раннее наступление весны (май: ст. Оленек – на 4 сут., ст. Жиганск – на 6 сут.), а на северо-востоке – позднее наступление осени (сентябрь: ст. Чокурдах и ст. Среднеколымск – на 3 сут.). В целом, в апреле разность средней температуры воздуха между 1961–1990 гг. и 1991–2022 гг. на всех рассматриваемых станциях выше, чем в октябре, – исключением является ст. Чокурдах (октябрь – 2,6, апрель – 2,1 $^{\circ}\text{C}$). Скорость изменения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за 1960–2022 гг. в начале холодного периода (октябрь) была выше на северо-востоке Якутии (ст. Среднеколымск – 0,7 $^{\circ}\text{C}/10$ лет, ст. Чокурдах – 0,8 $^{\circ}\text{C}/10$ лет). В середине (январь – 1,1 $^{\circ}\text{C}/10$ лет) и конце (апрель – 1,0 $^{\circ}\text{C}/10$ лет) холодного периода максимальная скорость изменения температуры воздуха отмечена на северо-западе Якутии по данным ст. Оленек. Исследование необходимо для верификации и подбора репрезентативных климатических моделей, анализа пространственно-временной изменчивости холодного периода, прогноза и вклада в общую дисперсию температуры грунтов.

Ключевые слова: Арктическая зона Якутии, температура воздуха и грунтов, температурный режим, холодный период, разность и скорость изменения температуры воздуха, Якутия

Финансирование. Работа выполнена в рамках базового бюджетного проекта Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН по теме «Криогенные процессы и формирование природных рисков освоения мерзлотных ландшафтов Восточной Сибири» (рег. № 122011400152-7).

Для цитирования: Васильев М.С., Петрова А.Н. Температурный режим холодного периода в Арктической зоне Якутии за 1960–2022 гг. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):60–68. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-60-68>

Original article

Temperature regime of the cold period in the Arctic zone of Yakutia for 1960–2022

Mikhail S. Vasiliev^{✉,1,2}, Aleksandra N. Petrova¹

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

[✉]vms_1984@mail.ru

Abstract

Changes in the Arctic have global consequences. An increase in air temperature and a change in the cold period can affect vulnerable ecosystems with a permafrost lithogenic base in the Yakutia Arctic region. In this study, we specified the dates

of the beginning and end of the cold period in spring and autumn for two multi-year periods (1961–1990 and 1991–2022) of the northwestern and northeastern parts of the Arctic zone in Yakutia. We calculated the temperature difference and rate of change ($^{\circ}\text{C}/10$ years) for 1960–2022. We used meteorological series according to the “RIHMI-WDC” data: st. Olenek (Oleneksky ulus), st. Zhigansk (Zhigansky) st. Chokurdakh (Allaikhovsky) and st. Srednekolymsk (Srednekolymsky). For the period 1991–2022 in the northwestern part of the Arctic zone in Yakutia, a reduction in the cold period was observed due to an earlier onset in spring (May: 4 days at Olenek station and 6 days at Zhigansk station) and in the northeastern part -later autumn (September: 3 days at Chokurdakh and Srednekolymsk stations). The results of our study indicate that in April, the difference in the average air temperature between 1961 and 1990 and 1991–2022 at all stations is higher than in October. The only exception is the information obtained according to st. Chokurdakh (October– 2.6°C , April– 2.1°C). The rate of change in air temperature ($^{\circ}\text{C}/10$ years) for the period 1960–2022 at the beginning of the cold period (October), it manifested itself to a greater extent in the northeast of Yakutia (Srednekolymsk station – $0.7^{\circ}\text{C}/10$ years, Chokurdakh – $0.8^{\circ}\text{C}/10$ years). In the middle (January – $1.1^{\circ}\text{C}/10$ years) and the end (April – $1.0^{\circ}\text{C}/10$ years) of the cold period, the maximum rate of air temperature change was noted in the north-west of Yakutia according to the data of st. Olenek. This study is necessary for the verification and selection of representative climate models, the analysis of the spatiotemporal variability of the cold period, and the forecasting and contribution to the overall dispersion of soil temperature.

Keywords: Arctic zone of Yakutia, air and soil temperature, temperature regime, cold period, difference and rate of air temperature change, Yakutia

Funding. This study was supported by basic budgeted project “Cryogenic processes and the formation of natural risks in the development of permafrost landscapes in Eastern Siberia” (reg. No. 122011400152-7).

For citation: Vasiliev M.S., Petrova A.N. Temperature regime of the cold period in the Arctic zone of Yakutia for 1960–2022. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):60–68. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-60-68>

Введение

Климатически территория Арктической зоны Якутии представлена арктическим и субарктическим типами климата [1, 2]. На островах и побережье Северного Ледовитого океана под влиянием арктических воздушных масс формируется арктический океанический климат с долгой, холодной зимой (средняя температура января $-30 \dots -35^{\circ}\text{C}$) и коротким, прохладным летом (средняя температура июля $+5 \dots +10^{\circ}\text{C}$). Несмотря на небольшое годовое количество осадков (до 200 мм), для данной территории вследствие низкой испаряемости характерно избыточное увлажнение, что вызывает заболоченность грунтов. В субарктическом климатическом поясе летом господствуют умеренные воздушные массы, зимой – арктические. Зимы местами значительно суровее, чем в арктическом климате (средняя температура января -45°C и ниже), лето существенно теплее (средняя температура июля $+12^{\circ}\text{C} \dots +15^{\circ}\text{C}$). По сравнению с арктическим климатическим поясом примерно вдвое (до 400 мм и более) увеличиваются осадки с выраженным летним максимумом, а их годовое количество превышает величину испаряемости.

Среднегодовые температуры воздуха растут быстрыми темпами в Арктической зоне России. Например, рост среднегодовой температуры в Азиатской части России (побережье Северного Ледовитого океана) за 1976–2021 гг. составил от $+0,8$ до $+1,1^{\circ}\text{C}/10$ лет на Таймыре и побережье Восточно-Сибирского моря [3]. Рост температу-

ры воздуха может, в целом, оказать влияние на уязвимую экосистему с многолетнемерзлой литогенной основой Арктической зоны Якутии. Однако по своей физической сущности многолетнемерзлые породы – это устойчивая природная система, в глубь которой различные колебания поверхностных условий распространяются неглубоко (медленно) и быстро затухают [4]. С ростом температуры приземного слоя атмосферы следует опасаться перехода температуры поверхностных мерзлых пород в область положительных значений и, как следствие, увеличения слоя летнего оттаивания грунтов и/или начала протаивания многолетнемерзлых пород сверху [5]. В [6] показан и охарактеризован комплекс проблем, связанных с изменением климата и его последствиями. В [7] предполагается, что изменения комплекса метеорологических параметров на региональном уровне и атмосферной циркуляции вносят решающий вклад в динамику температуры почвогрунтов и сезонного протаивания в разные интервалы времени.

Криолитозона (территория с распространением многолетнемерзлых грунтов) является одним из ключевых элементов природной среды Арктики, в которой сосредоточены минерально-сырьевые ресурсы. Наблюдаемые изменения климата, в том числе увеличение температуры, в совокупности влияют на несущую способность многолетнемерзлых грунтов, что негативно сказывается на инфраструктуре в целом [8–10]. С увеличением температуры и таянием многолетнемерзлых

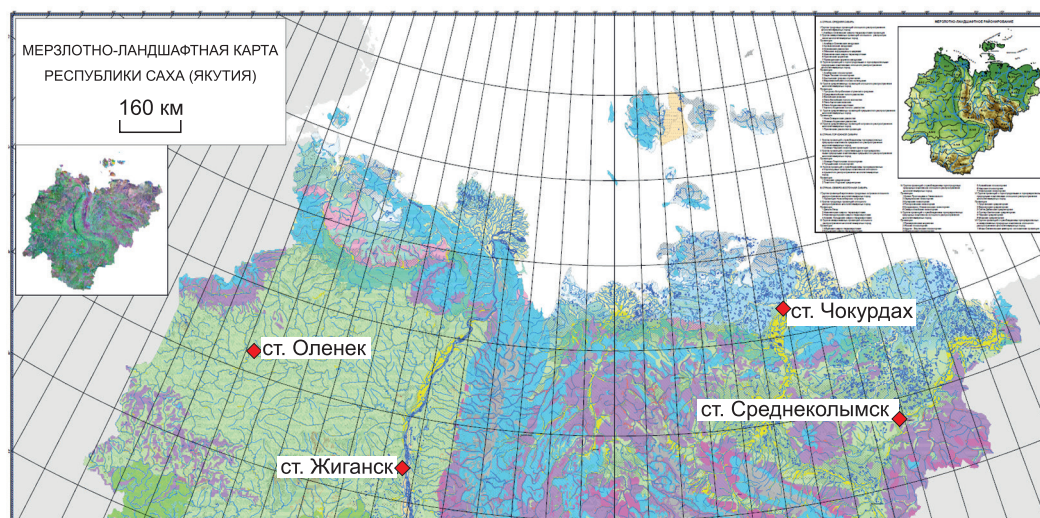


Рис. 1. Фрагмент мерзлотно-ландшафтной карты Республики Саха (Якутия) [13] с метеорологическими станциями Оленек, Жиганск, Чокурдах, Среднеколымск. В верхнем правом углу – карта мерзлотно-ландшафтного районирования по различным группам провинций распространения многолетнемерзлых пород

Fig. 1. A fragment of the permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) [13] with the location of the northwestern meteorological stations – Olenek, Zhigansk and the northeastern ones – Chokurdakh, Srednekolymsk. In the upper right corner is a map of permafrost-landscape zoning for various groups of permafrost provinces

грунтов связаны деструктивные и опасные процессы: термокарстовые просадки, береговая эрозия, оползни, заболачивание, гибель лесных массивов, формирование и исчезновение озер.

Для оценки процессов, происходящих в Арктической зоне Якутии, необходим комплексный анализ пространственно-временной динамики температуры воздуха и грунтов, а также ее влияния на состояние транспортной инфраструктуры, в том числе сезонных автомобильных дорог (автозимники), сроки (открытие, закрытие, грузоподъемность) ледовых переправ [11]. Например, разрушение покрытия автодорог может быть связано с повышением температуры воздуха в холодный период года и частыми переходами через 0°C .

Цель работы – выявление дат начала и окончания холодного периода весной и осенью в двух многолетних периодах (1961–1990 и 1991–2022 гг.) для северо-западной и северо-восточной частей Арктической зоны Якутии с расчетом разности температур и скорости изменения ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) за 1960–2022 гг.

Материалы и методы исследования

Для выявления изменений, происходящих в холодный период в Арктической зоне Республики Саха (Якутия), проанализированы метеорологические ряды по данным Всероссийского на-

учно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», <http://meteo.ru/>) – метеостанциям, находящимся в ведении Якутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «Якутское УГМС», <https://ykuthydromet.ru/>): ст. Оленек (Оленекский район), ст. Жиганск (Жиганский), ст. Чокурдах (Аллайховский) и ст. Среднеколымск (Среднеколымский) [12].

Метеостанции (рис. 1) расположены в северо-западной части Якутии с незначительными возвышенностями Среднесибирского плоскогорья (ст. Оленек и ст. Жиганск) и северо-восточной – за хребтами Верхоянский и Черского (ст. Чокурдах и ст. Среднеколымск). Северо-западные станции Оленек и Жиганск относятся к группам северотаяжных (Оленекская увалистая) и среднетаяжных (Вилуйская аласная) провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород, соответственно. Северо-восточные станции Чокурдах и Среднеколымск относятся к группам тундровых (Нижнеиндигирская озерно-термокарстовая) и северо-таяжных (Колымская озерно-термокарстовая) провинций сплошного распространения многолетнемерзлых пород соответственно [13].

В настоящее время нет единого критерия для определения холодного периода (полугодия). Для

анализа термического режима холодного периода необходима его интерпретация. По методике, принятой в Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (<http://voeikovmgo.ru/>) [1], чаще всего за холодный период принимают отрезок времени со среднесуточной температурой ниже 0 °С. Но, например, для европейской территории России, где переходный период может быть продолжительным, возникают сложности с определением даты устойчивого перехода через 0 °С. В условиях арктического и субарктического климата изменение температуры в переходные сезоны имеет четкую направленность в сторону роста весной и спада осенью, что упрощает задачу определения даты начала и окончания холодного периода.

Многолетние периоды для анализа климатических характеристик (периоды, в которых средняя величина метеозлемента получена статистически из многолетнего ряда наблюдений в данной местности) – 1961–1990 и 1991–2022 гг. выбраны согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО), расчет климатических норм ведется путем осреднения

за период 30 лет. На 16-й сессии ВМО в 2014 г. было решено, что промежуток 1961–1990 гг. остается базовым и стабильным периодом, который необходимо обновлять каждые 10 лет. В настоящей работе многолетний период климата 1991–2020 гг. увеличен до 1991–2022 гг.

Результаты и обсуждение

В районах Якутии, включенных в АЗРФ, холодный период длится с конца сентября по май, причем в последние десятилетия происходит сокращение его продолжительности (табл. 1). Исходя из рассматриваемых периодов (1961–1990 и 1991–2022 гг.) можно отметить, что на северо-западе Арктической зоны Якутии (станции Оленек, Жиганск) сокращение холодного периода происходит за счет более раннего наступления положительных температур весной (май), а на северо-востоке (станции Чокурдах Среднеколымск) – более позднего наступления холодов осенью (сентябрь). Например, в районе национального природного парка «Ленские столбы», расположенного в Хангаласском улусе Республики Саха (Якутия) в 104 км от г. Покровск (61°29' с.ш.

Таблица 1

Даты начала и окончания холодного периода по метеостанциям

Table 1

Dates of the beginning and end of the cold period according to weather stations

Метеостанция	Координаты: широта/долгота	Первый день с температурой ≤ 0 °С		Последний день с температурой ≤ 0 °С	
		1961–1990 гг.	1991–2022 гг.	1961–1990 гг.	1991–2022 гг.
Оленек	68°30'/112°26'	24 сент.	25 сент.	23 мая	19 мая
Жиганск	66°46'/123°24'	26 сент.	27 сент.	11 мая	5 мая
Чокурдах	70°37'/147°53'	20 сент.	23 сент.	29 мая	27 мая
Среднеколымск	67°27'/153°43'	26 сент.	29 сент.	13 мая	12 мая

Таблица 2

Среднее значение разности температуры (°С)
между 1961–1990 и 1991–2022 гг. по метеостанциям

Table 2

Average temperature difference (°C)
between 1961–1990 and 1991–2022 by weather stations

Метеостанции	Октябрь	Январь	Апрель	Холодный период (октябрь–апрель)
Оленек	1,5	3,6	3,0	2,0
Жиганск	0,9	2,4	2,5	1,3
Чокурдах	2,6	1,2	2,1	1,7
Среднеколымск	2,1	0,7	2,8	0,8

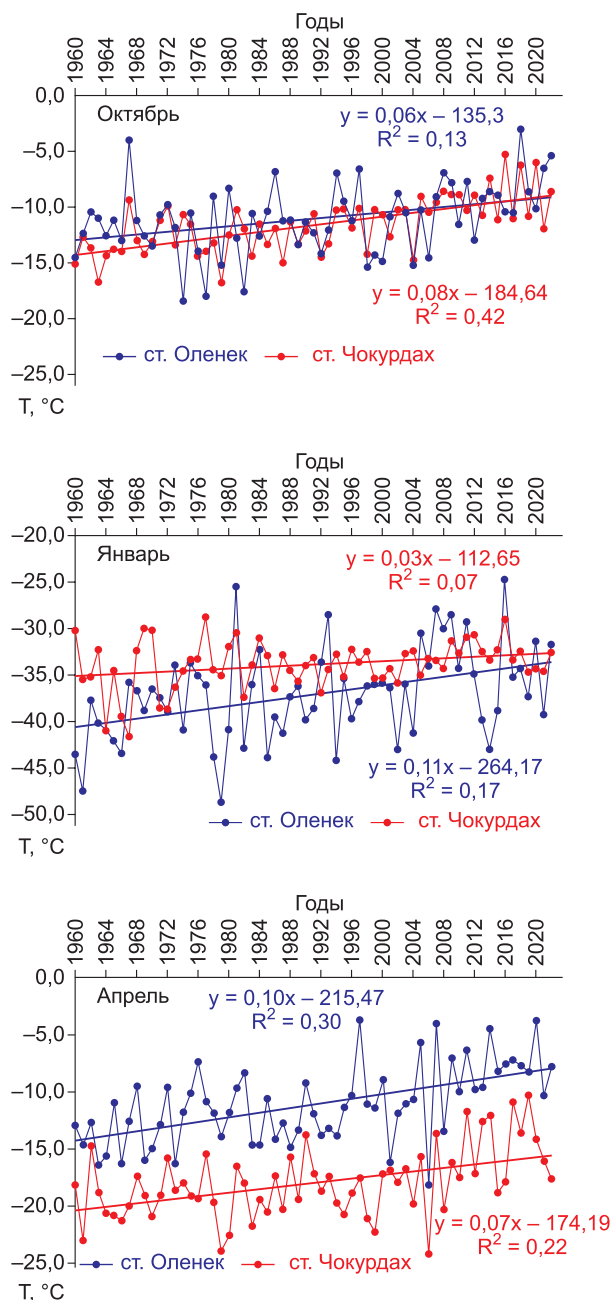


Рис. 2. Среднемесячная температура воздуха по данным ст. Оленек и ст. Чокурдах за 1960–2022 гг.

Fig. 2. The average monthly air temperature according to st. Olenyok and st. Chokurdakh for the period 1960–2022

129°09' в.д. – умеренный климатический пояс), за 1961–2020 гг. происходило сокращение продолжительности холодного периода за счет более раннего перехода среднесуточной температуры воздуха через 0 °C весной (апрель) [14].

Для оценки изменения температурного режима в холодный период (октябрь–апрель – с учетом среднесуточной температуры воздуха за весь

месяц ≤ 0 °C) между 1961–1990 гг. и 1991–2022 гг. проведены расчеты средних значений разности температуры в октябре, январе и апреле (табл. 2). В целом температура холодного периода (октябрь–апрель 1960–2022 гг.) повысилась, а среднее значение разности температур колеблется в пределах от 0,8 (ст. Среднеколымск) до 2,0 °C (ст. Оленек). В январе изменение разности среднего значения температуры воздуха между рассматриваемыми периодами больше выражено на северо-западе (ст. Оленек – 3,6 °C), для сравнения, на ст. Среднеколымск (северо-восток) разность составила 0,7 °C.

Наибольшие изменения в температурном режиме между двумя рассматриваемыми периодами наблюдаются в апреле. В целом в апреле разность средней температуры воздуха между 1961–1990 и 1991–2022 гг. на всех рассматриваемых станциях выше, чем в октябре, за исключением ст. Чокурдах (октябрь – 2,6, апрель – 2,1 °C). Предполагаем, что в температурном режиме Арктической зоны Якутии (рис. 2) с положительной тенденцией роста проявляются территориальные различия, определяемые региональными особенностями атмосферной циркуляции, характером рельефа, близостью и/или удаленностью от Северного Ледовитого океана и т. п. [15].

Скорость изменения температуры воздуха (°C/10 лет) за 1960–2022 гг. в начале холодного периода (октябрь) выше на северо-востоке Якутии (табл. 3). В середине (январь) и конце (апрель) холодного периода максимальная скорость изменения температуры воздуха за рассматриваемый период наблюдается на северо-западе Якутии по данным ст. Оленек.

Увеличение температуры воздуха в холодный период приводит к большему изменению температуры грунта, чем в теплый (значительная часть тепла уходит на фазовые переходы при его оттаивании, а не на нагревание). Связано это с тем, что коэффициент теплопроводности мерзлого грунта зимой выше (отсутствуют также сезонно-талый слой и затраты тепла на фазовые переходы), чем талого. В [16] по ряду станций сети Росгидромета за 1966–2012 гг. показан вклад температуры воздуха и суммы осадков холодного периода в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см (рис. 3). В настоящей работе подобный анализ не проведен, так как по имеющейся информации («ВНИИГМИ-МЦД») на рассматриваемых метеорологических станциях (температура грун-

тов до глубины 320 см) нет существенных (временных) изменений по набору данных – в наличии промежуточные данные до 2014 г.

Видно (см. рис. 3, а), что на территории Восточной Сибири, вклад изменений температуры воздуха (холодный период) в температуру грунтов на глубине 160 см составляет 5–15 %, а на большей части Республики Саха (Якутия), в том числе в Арктической зоне – 5–9 %.

В [17] для северных территорий России (рис. 4) проведен анализ изменения продолжительности ледовых явлений, ледостава и максимальной толщины льда по сценарию модели RCP 8.5 (использованы элементы зависимостей ледового режима от суммы отрицательных температур воздуха, характеристик оттепелей и количества твердых осадков) к концу XXI века.

Согласно этому сценарию, в Арктической зоне Якутии ожидается уменьшение продолжительности ледостава на 30–40 сут. с максимальным проявлением в северо-восточной части.

В дальнейшем планируется подбор репрезентативных климатических моделей [18, 19] в Арктической зоне Якутии для анализа (с применением комплекса абиотических факторов неживой природы) пространственно-временной изменчивости температурного режима холодного периода с выявлением причинно-следственных связей, прогноза и вклада в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов.

Заключение

Установлено, что за 1991–2022 гг. в северо-западной части Арктической зоны Якутии наблюдалось сокращение холодного периода за счет более раннего наступления тепла (май: ст. Оленек – на 4 сут., ст. Жиганск – на 6 сут.), а на северо-востоке – более позднего наступления холодов осенью (сентябрь: ст. Чокурдах и ст. Среднеколымск – на 3 сут.).

Таблица 3
Скорость изменения
температуры воздуха (°C/10 лет)
за 1960–2022 гг. по метеостанциям

Table 3
The rate of change in air temperature (°C/10 years)
for the period 1960–2022 by weather stations

Метеостанция	Октябрь	Январь	Апрель
Оленек	0,6	1,1	1,0
Жиганск	0,4	0,5	0,8
Чокурдах	0,8	0,4	0,8
Среднеколымск	0,7	0,3	0,9

В целом результаты исследования указывают, что в апреле разность средней температуры воздуха между 1961–1990 и 1991–2022 гг. на всех рассматриваемых станциях выше, чем в октябре, за исключением ст. Чокурдах (октябрь – 2,6, апрель – 2,1 °C). Предполагаем, что в температурном режиме Арктической зоны Якутии проявляются территориальные различия, определяемые региональными особенностями атмосферной циркуляции, характером рельефа, близостью и/или удаленностью от Северного Ледовитого океана и т.п.

Скорость изменения температуры воздуха (°C/10 лет) за 1960–2022 гг. в начале холодного периода (октябрь) была выше на северо-востоке Якутии (ст. Среднеколымск – 0,7, ст. Чокурдах – 0,8 °C/10 лет). В середине (январь – 1,1 °C/10 лет)

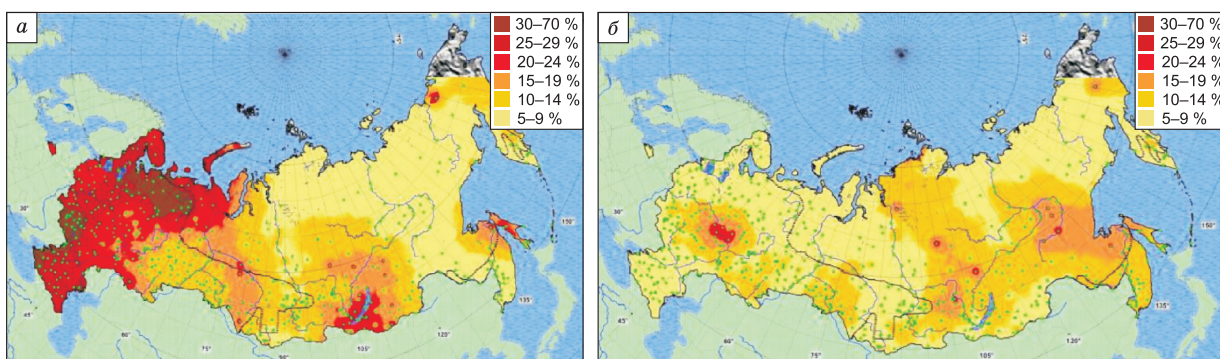


Рис. 3. Вклад температуры воздуха (а) и суммы осадков (б) холодного периода в общую дисперсию среднегодовой температуры грунтов на глубине 160 см в России за 1966–2012 гг. Источник [16]

Fig. 3. The contribution of air temperature (a) and total precipitation (b) of the cold period to the total dispersion of the average annual soil temperature at a depth of 160 cm in Russia for the period 1966–2012. Source [16]

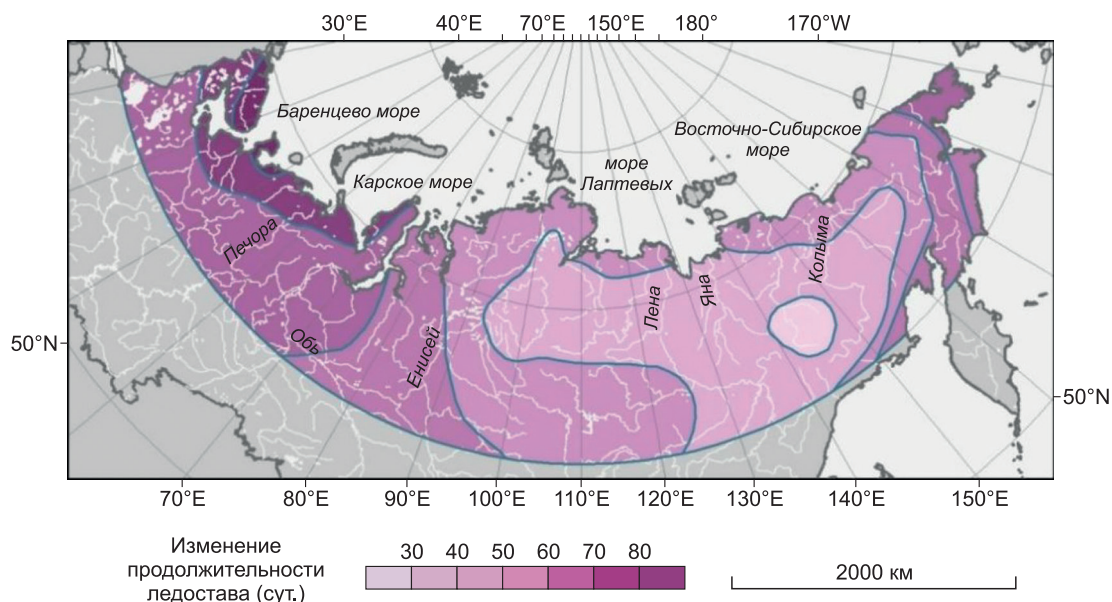


Рис. 4. Оценка изменения продолжительности ледостава к концу XXI века (сценарий RCP 8.5) по сравнению с 1986–2005 гг. Расчеты проводились по сетке с пространственным разрешением 1,75° широты и долготы. Источник [17]

Fig. 4. Estimation of a change in the duration of the ice cover period (days) by the end of the 21st century in comparison with the period of 1986–2005. The calculations were carried out on a grid with a spatial resolution of 1,75° latitude and longitude. Source [17]

и конце (апрель – 1,0 °C/10 лет) холодного периода максимальная скорость изменения температуры воздуха отмечена на северо-западе Якутии по данным ст. Оленек.

Список литературы / References

1. Кобышева Н.В., Акентьева Е.М., Богданова Э.Г. и др. *Климат России*. СПб.: Гидрометеиздат; 2001. 654 с.

Kobysheva N.V., Akent'eva E.M., Bogdanova E.G., et al. *Climate of Russia*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2001. 654 p. (In Russ.)

2. Сорокина В.Н., Гушина Д.Ю. *География климатов*. М.: Издательство Московского университета; 2006. 68 с.

Sorokina V.N., Gushchina D.Yu. *Geography of climates*. Moscow: Moscow University Publishing House; 2006. 68 p. (In Russ.)

3. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.; 2022:104. <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (дата обращения 01.09.2023).

A report on climate features in the territory of the Russian Federation in 2021. Moscow. 2022:104. (In Russ.). <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20220324/4/Doklad.pdf> (accessed 01.09.2023)

4. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Кому выгодны страшилки о причинах «глобального потепления климата». *Климат и природа*. 2021;4(41):13–25.

Shats M.M., Skachkov Yu.B. Who benefits from horror stories about the causes of «global warming». *Climate and nature*. 2021;4(41):13–25. (In Russ.)

5. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Последствия динамики современного климата Севера для многолетнемерзлых пород. *Известия Алтайского отделения Русского географического общества*. 2017;3(46):38–53.

Shats M.M., Skachkov Yu.B. Consequences of the dynamics of the modern climate of the North for permafrost. *Izvestia of the Altai Branch of the Russian Geographical Society*. 2017;3(46):38–53. (In Russ.)

6. Шац М.М., Скачков Ю.Б. Мнимые и реальные природные проблемы при адаптации к изменениям климата. *Климат и природа*. 2021;1(38):5–24.

Shats M.M., Skachkov Yu.B. Imaginary and real natural problems in adapting to climate change. *Climate and nature*. 2021;1(38):5–24. (In Russ.)

7. Шерстюков А.Б., Шерстюков Б.Г. Пространственные особенности и новые тенденции в изменениях термического состояния почвогрунтов и глубины их сезонного протаивания в зоне многолетней мерзлоты. *Метеорология и гидрология*. 2015;2:5–12.

Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G. Spatial features and new trends in changes in the thermal state of soils and the depth of their seasonal thawing in the permafrost zone. *Meteorology and hydrology*. 2015;2:5–12. (In Russ.)

8. Хрусталева Л.Н., Пармузин С.Ю., Емельянова Л.В. *Надежность северной инфраструктуры в условиях меняющегося климата*. М.: Университетская книга; 2011. 260 с.

- Khrustalev L.N., Parmuzin S.Yu., Emelyanova L.V. *Reliability of northern infrastructure in a changing climate*. Moscow: Universitetskaya kniga; 2011. 260p. (In Russ.)
9. Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: A GIS-based landscape approach to geotechnical modeling. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 2012;44;3:368–380.
10. Streletskiy D.A., Anisimov O.A. Vasiliev A.A. *Permafrost degradation*. In: Haeberli W. and Whiteman C. (eds.). *Snow and Ice-Related Risks, Hazards and Disasters*. Oxford: Elsevier. 2014:303–344.
11. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб.; 2017:106. <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (дата обращения 01.09.2023).
- Report on climate risks in the Russian Federation. *Saint Petersburg*. 2017:106. (In Russ.). <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (accessed 01.09.2023)
12. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Специализированные массивы данных для климатических исследований [Электронный ресурс]. <http://aisori-m.meteo.ru/> (дата обращения 01.09.2023).
- [RIHMI-WDC. *Specialized data arrays for climate research [Electronic resource]*. (In Russ.). URL: <http://aisori-m.meteo.ru/> (accessed 01.09.2023)].
13. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000. Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А. и др.; гл. ред. М.Н. Железняк. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2018. <https://mpi.ysn.ru/images/mlk20182.pdf> (дата обращения 01.09.2023).
- Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Scale 1: 1 500 000. Fedorov A.N., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A. et al. Ch. ed. M.N. Zheleznyak. Yakutsk: MPI SB RAS; 2018. (In Russ.). URL: <https://mpi.ysn.ru/images/mlk20182.pdf> (accessed 01.09.2023)
14. Петрова А.Н., Ефимова Ю.В., Шишкина Т.Р. Особенности термического режима холодного полугодия в районе национального парка «Ленские столбы». В кн.: *Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 22-24 октября 2020 г.* СПб.; 2020. С. 224–226.
- Petrova A.N., Efimova Yu.V., Shishkina T.R. Features of the thermal regime of the cold half-year in the area of the Lena Pillars National Park. In: *Modern problems of hydrometeorology and environmental monitoring in the CIS: Collection of abstracts of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the Russian State Hydrometeorological University*. 2020:224–226. (In Russ.)
15. Васильев М.С., Николашкин С.В. Исследование проявления солнечно-земных связей на приземную температуру воздуха в Якутии по данным метеорологических станций. *Наука и образование*. 2014; 2(74):124–130.
- Vasiliev M.S., Nikolashkin S.V. Study of the manifestation of solar-terrestrial relations on the surface air temperature in Yakutia according to the data of meteorological stations. *Nauka i Obrazovanie*. 2014;2(74):124–130. (In Russ.)
16. Анисимов О.А., Жирков А.Ф., Шерстюков А.Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике. *Арктика XXI век. Естественные науки*. 2015;2(3):24–47.
- Anisimov O.A., Zhirkov A.F., Sherstyukov A.B. Modern changes in the cryosphere and natural environment in the Arctic. *Arctic XXI century. Natural Sciences*. 2015;2(3):24–47. (In Russ.)
17. Agafonova S.A., Frolova N.L., Surkova S.V., Koltermann K.P. Modern characteristics of the ice regime of Russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century. *Geography, Environment, Sustainability*. 2017;10(4):4–15. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-4-4-15>.
18. Васильев М.С., Николашкин С.В., Каримов Р.Р. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2014;11(6):82–88.
- Vasiliev M.S., Nikolashkin S.V., Karimov R.R. Comparison of surface air temperature in Yakutia according to reanalysis and ground-based observations. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2014;11(5):19–29. (In Russ.)
19. Тананаев Н.И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия). *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле*. 2023;2(30):88–101.
- Tananaev N.I. Selection of the optimal climate reanalysis model based on the average annual air temperature for the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series: Earth Sciences*. 2023;30(2):88–101. (In Russ.)

Об авторах

ВАСИЛЬЕВ Михаил Семенович, кандидат географических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

М. С. Васильев, А. Н. Петрова • Температурный режим холодного периода в Арктической зоне Якутии...

ПЕТРОВА Александра Николаевна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0809-1045>, e-mail: aleksandrap@mpi.ysn.ru

About the authors

VASILIEV, Mikhail Semenovich, Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0542-9813>, ResearcherID: AAY-5159-2020, Scopus Author ID: 56513537700, SPIN: 3954-6428, e-mail: vms_1984@mail.ru

PETROVA, Aleksandra Nikolaevna, Researcher, Laboratory of Cryogenic Landscapes, <https://orcid.org/0000-0002-0809-1045>, e-mail: aleksandrap@mpi.ysn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 04.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 27.09.2023

Принята к публикации / Accepted 16.01.2024

УДК 624.131.433

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Оригинальная статья

Воздействие циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей песка с высокодисперсной глиной

А. Л. Невзоров[✉], Ю. В. Саенко, А. М. Ширанов, С. В. Чуркин

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Архангельск, Российская Федерация
[✉]a.l.nevzorov@yandex.ru

Аннотация

Для изоляции твердых бытовых и промышленных отходов используются смеси песков с высокодисперсными глинами. В отличие от природных глинистых грунтов им присущи однородность состава, удобоукладываемость, высокие деформационно-прочностные характеристики. Целью настоящих исследований было изучение воздействия на водопроницаемость указанных смесей циклического промерзания-оттаивания. Испытывались смеси четырех типов песков с глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды, сложенной преимущественно сапонитом – слоистым минералом той же группы, что и монтмориллонит. Смеси готовились из расчета содержания глинистых частиц 4 и 8 % от массы песков. Эксперименты проводились в лабораторной установке, состоящей из четырех приборов для определения морозного пучения и водопроницаемости, размещенных в емкости с водой. В ходе опыта уровень воды в емкости постепенно снижался, обеспечивая требуемый темп перемещения фронта промерзания, или повышался для оттаивания образцов. Деформации морозного пучения смесей песков с 4 % глинистых частиц при внешней нагрузке на образцы 2 кПа составляли 10,0–16,4 %, а пять циклов промерзания-оттаивания привели к росту коэффициента фильтрации смеси в 2,0–4,7 раза. Смеси песков с 8 % глинистых частиц из-за существенно большей пучинистости испытывались под внешней нагрузкой 12 кПа, в результате увеличение коэффициента фильтрации оказалось примерно таким же, как и в первом случае, – в 1,2–2,0 раза. Эксперименты показали, что исследованные смеси могут применяться для изоляции отходов, но для устранения выявленного эффекта роста водопроницаемости водозащитный экран следует покрывать слоем инертного грунта, обеспечивающим сокращение глубины промерзания экрана и создающим на него нагрузку.

Ключевые слова: сапонит, промышленные отходы, твердые бытовые отходы, водопроницаемость грунта, промерзание-оттаивание, морозное пучение

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-27-20013).

Для цитирования: Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М., Чуркин С.В. Воздействие циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей песка с высокодисперсной глиной. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):69–79. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Original article

Effect of freeze-thaw cycles on water permeability of sand mixtures with nanoclay

Alexander L. Nevzorov[✉], Yuri V. Saenko, Alexey M. Shiranov, Sergey V. Churkin

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation
[✉]a.l.nevzorov@yandex.ru

Abstract

The mixtures of sands and nanoclays are used to isolate municipal and industrial solid wastes. Compared with natural clayey soils, these mixtures are characterized by homogeneous composition, workability, and low compressibility. This study investigated the effect of freeze-thaw cycles on their permeability. The mixtures of four sands and a

saponite clay suspension generated by diamond ore processing were studied. The mixtures were prepared on the basis of 4 % and 8 % clay from sand weight. The tests were performed using an apparatus consisting of four devices for measuring frost heave and permeability, which were placed in containers with water. The water level was decreased gradually to ensure sample freezing or increased to ensure sample thawing. The frost heave of the mixtures with 4 % clay was 10.0–16.4 % under an external load of 2 kPa, and the five freeze–thaw cycles resulted in an increase in the hydraulic conductivity by 2.0–4.7 times. The mixtures with 8 % clay were tested under a load of 12 kPa, because of their high frost susceptibility. The hydraulic conductivity increased by approximately the same value as in the first case, i.e., by 1.2–2.0 times. The experiments have shown that the examined mixtures are suitable for isolating wastes. However, to eliminate the above effect, a waterproof liner should be covered with inert soil, which would reduce the depth of frost penetration and apply the load on it.

Keywords: saponite, industrial waste, municipal solid waste, hydraulic conductivity, freezing-thawing, frost heave
Funding. This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-27-20013).

For citation: Nevzorov A.L., Saenko Y.V., Shiranov A.M., Churkin S.V. Effect of freeze–thaw cycles on water permeability of sand mixtures with nanoclay. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):69–79. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-69-79>

Введение

Для защиты геологической среды от загрязнения фильтратом на участках складирования промышленных и бытовых отходов применяют одно- или двухслойные экраны из глинистых грунтов. Недостатками таких экранов являются неоднородность состава, например, наличие в глинистом грунте линз песка или включений крупнообломочных грунтов, сложность укладки и уплотнения, а также чувствительность к атмосферным воздействиям, тем более что при постепенном заполнении участка складирования экран долгое время подвергается увлажнению и сезонному промерзанию. Причем из-за длительных оттепелей может наблюдаться более одного цикла промерзания-оттаивания в течение года, так, например, на опытном участке в Норвегии за 8 лет наблюдений грунт промерзал и оттаивал 15 раз [1].

Промерзание глинистого экрана сопровождается морозным пучением, формированием линз и прослоек льда из влаги, мигрирующей к фронту промерзания. В глине появляются микротрещины, изменяются ее микроструктура и размер пор, что ведет к увеличению водопроницаемости экрана после оттаивания [2–5]. Установлено, что наибольший эффект дает первый цикл промерзания-оттаивания, а после 4–5 циклов значения водопроницаемости практически стабилизируются [2, 3, 6–9]. В зависимости от вида и состояния глинистого грунта и режима промерзания коэффициент фильтрации может увеличиваться на один-два и даже на три порядка [10–13].

В последние десятилетия для изоляции отходов, в том числе радиоактивных, применяют песчано-бентонитовые смеси (ПБС) [14–16]. Указанным смесям кроме низкой водопроницае-

мости присущи однородность состава, удобоукладываемость, отсутствие набухания-усадки [17–19]. Существенно меньше по сравнению с глинистыми грунтами чувствительность ПБС к циклическому промерзанию-оттаиванию. В экспериментах J. Kraus и C. Venson такое воздействие привело к увеличению коэффициента фильтрации ПБС в 1,3–3,4 раза, а в полевых экспериментах A. Erickson и др. всего лишь в 1,25 раза [9, 20]. C. Chen с соавторами в опытах со смесями песка с Na-бентонитом также получил незначительное увеличение водопроницаемости, тогда как у смесей с Ca-бентонитом имел место обратный эффект [21]. Z. Zhang высказал предположение, что причиной роста водопроницаемости смесей может служить не только формирование и последующее таяние линз льда, но еще и образование агрегатов глинистых частиц [22].

В лабораторных экспериментах, связанных с морозным пучением грунтов, существенное влияние на результаты оказывает методика испытаний, в частности, температурный градиент, условия подпитки образца водой и действующая на него нагрузка.

При испытаниях на пучинистость обычно на верхнем торце образца поддерживают температуру около $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а на нижнем $1\ldots 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, что обеспечивает перемещение фронта промерзания со скоростью, близкой к природным значениям. Тем не менее, в ряде работ, связанных с изучением воздействия промерзания-оттаивания на водопроницаемость, образцы выдерживались при весьма низкой температуре – вплоть до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 7, 23, 24]. Высокий темп промерзания, конечно, не способствовал миграционному льдовыделению.

В экспериментах S. Xian и др. с испытанием на циклическое промерзание-оттаивание изоли-

рованных образцов и образцов с подпиткой водой со стороны нижнего теплого торца, т. е. по закрытой и открытой схемам, в первом случае приrost коэффициента фильтрации оказался в шесть раз меньше, чем во втором [3]. Шведские авторы для подобных испытаний предложили использовать полузакрытую схему, при которой образец изолирован снизу, но сверху ограничен пористым штампом, не препятствующим отводу поровой влаги при консолидации под нагрузкой [4]. Заметим, что закрытая и полузакрытая схемы испытаний соответствуют редко встречающемуся на практике случаю эксплуатации защитных экранов.

Рост нагрузки на образец ведет к снижению деформаций пучения и коллапсу пор, образовавшихся при таянии линз и прослоек льда. В опытах А. Othman и С. Benson нагрузка 70 кПа устраняла эффект роста водопроницаемости глинистого грунта после циклического промерзания-оттаивания [13]. Заметим, что для создания указанной нагрузки поверх экрана следует отсыпать защитный слой непучинистого грунта или слой отходов толщиной несколько метров. По данным В.Н. Жиленкова, коэффициент фильтрации глинистого грунта при отсутствии нагрузки увеличивался после промерзания-оттаивания на 2–3 порядка, а под нагрузкой 100 кПа – в 20 раз, при этом по истечении 2 суток он достигал исходного значения [11].

Источником ошибок может служить практикуемое рядом авторов применение двух приборов – для испытаний на морозное пучение и компрессионно-фильтрационного, так как свойства образцов при переносе из одного прибора в другой претерпевают существенные изменения. Устранить эту погрешность позволяют комбинированные компрессионно-фильтрационные приборы с охлаждаемым штампом, однако малая высота образцов в таких приборах не позволяет исследовать миграционное льдовыделение [6, 25]. В приборе В.Н. Жиленкова образец промораживается сверху вниз, а вода после его оттаивания фильтруется в радиальном направлении – от расположенной в центре перфорированной трубки к дренирующей оболочке [11]. Кубические образцы с размером стороны 7–8 см испытываются в приборе весьма сложной конструкции, созданном G. Hirose и Y. Ito, где нагрузка на образец прикладывается сверху, а его промораживание и поток воды при определении водопроницаемо-

сти могут быть направлены как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении [26].

Ранее нами было предложено для устройства экранов на свалках, например бытовых отходов, использовать смеси местных песков с глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды. Указанная фракция сложена преимущественно сапонитом – слоистым минералом той же группы, что и монтмориллонит, преобладающий в составе бентонита. Суспензия этой высокодисперсной глины скапливается в пруде-отстойнике хвостохранилища. Опыты показали, что возможно внесение частиц глины в слой песка при фильтрации суспензии, т. е. путем кольматации пор или перемешиванием песка с суспензией [27, 28]. Получаемый состав по водопроницаемости практически идентичен песчано-бентонитовым смесям. Внесение 4 % глинистых частиц снижает коэффициент фильтрации песка в среднем на один порядок, 8 % – на два, 16 % и более – на четыре–пять порядков.

Целью настоящих исследований было изучение эффекта циклического промерзания-оттаивания на водопроницаемость смесей местных песков с высокодисперсной глиной из отходов обогащения алмазоносной руды.

Эксперименты проводились на специально изготовленном приборе, который обеспечивал испытание водонасыщенных образцов с заданным темпом перемещения фронта промерзания и определение коэффициента фильтрации при градиентах напора до 15.

Материалы исследования

Исследовались смеси четырех типов песков различного состава и генезиса с сапонитсодержащей суспензией из прудковой зоны хвостохранилища горно-обогатительного комбината.

Гранулометрический состав песков, степень неоднородности $c_u = d_{60}/d_{10}$ и плотность частиц ρ_s приведены в таблице 1.

Твердая фаза суспензии на 92–94 % состоит из частиц размером менее 0,001 мм. В ее составе преобладает сапонит (62,8 %), присутствуют частицы кварца (7,6), монтмориллонита (7,3), палыгорскита (6,8 %) и других минералов.

Смеси готовили из расчета содержания твердой фазы суспензии 4 и 8 % от массы твердой фазы песков. При большей добавке глины испытания на водопроницаемость следует проводить при градиенте напора до 120, что требует приме-

Таблица 1

Гранулометрический состав песков

Table 1

Particle-size distribution of sands

Пески	Содержание фракций, %, с размерами частиц, мм					d_{60} , мм	d_{10} , мм	c_u	ρ_s , г/см ³
	более 0,50	0,50 – 0,25	0,25 – 0,10	0,10 – 0,05	менее 0,05				
1. Мелкий (<i>a</i>)	0,20	31,70	61,36	5,44	1,30	0,23	0,11	2,2	2,65
2. Мелкий (<i>am</i>)	0,49	13,68	64,59	12,10	9,14	0,19	0,05	3,5	2,66
3. Средней крупности (<i>f</i>)	18,82	33,36	34,04	5,85	7,93	0,34	0,07	5,0	2,66
4. Мелкий (<i>lg</i>)	0,07	0,32	82,57	12,32	4,72	0,18	0,07	2,5	2,65

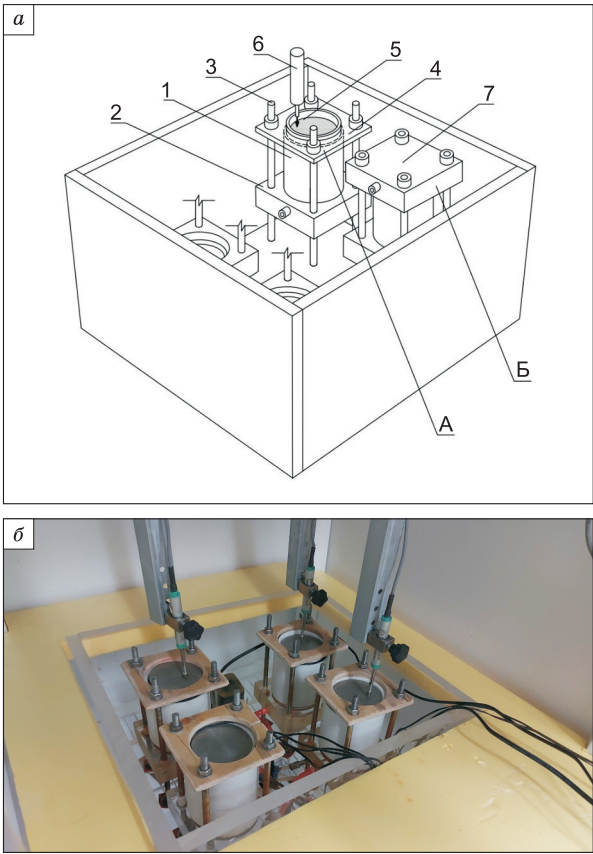


Рис. 1. Лабораторная установка: *a* – схема прибора: 1 – гильза, 2 – основание, 3 – шпилька, 4 – ограничительная пластина, 5 – штамп, 6 – датчик перемещений, 7 – крышка. Варианты сборки приборов: А – при циклическом промерзании-оттаивании, Б – при определении водопроницаемости; *б* – фото установки при циклическом промерзании-оттаивании

Fig. 1. Experimental apparatus: *a* – apparatus scheme, 1 – shell, 2 – base, 3 – screw, 4 – restrictor plate, 5 – stamp, 6 – displacement sensor, 7 – top. Apparatus assembly options: А – during cyclic freezing-thawing, Б – during determining water permeability; *б* – apparatus photo during cyclic freezing-thawing

нения весьма сложного оборудования, например камер трехосного сжатия, в которых сложно обеспечить замораживание части образцов [27, 28]. Коэффициент уплотнения смесей составлял 0,94–0,96. Испытания проводили с двух-, трехкратной повторяемостью для каждого из составов. Всего было испытано 32 образца.

Приборы и методика испытаний

Эксперименты проводили в специально созданной лабораторной установке, конструкция которой защищена патентом на изобретение [29]. Установка содержит четыре прибора для определения морозного пучения и водопроницаемости, размещенных в емкости с водой (рис. 1). В ходе опыта уровень воды в емкости постепенно снижается, обеспечивая требуемый темп перемещения фронта промерзания, или повышается, вызывая оттаивание образцов.

Каждый из приборов содержит гильзу 1 из полиэтилентерефталата, в которой размещается образец высотой 100 мм и диаметром 70 мм. Для предотвращения смерзания образца с гильзой ее внутреннюю поверхность покрывают полиэтиленом по слою парафина. Гильза устанавливается в основание прибора 2 на перфорированный диск и крепится с помощью четырех шпилек 3 и пластины 4 (вариант сборки А на рис. 1, *a*). Сверху на образец укладывается металлический штамп 5. Его перемещения измеряются с помощью закрепленного на кронштейне датчика перемещений 6.

В одном из четырех приборов в стенке гильзы выполнены каналы, через которые в образец на глубине 25, 50 и 75 мм от верхнего торца заводятся термисторы. Термисторы располагаются также под штампами на верхних торцах всех образцов.

Приборы размещаются в емкости с водой, а вся установка – в морозильной камере с температурой $-(5...6)^\circ\text{C}$. С помощью нагревательного элемента и циркуляционного насоса температура воды в емкости поддерживается в течение всего опыта $1...1,5^\circ\text{C}$.

Уровень и температура воды в емкости, температура в морозильной камере, под штампами и внутри одного из образцов, перемещение штампов регистрируются автоматически каждые 5 мин. Управление работой установки осуществляется автоматически, соответствующая программа написана на языке C++.

Уровень воды в емкости регулируется с помощью насоса, связанного через модуль управления с установленными под ее дно силоизмерительными датчиками. С помощью указанных датчиков до начала эксперимента определяют вес установки с образцами и водой, заполняющей емкость до верха образцов и до требуемой глубины их промерзания. Работа насоса программируется из условия обеспечения заданной скорости понижения уровня воды.

Для определения водопроницаемости смесей штампы 5 снимаются, на верхние торцы образцов по тканевому фильтру отсыпается дренирующий слой гравия с размером частиц $2...5\text{ мм}$. Устанавливаются и крепятся с помощью шпилек 3 крышки 7 (вариант сборки Б на рис. 1, а).

Вода подается к образцам снизу с помощью насоса со встроенным расходомером.

Собранную установку выдерживают не менее суток при температуре $1...1,5^\circ\text{C}$, после чего определяют исходную водопроницаемость смесей. Затем температуру в камере понижают до $-(4...6)^\circ\text{C}$ и опускают уровень воды в емкости со скоростью 10 мм/сут . Через 5 сут, когда он достигнет середины образцов, промораживание останавливают, поднимая уровень воды до верха образцов.

В первых опытах при циклическом промерзании-оттаивании наблюдался кумулятивный эффект – деформации пучения от цикла к циклу нарастали.

Анализ температурного режима образцов был выполнен путем численного моделирования прибора в ПК Geostudio. Решалась осесимметричная задача, где учитывались теплофизические свойства материала гильзы и образца, теплота фазовых переходов поровой влаги и влажность за счет незамерзшей воды, температурный режим в камере, температура и уровень воды в емкости (рис. 2, а). Моделирование показало, что при сохранении температуры в камере $-(5...6)^\circ\text{C}$ полностью погруженный в воду образец в течение суток полностью не оттаивал, т. е. под штампами постепенно нарастали линза льда и прослойка мерзлого грунта (рис. 2, б). На основании

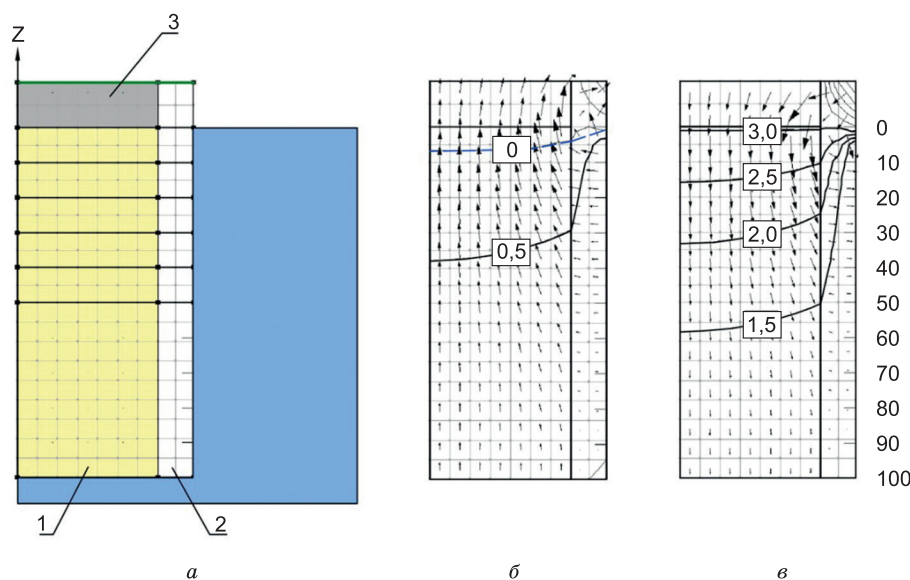


Рис. 2. Результаты численного моделирования процесса оттаивания образца: а – схема осесимметричной модели (1 – образец, 2 – гильза, 3 – штамп); б – изотермы при первом способе оттаивания образца; в – то же при втором способе

Fig. 2. Results of numerical simulation of sample thawing process: а – axisymmetric model scheme, where 1 – sample, 2 – shell, 3 – stamp; б – isotherms for the first method of sample thawing, в – the same for the second method

моделирования методику испытаний откорректировали – для полного оттаивания образцов температуру в камере поднимали до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 4 часа (рис. 2, в).

После завершения пяти циклов промерзания-оттаивания вновь определяли водопроницаемость образцов.

Результаты испытаний

Данные измерений температуры рассмотрим на примере одного из циклов промерзания-оттаивания образца смеси мелкого аллювиально-морского песка с 4 % высокодисперсной глины. Как отмечалось выше, замеры выполнялись под штампом и на глубине 25, 50 и 75 мм от верхнего торца образца каждые 5 мин. Для сокращения числа экспериментальных точек и сглаживания варьирования температуры за счет фазовых переходов поровой влаги при построении представленных на рис. 3, а графиков использовали

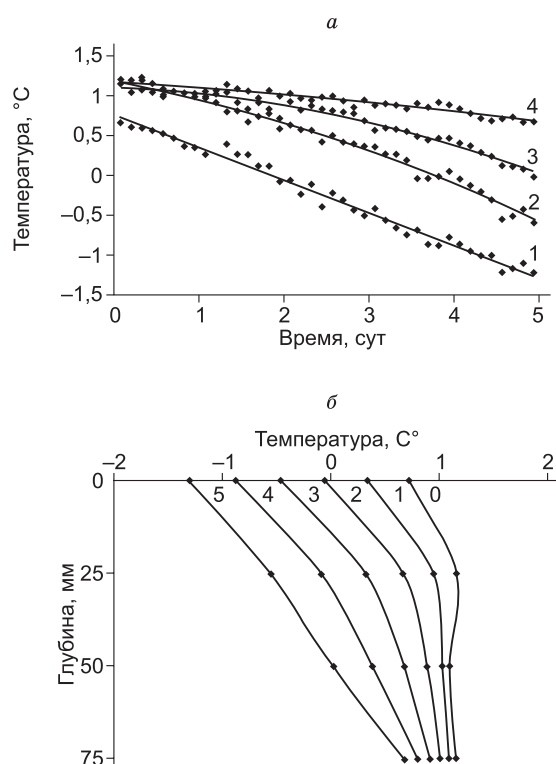


Рис. 3. Температура образца: а – изменение во времени на расстоянии от верхнего торца: 1 – 0, 2 – 25 мм, 3 – 50 мм, 4 – 75 мм; б – изменение с глубиной, числа у графиков показывают время в сутках от начала опыта

Fig. 3. Sample temperature: а – a change over time at the distance from the top end: 1 – 0, 2 – 25 mm, 3 – 50 mm, 4 – 75 mm; б – change in a depth, the numbers show the time in days from the experiment start

средние значения температуры за трехчасовые интервалы. Как видим, фронт промерзания достиг глубины 50 мм за 5 сут, т. е. средняя скорость перемещения фронта промерзания совпадает со скоростью понижения уровня воды в емкости 10 мм/сут. Начальная температура на торце образца ниже температуры воды объясняется быстрым остыванием штампа за первые три часа наблюдений при температуре в камере $-(5...6)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

С использованием представленных на рис. 3, а зависимостей построены графики посуточного изменения температуры образца (см. рис. 3, б). Их характер является типичным для подобных испытаний, несмотря на необычный способ управления темпом промерзания. Наблюдающееся выравнивание градиента температуры в верхней и средней частях образца в ходе опыта свидетельствует о незначительных тепловых потерях через стенки гильзы при понижении уровня воды в емкости даже до половины высоты образца. В противном случае температура части образца выше уровня воды была бы значительно ниже.

Далее предметом анализа стала фактическая скорость перемещения фронта промерзания. Заметим, что с некоторой погрешностью температура начала замерзания принята нами равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Графики на рис. 4 показывают, что на протяжении первых 2 суток образец не замерзал, а наблюдавшийся в это время подъем штампа был обусловлен формированием под ним линзы льда. В течение следующих 3 суток фронт промерзания перемещался со скоростью от 13 до 19 мм/сут и догнал смещающуюся со скоростью 10 мм/сут поверхность воды в емкости. В других опытах задержка с промерзанием грунта составляла 1,3–2,2 сут и в среднем составила 1,5 сут, а средняя скорость промерзания образцов была около 15 мм/сут.

Различие в скоростях понижения уровня воды в установке и фронта промерзания следует учитывать при планировании экспериментов. Точный прогноз хода промерзания может дать численное моделирование прибора. В частности, практически совпадающий с экспериментальной зависимостью график 2 на рис. 4 получен с помощью ПК Geostudio.

Деформации того же образца при циклическом промерзании-оттаивании представлены на рис. 5. В первом цикле при промерзании образца на 50 мм и давлении под штампом $p = 2\text{ кПа}$ пу-

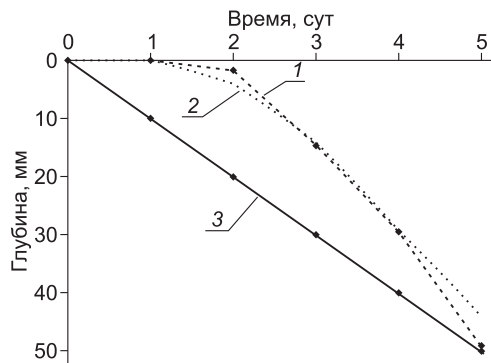


Рис. 4. Ход промерзания образца: 1 – положение нулевой изотермы по данным опыта, 2 – то же по данным численного моделирования, 3 – положение поверхности воды в емкости лабораторной установки

Fig. 4. Process of sample freezing: 1 – position of the zero isotherm according to experimental data, 2 – the same according to numerical simulation data, 3 – position of the water surface in the experimental apparatus

чение достигло 7,4 мм, исследуемая смесь показала себя как сильнопучинистый грунт, так как относительные деформации превысили 14 %. При оттаивании высота образца не достигла исходного значения – остаточные деформации составили 4,0 мм. В следующих четырех циклах деформации пучения были примерно одинаковыми и характерными для среднепучинистых грунтов – 3,0–3,1 мм или около 6 %. Деформации при оттаивании изменялись от 3,4 до 3,7 мм и в среднем составляли 3,5 мм. Превышение деформаций при оттаивании над пучением можно объяснить постепенным снижением пористости верхней части образцов, получившей значительное разуплотнение в первом цикле. Перед повторным определением водопроницаемости остаточные деформации образца составили всего лишь 2,1 мм, или 4,2 % от глубины промерзания.

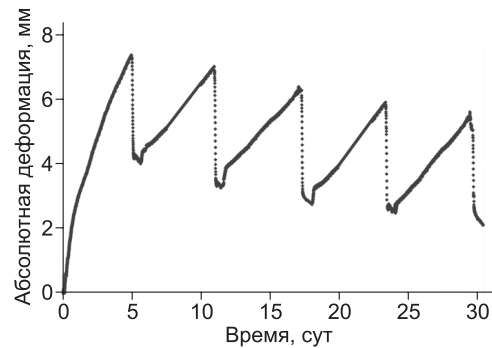


Рис. 5. Деформации образца при циклическом промерзании-оттаивании

Fig. 5. Sample deformations during cyclic freezing-thawing

Деформации морозного пучения смесей четырех песков с 4 % высокодисперсной глины изменялись в пределах 5,0–8,2 мм. Остаточные деформации после пяти циклов промерзания-оттаивания составляли 1,9–3,1 мм.

Циклическое промерзание-оттаивание привело к увеличению скорости фильтрации дистиллированной воды через образец с 0,047 м/сут до 0,063 м/сут, или в 1,34 раза.

В табл. 2 приведены средние значения коэффициентов фильтрации образцов смесей всех песков с 4 % высокодисперсной глины: в исходном состоянии – k_0 , после циклического промерзания-оттаивания – k_f . Там же даны коэффициенты фильтрации песков k_n при равных с образцами смесей коэффициентах пористости.

Известно, что при движении жидкости через двухслойный экран или, в нашем случае, через

Таблица 2
Результаты испытаний смесей песков с 4 % высокодисперсной глины, $p = 2$ кПа

Table 2

Test results for sand mixtures with 4 % nanoclay, $p = 2$ kPa

Песок	Коэффициент пористости	k_n , м/сут	Коэффициенты фильтрации смесей, м/сут			k_f/k_0	k_1/k_0	k_n/k_1
			k_0	k_f	k_1			
1. Мелкий (<i>a</i>)	0,64–0,67	1,35	0,085	0,14	0,40	1,7	4,7	3,4
2. Мелкий (<i>am</i>)	0,57–0,60	0,78	0,047	0,063	0,095	1,3	2,0	8,2
3. Средней крупности (<i>f</i>)	0,47–0,50	0,98	0,022	0,030	0,047	1,4	2,1	20,9
4. Мелкий (<i>lg</i>)	0,64–0,67	1,62	0,10	0,16	0,40	1,6	4,0	4,1

образец после циклического промерзания-оттаивания коэффициент фильтрации можно найти по формуле [30]

$$k_f = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{k_1} + \frac{h_2}{k_2}}, \quad (1)$$

где h_1 и k_1 – высота и коэффициент фильтрации подвергшейся промерзанию верхней части образца, h_2 и $k_2 = k_0$ то же оставшейся части.

В лабораторной установке образцы высотой $h = 100$ мм промораживались на 50 мм, поэтому $h_1 = h_2 = h/2$. Преобразуем приведенную формулу для вычисления коэффициента фильтрации подвергавшейся циклическому промерзанию верхней половины образца:

$$k_1 = \frac{k_f}{2 - m}, \quad (2)$$

где $m = k_f/k_2 = k_f/k_0$.

Вычисленные по формуле (2) значения k_1 и отношение k_1/k_0 приведены в табл. 2. Как видим, результатом циклического промерзания-оттаивания стало увеличение водопроницаемости смесей в 2,0–4,7 раза. Тем не менее эффект за счет внесения в пески 4 % глинистых частиц остался весьма существенным – отношение k_1/k_0 у мелких песков находится в интервале 3,4–8,2, а у песка средней крупности равно 20,9.

Эксперименты со смесями, содержащими 8 % глинистых частиц, показали, что им свойственно пучение до 10,1 мм (20,2 %) и большой прирост водопроницаемости в результате циклического промерзания-оттаивания: $k_f/k_0 > 1,6$ и $k_1/k_0 > 5$. Снизить деформации пучения можно, как отмечалось выше, за счет внешней нагрузки, поэтому испытания образцов указанных смесей проводили при давлении под штампом 12 кПа, соответствующей слою грунта толщиной примерно

0,7 м. Нагрузка позволила снизить деформации пучения до 3,0–4,8 %. Результаты опытов приведены в табл. 3.

Водопроницаемость смеси в результате циклического промерзания-оттаивания увеличилась в 1,2–2,0 раза, т. е. эффект оказался меньше, чем у смесей с содержанием глинистых частиц 4 % и давлением под штампом 2 кПа.

Обсуждение результатов

Проведенные лабораторные эксперименты показали, что исследованным смесям свойственно весьма значительное морозное пучение. Максимальные деформации пучения, когда уровень воды в приборе совпадает с фронтом промерзания, а нагрузка на образцы равна 2 кПа, у смесей песков с 4 % высокодисперсной глины достигали 10,0–16,4 % от глубины промерзания, а у смесей с 8 % глины – 14,0–20,2 %. Нагрузка 12 кПа на образцы вторых смесей позволила снизить деформации пучения до 3,0–4,8 %, что соответствует слабо- и среднепучинистым грунтам.

Результатом циклического промерзания-оттаивания стало увеличение водопроницаемости смесей. Коэффициент фильтрации смесей песков с 4 % глины увеличился в 2,0–4,7 раза, а с 8 % глины – в 1,2–2,0 раза. Тем не менее, даже с учетом воздействия периодического промерзания добавка всего лишь 4 % высокодисперсной глины позволила снизить коэффициент фильтрации мелких песков в 3,4–8,2 раза при нагрузке 2 кПа, а песка средней крупности – в 20,9 раза. У смеси с 8 % глины после промерзания под нагрузкой 12 кПа водопроницаемость оказалась меньше, чем у мелких песков, в 13–211 раз и в 516 раз, чем у песка средней крупности.

Полученные результаты необходимо учитывать при использовании исследованных смесей

Таблица 3
Результаты испытаний смесей песков с 8 % высокодисперсной глины, $p = 12$ кПа

Test results for sand mixtures with 8 % nanoclay, $p = 12$ kPa

Table 3

Песок	Коэффициент пористости	k_n , м/сут	Коэффициенты фильтрации смесей, м/сут			k_f/k_0	k_1/k_0	k_n/k_1
			k_0	k_f	k_1			
1. Мелкий (a)	0,60–0,63	1,35	$6,1 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,2	182
2. Мелкий (am)	0,53–0,57	0,78	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-3}$	1,2	1,5	211
3. Средней крупности (f)	0,45–0,48	0,98	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1,1	1,3	516
4. Мелкий (lg)	0,58–0,61	1,62	$64 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	$127 \cdot 10^{-3}$	1,3	2,0	13

в защитных экранах на участках складирования твердых бытовых отходов. Для предотвращения роста водопроницаемости под воздействием циклического промерзания-оттаивания экраны следует покрывать слоем инертного грунта, сокращающим глубину их промерзания и создающим нагрузку, ограничивающую деформации морозного пучения.

Отсыпку отходов рекомендуется производить послойно с разравниванием по всей площади участка складирования. При отсыпке сразу на полную высоту по методу «от себя», при котором в течение нескольких зимних периодов подготовленный защитный экран остается незащищенным от климатических воздействий, периодически следует выполнять дополнительное его уплотнение.

Выводы

1. Исследования в специально созданной лабораторной установке смесей четырех типов песков со сложенной преимущественно сапонитом глинистой фракцией отходов обогащения алмазоносной руды показали, что смесям свойственно весьма значительное морозное пучение. В результате циклического промерзания-оттаивания в условиях полного насыщения и под нагрузкой 2 кПа коэффициент фильтрации смесей песков с 4 % глины увеличился в 2,0–4,7 раза, а с 8 % глины под нагрузкой 12 кПа – в 1,2–2,0 раза.

2. Для устранения выявленного эффекта изоляционный экран из смеси песка и высокодисперсной глины следует покрывать защитным слоем инертного грунта, сокращающим глубину промерзания экрана и создающим на него нагрузку, а отсыпку отходов следует производить послойно с разравниванием по всей площади участка складирования.

Список литературы / References

1. Fouli Y., Cade-Menun B.J., Cutforth H.W. Freeze-thaw cycles and soil water content effects on infiltration rate of three Saskatchewan soils. *Canadian Journal of Soil Science*. 2013;93:485–496. <https://doi.org/10.4141/CJSS2012-060>
2. Xu W., Li K., Chen Lo., et al. The impacts of freeze-thaw cycles on saturated hydraulic conductivity and microstructure of saline-alkali soils. *Scientific Reports*. 2021;11:18655. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98208-0>
3. Xian Sh., Lu Zh., Yao Ha., et al. Comparative study on mechanical properties of compacted clay under freeze-thaw cycles with closed and open systems. *Advances in*

Materials Science and Engineering. 2019;2019:9206372. <https://doi.org/10.1155/2019/9206372>.

4. Makusa G., Macsik J., Holm G., Knutsson S. A laboratory test study on effect of freeze-thaw cycles on strength and hydraulic conductivity of high-water content stabilized dredged sediments. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016;53(6). <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-029>.

5. Leuther F., Schluter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties. *Soil*. 2021;7:179–191. <https://doi.org/10.5194/soil-7-179-2021>.

6. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Engineering Geology*. 1979;13(1-4):73–92. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(79\)90022-x](https://doi.org/10.1016/0013-7952(79)90022-x)

7. Ma Q., Zhang K., Jabro J.D., et al. Freeze-thaw cycles effects on soil physical properties under different degraded conditions in Northeast China. *Environmental Earth Sciences*. 2019;78(321). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8323-z>.

8. Xie Sb., Jian-jun Q., Yuan-ming, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil mechanical and physical properties in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*. 2015;12:999–1009. <https://doi.org/10.1007/s11629-014-3384-7>.

9. Kraus J.F., Benson C.H. *Effect of Freeze-Thaw on the Hydraulic Conductivity of Barrier Materials: Laboratory and Field Evaluation*. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency. National Risk Management Research Laboratory; 1995.

10. Korshunov A., Doroshenko S., Nevzorov A., Boldyrev G. Effect of freezing and thawing on soil permeability: newly equipment and experimental results. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1928:012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1928/1/012012>

11. Жиленьков В.Н. Усовершенствованная методика определения фильтрационных свойств грунтов, подвергшихся промораживанию и оттаиванию. *Геоэкология*. 2001;(4):46–51.

Zhilentkov V. Improved methodology for determining the filtration properties of soils subjected to freezing and thawing. *Geoecologiya*. 2001;(4):46–51. (In Russ.)

12. Dalla Santa G., Cola S., Tateo F., Galgaro A. Hydraulic conductivity changes in compacted clayey barriers due to temperature variations in landfill top covers. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020;(79):289302905. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01726-w>.

3. Othman M.A., Benson C.H. Effect of freeze-thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*. 1993;30(2): 236–246.

14. Chapuis R.P. The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale hydraulic performance of soil-bentonite and compacted clay liners. *Canadian Geotechnical Journal*. 2002;39(2): 417–439. <https://doi.org/10.1139/T01-092>.

15. Sakita T., Komine H., Yamada A., et al. Influence of bentonite type and producing method on hydraulic

- conductivity of sand-bentonite mixture. *E3S Web Conference*. 2020;205:10005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020510005>.
16. Kayode A.D., et al. Clay soil modification techniques for the adsorption of heavy metals in Aqueous Medium: A Review. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*. 2019;6(6):14–31. <https://doi.org/10.20431/2349-0403.0606003>.
17. Ghazi A.F. *Engineering characteristics of compacted sand-bentonite mixtures*. Edith Cowan University; 2015. 84 p.
18. Otoko G., Otoko G. The permeability of ocean sand with bentonite. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2014;2(1):1–6.
19. Proia R., Croce P., Modoni G. Experimental investigation of compacted sand-bentonite mixtures. *Procedia Engineering*. 2016;158:51–56. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.404>.
20. Erickson A., Chamberlain E., Benson C. Effects of frost action on covers and liners constructed in cold environments. *Proceedings, 17th International Madison Waste Conference*, September 21–22, 1994: University of Wisconsin-Madison, WI, 1994, pp. 198–220.
21. Chen C., Peng W., Li J., et al. Effects of freeze-thaw cycle on permeability and compression properties of aeolian soil-bentonite mixture. Preprint. 2023. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3165981/v1>.
22. Zhang Z., Ma W., Qi J.L. Structure evolution and mechanism of engineering properties change of soils under effect of freeze-thaw cycle. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*. 2013;43(6):1904–1914. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.2013.06.017>.
23. Al-Mahbashi A.M., Dafalla M., Al-Shamrani M. Long-Term Performance of Liners Subjected to Freeze-Thaw Cycles. *Water*. 2022;14(20):3218. <https://doi.org/10.3390/w14203218>.
24. Wong L.C., Haug M.D. Cyclical closed-system freeze-thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 1991;28(6):784–793. <https://doi.org/10.1139/t91-095>.
25. Konrad J.M. Hydraulic conductivity changes of a low-plasticity till subjected to freeze–thaw cycles. *Geotechnique*. 2010;60(9):679–690. <https://doi.org/10.1680/geot.08.P.020>.
26. Hirose G., Ito Y. Experimental estimation of permeability of freeze-thawed soils in artificial ground freezing. *Procedia Engineering*. 2017;189:332–337. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.053>.
27. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Модификация песка суспензией сапонитовой глины – одним из отходов алмазодобывающей промышленности. *Construction and Geotechnics*. 2022;13(4):103–115. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.4.08>.
- Невзоров А., Саенко Ю., Ширанов А. Sand modification with a saponite clay suspension as a waste of the diamond mining industry. *Construction and Geotechnics*. 2022;13(4):103–115. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2022.4.08>. (In Russ.).
28. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Кольматация песков суспензией высокодисперсных отходов алмазодобывающей промышленности. *Вестник Евразийской Науки*. 2023;15(2). URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>.
- Невзоров А., Саенко Ю., Ширанов А. Clogging of sands with a suspension of nanoclay waste of the diamond mining industry. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(2). URL: <https://esj.today/PDF/74SAVN223.pdf>. (In Russ.).
29. Патент RU 2 586 271 С1. Прибор для определения морозного пучения и водопроницаемости грунта при циклическом промерзании-оттаивании: № 2015100760/28: заявл. 01.12.2015, опубл. 06.10.2016 / Невзоров А.Л., Дорошенко С.П.
- Patent RU 2 586 271 C1. Device for determining frost heaving and soil water permeability during cyclic freezing-thawing : No. 2015100760/28 : appl. 01.12.2015, publ. 06.10.2016 / Nevzorov A., Doroshenko S.
30. Гордеев П.В., Шемелина В.А., Шулякова О.К. *Гидрогеология*. М.: Высшая школа; 1990. 447 с.
- Gordeev P.V., Shemelina V.A., Shulyakova O.K. *Hydrogeology*. Moscow: Vysshaya shkola, 1990. P. 448. (In Russ.).

Об авторах

НЕВЗОРОВ Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>, ResearcherID: J-2809-2012, Scopus Author ID: 7004203097, SPIN: 7720-1674, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

САЕНКО Юрий Викторович, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>, Scopus Author ID: 57074076400, SPIN: 2663-3634, e-mail: yuri_saenko@mail.ru

ШИРАНОВ Алексей Михайлович, ассистент, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

ЧУРКИН Сергей Владимирович, ассистент, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: s.churkin@narfu.ru

About the authors

NEVZOROV, Alexander Leonidovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-6547-2741>, ResearcherID: J-2809-2012, Scopus Author ID: 7004203097, SPIN: 7720-1674, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru

SAENKO, Yuri Viktorovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8116-014X>, Scopus Author ID: 57074076400, SPIN: 2663-3634, e-mail: yuri_saenko@mail.ru

SHIRANOV, Alexey Mikhailovich, Assistant, <https://orcid.org/0000-0002-7490-3275>, Scopus Author ID: 57219989831, SPIN: 4272-3350, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com

CHURKIN, Sergey Vladimirovich, Assistant, Department of Geotechnics, <https://orcid.org/0000-0001-7770-3140>, Scopus Author ID: 56204122200, SPIN: 5875-9608, e-mail: s.churkin@narfu.ru

Поступила в редакцию / Submitted 29.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 22.02.2024

Принята к публикации / Accepted 28.03.2024

Оригинальная статья

Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения

Л. А. Гагарин^{✉,1}, Н. Е. Баишев¹, А. Е. Мельников¹, Е.С. Николаева²

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

✉ gagarinleo@yandex.ru

Аннотация

Исследования наледей в мировой литературе последнего десятилетия сводятся к поиску региональных закономерностей их распространения, составляются каталоги наледей различных регионов. В данной статье рассмотрены новые подходы к картированию наледей с применением разностного снежного индекса NDSI на основе снимков Sentinel-2 и неполно поляризационных радиолокационных снимков Sentinel-1. С помощью поляриметрического разложения радиосигнала и с использованием неконтролируемой классификации выделены контуры наледей в мае 2018–2022 гг., рассчитана их площадь. Проведено сравнение площадей наледей обоими методами, выполнена корреляция данных. Наилучшим временем оконтуривания наледей по радиолокационным снимкам является период начала снеготаяния, первая половина мая. Лишь 10 % всех наледей имели расхождение значений их площадей менее 10 %. Они расположены в долинах рек, в которых границы наледной поляны совпадают с поймой, а ширина их составляет не менее 100 м. Отраженный радиосигнал на таких объектах характеризуется объемным рассеянием с умеренной или высокой энтропией. Основная проблема применения радиолокационных снимков в картировании наледей связана с генерализацией границ в результате классификации полигонов при поляриметрическом разложении радиосигнала. Как правило, растительность и увлажненная поверхность поймы имеют общие черты отраженного радиосигнала с наледными объектами, в связи с чем происходит объединение их границ при классификации. На основе индекса NDSI было дешифровано 237 наледей в пределах Чульманского плато, суммарной площадью 134,44 км². Оценена роль природных факторов в развитии наледообразования. Проведенные исследования являются начальным этапом изучения наледей южной части криолитозоны. В дальнейшем планируется провести классификацию наледей по источникам их питания, детализировать закономерности наледообразования в регионе. Полученные результаты исследований позволят прогнозировать наледообразование при строительстве инженерных сооружений, оценивать ресурсы подземных вод.

Ключевые слова: Sentinel-1, Sentinel-2, наледи, индекс NDSI, радиолокационный снимок, Чульманское плато

Финансирование. Методическая часть исследования выполнена по гранту РНФ (№ 22-27-20118); исследование морфометрических параметров наледей, детализация закономерностей развития наледообразования и географическое положение наледей выполнены в рамках базового проекта ИМЗ СО РАН (№ 122012400106-7).

Для цитирования: Гагарин Л.А., Баишев Н.Е., Мельников А.Е., Николаева Е.С. Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):80–95. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95>

Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment

Leonid A. Gagarin^{✉,1}, Nyurgun E. Baishev¹, Andrey E. Melnikov¹, Elizaveta S. Nikolaeva²

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉gagarinleo@yandex.ru

Abstract

Modern research on icing is focused on regional patterns of its distribution and compilation of its catalogs from different regions. This study discusses new approaches to mapping icings using NDSI based on Sentinel-2 and SAR images of Sentinel-1. Using the polarimetric decomposition of a backscatter signal and unsupervised classification, we identified the contours of the icings in May 2018–2022, and calculated their areal extent. We compared the areas of icing using both methods, and correlated the data. Only 10 % of all icings showed a difference of less than 10 % in the area values. It is located in river valleys where the boundaries of the icing field coincide with a flood plain, and their width is at least 100 m. The reflected backscatter signal at such objects is characterized by moderate or high entropy volumetric scattering. On the basis of the NDSI index, 237 icings were identified within the Chulman Plateau, with a total area of 134.44 m². We assessed the main natural controls in the development of the icing process. This is the initial stage of studying icings in the southern part of the permafrost region. Furthermore, we plan to classify icings according to their sources of nutrition and to detail the patterns of icing formation in this region. The research results will make it possible to predict the formation of icing during engineering construction and evaluate groundwater resources.

Keywords: Sentinel-1, Sentinel-2, icing, NDSI, SAR, the Chulman Plateau

Funding. The methodological part of the study was funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-27-20118); the study of morphometric parameters of icings, detailing the patterns of development of icings formation and location of icings were supported by the basic project of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS (No. 122012400106-7).

For citation: Gagarin L.A., Baishev N.E., Melnikov A.E., Nikolaeva E.S. Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):80–95. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95>

Введение

Территория Южной Якутии в последнее десятилетие активно осваивается. Растет количество мест добычи полезных ископаемых, строятся и реконструируются магистральные трубопроводы, железные и автомобильные дороги. Одним из наиболее опасных криогенных инженерно-геологических процессов этой территории является наледеобразование. При взаимодействии с инженерными сооружениями наледи деформируют мостовые опоры, приводят к просадкам насыпей, способствуют заболачиванию участков и избыточному увлажнению несущих грунтов. Для минимизации последствий воздействия наледеобразования на устойчивость линейных и промышленных сооружений необходимо знать закономерности развития этого процесса как в естественных условиях, так и при техногенных воздействиях.

Впервые исследования подземных вод и формируемых ими наледей на территории Чульман-

ского плато были проведены в 50-х г. прошлого столетия Н.А. Вельминой [1]. Ею было установлено, что наледи в пределах этого плато распространены в речных долинах и приурочены к незамерзающим источникам подземных вод. Далее работами Алданской научно-исследовательской мерзлотной станции С.Е. Суходольским, С.М. Фотиевым, В.Р. Алексеевым изучались региональные закономерности развития наледей, оценивалась внутри- и межгодовая динамика наледеобразования [2–4]. При региональных исследованиях наледей в Южной Якутии А.В. Гавриловым была предложена классификационная схема наледных ландшафтов при дешифрировании космических снимков [5, 6]. С помощью этой классификации по ландшафтными признакам А.В. Гаврилову удалось выделить генетический тип наледеобразующих вод и косвенно охарактеризовать тип водовмещающих таликов. Н.И. Чижова [7] рассчитала относительную наледность Алдано-Тимптонского междуречья и отразила ее на соответствующей кар-

те. В ходе этих исследований ею обнаружена закономерность влияния геолого-структурных, геоморфологических и мерзлотно-гидрогеологических факторов на величину наледности. Крупные работы по исследованию региональных закономерностей развития наледей Южной Якутии проводились А.Г. Топчиевым [8, 9]. Им составлена карта распространения наледей Южной Якутии, изучен их внутригодовой режим, проведена оценка естественных ресурсов подземных вод. Несмотря на это в открытом доступе карты наледей Чульманского плато в настоящее время нет.

Региональные исследования наледей южной окраины Алданского щита, начатые еще во времена строительства БАМа и проведенные позднее, обобщены М.Л. Марковым с соавторами [10]. Ими изучены особенности внутри- и межгодовой динамики наледеобразования, уточнены коэффициенты пересчета максимальных площадей наледей в конце зимы в их объемы по формуле Б.Л.Соколова, охарактеризована гидрологическая роль наледей указанной выше территории.

В последние годы работы по наледной тематике в мировом масштабе сосредоточены на составлении каталогов наледей и поиск региональных закономерностей их развития на различных континентах и в разных природных условиях [11–14].

Целью настоящей работы является модернизация метода картирования наледей с помощью радиолокационных (РЛ) снимков на примере территории Чульманского плато и применение этого метода для составления карты развития наледей и детализации закономерностей их распространения в современных климатических условиях. Результаты наших исследований будут использованы при составлении каталога наледей, усовершенствовании методики их картирования с помощью дешифрирования РЛ-изображений и оценке ее погрешности относительно общепринятого в настоящее время способа идентификации наледей разностным снежным индексом (NDSI).

Природные условия Чульманского плато

Чульманское плато расположено в пределах Нерюнгринского района Республики Саха (Якутия). Климат региона умеренно континентальный. Лето здесь длится с мая по сентябрь, а средняя годовая температура воздуха, по данным метеостанции в аэропорту г. Чульман, расположенной на высоте 844 м, составляет $-6,9^{\circ}\text{C}$. Из-за расчлененности рельефа в пределах Чуль-

манского плато характерно появление инверсии в формировании температур воздуха. В регионе, по сравнению с северными участками, выпадает повышенное количество летних атмосферных осадков, около 560 мм. Снежный покров достигает толщины в среднем 80 см, однако из-за частых ветров и метелей его мощность значительно дифференцирована в зависимости от ландшафта.

Границы Чульманского плато, расположенного в южной части Алданского щита, выделяются по морфоструктурным признакам и приурочены к контакту юрских и кембрийских отложений с архейскими и протерозойскими породами (рис. 1) [1, 15]. С севера плато ограничивается хребтом Западные Янги, с юга – Становым нагорьем, а с запада и востока – реками Алдан и Тимптон соответственно. Абсолютные высоты водоразделов изменяются от 750 до 950 м. Водоразделы плоские. Глубина вреза крупных речных долин (Чульман, Дурай, Чульмакан, Хатыми и др.) достигает 150–250 м.

В северном обрамлении Чульманского плато с поверхности залегают кембрийские закарстованные известняки. Эти породы погружаются к югу под юрские отложения. Последние представлены переслаиванием песчаников, алевроитов и алевролитов с прослоями углей. В северной части морфоструктуры юрские отложения имеют пологое залегание, в южной части осложняясь пликативной и дизъюнктивной складчатостью. Максимальная мощность этих отложений отмечена на южной границе Чульманского плато и достигает 4,5 км.

В тектоническом отношении современное Чульманское плато представляет собой Южно-Якутскую депрессию, заложенную еще в нижнеюрское время [15]. В кайнозое, на очередном этапе тектонических движений, Амурская плита начала смещаться к северу и произошел надвиг архейских пород на юрские, что и привело их к складчатому залеганию на юге. На севере же, в районе распространения кембрийских отложений, произошел крупный сброс, в результате которого юрские породы оказались опущены по сравнению с северным крылом сброса [15]. Современное положение тектонических разломов ориентировано в основном субширотно и связано с продолжающимся надвигом Амурской плиты на север.

Мерзлотно-гидрогеологические условия территории во многом предопределяются ее геолого-

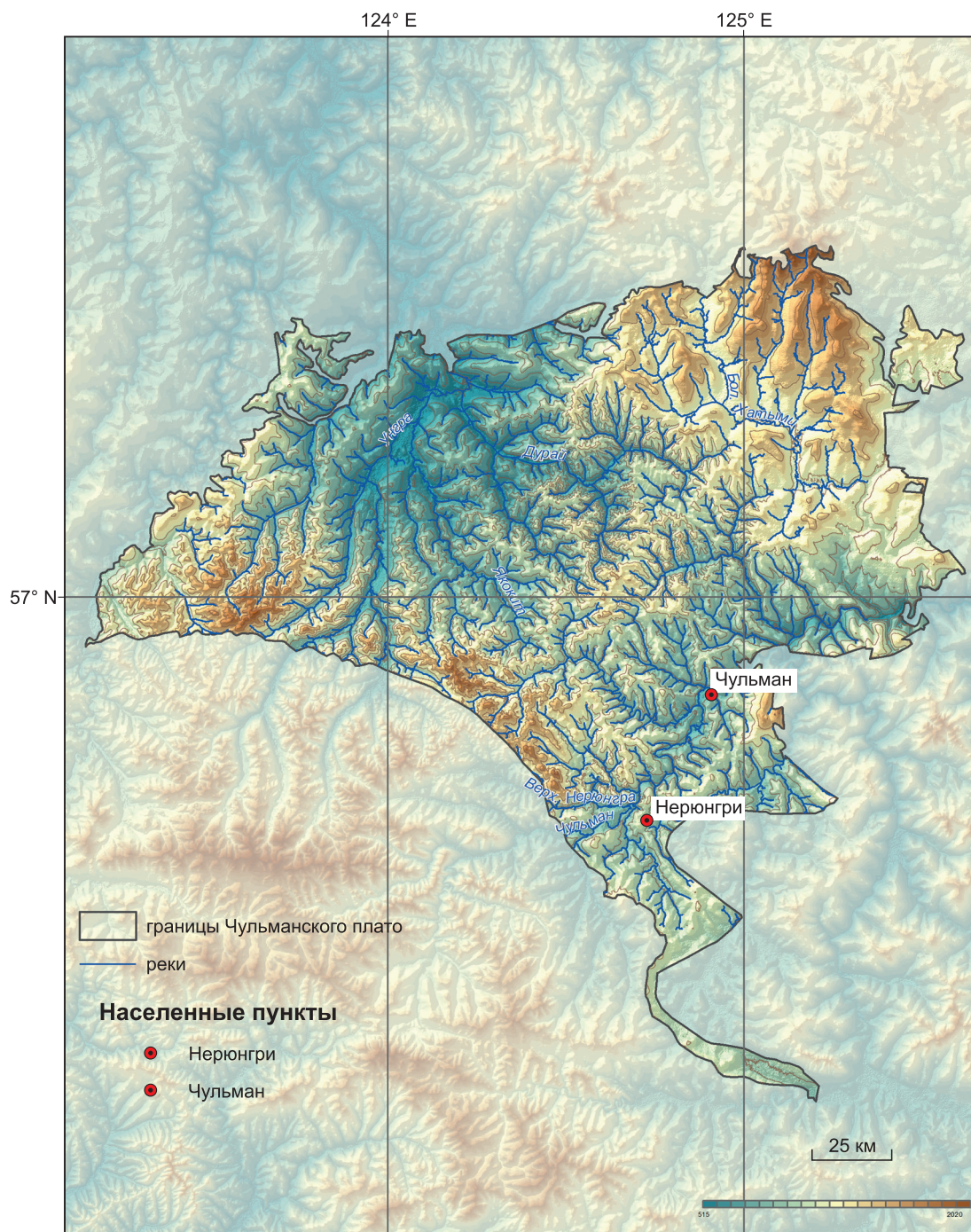


Рис. 1. Обзорная карта Чульманского плато

Fig. 1. Map of the Chulmanskoye Plateau

тектоническим строением. Адартезианский бассейн, приуроченный к Южно-Якутской депрессии (Чульманской впадине), имеет весьма высокие емкостные параметры. По отношению к многолетнемерзлым горным породам выделяются подземные воды над-, меж- и подмерзлотной цирку-

ляции. Однако, по мнению С.М. Фотиева [3], подземные воды на этой территории целесообразней подразделять по условиям их водообмена. Причиной тому служат высокая плотность и глубина проникновения тектонических разломов в пределах Чульманской впадины, способствующие

гидравлической связи указанных выше типов подземных вод. Воды зоны свободного водообмена приурочены к верхнему слою горных пород от водоразделов до уровня местных дрен (днищ рек и ручьев 1 и 2 порядков). Воды зоны затрудненного водообмена – распространены на глубинах от уровня местных дрен до уровня региональных дрен (днище долин рек Алдан и Тимптон). Глубже залегают подземные воды весьма затрудненного водообмена. Гидродинамический режим и химический состав подземных вод выделенных трех зон определяется трещиноватостью горных пород, их составом, условиями дренированности, геокриологическим строением и временем взаимодействия воды с ними. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и вод поверхностного стока. Разгрузка осуществляется, как правило, в долинах рек и ручьев. Нередко в таких местах зимой формируются полыньи и наледы. Последние, по мнению А.Г. Гаврилова [6], в основном питаются водами напорно-фильтрационных таликов, приуроченных к тектоническим разломам, а также гидрогенных грунтово-фильтрационных таликов, сконцентрированных в аллювиальных отложениях. Часто наледы образуются смешением вод указанных двух типов таликов.

Многолетнемерзлые горные породы в пределах Чульманского плато имеют прерывистое распространение. Ими охвачены склоны (за исключением южной экспозиции) и речные долины. Данными И.Д. Белокрылова и А.И. Ефимова, а позднее сотрудниками МГУ [16] установлено, что для исследуемой территории характерна высотная поясность в распределении температур горных пород. Мощность многолетнемерзлой толщи достигает 150–200 м, а их температуры, в зависимости от типов ландшафта, изменяются от 0 до –2,0 °С. Также выявлено, что на плоских водоразделах плато развиты радиационно-тепловые талики, которые являются областями питания подземных вод зоны свободного водообмена. Азонально талики приурочены к речным долинам и связаны с тепловым воздействием фильтрационного водного потока, движущегося по тектоническим разломам.

Таким образом, пространственное положение наледей в пределах Чульманского плато определяется преимущественно геолого-тектоническим строением, мерзлотно-гидрогеологическими и климатическими условиями.

Материалы исследования

При исследовании наледей нами использовались методы дистанционного зондирования Земли. Картирование наледей осуществлялось двумя способами: первый – с применением разностного снежного индекса – NDSI [11, 13], второй – с помощью поляриметрического разложения радиосигнала на основе радарных космоснимков.

Для расчета NDSI были использованы снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-2A, имеющего атмосферную коррекцию. Всего было использовано пять снимков с датой съемки май 2018–2022 гг. (табл. 1). Одним из требований к выбору снимка являлось частичное или полное отсутствие снежного покрова, чтобы выделяемые нами наледные объекты контрастировали на фоне окружающего ландшафта. Для расчета индекса использовались каналы B3 и B11, зеленый и ближний инфракрасный соответственно спутника Sentinel-2. NDSI рассчитывался по формуле

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} = \frac{(B3 - B11)}{(B3 + B11)}.$$

Пороговое его значение, позволяющее оконтуривать наледы, составило более 0,4. Далее проводилась фильтрация полученного раstra путем применения маски, которая представляет собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети, так как картируемые нами наледы расположены в долинах рек. Речная сеть рассчитывалась в программе QGIS v.3.16 по данным рельефа SRTM с разрешением 30 м. Итоговый растр с наледями векторизовался, а полученные части полигонов, принадлежащих одной наледи, объединялись. Далее в программе QGIS v.3.16 рассчитывалась их площадь.

Второй способ ранее не применялся для картирования наледей, однако имеет большой потенциал для этого. В качестве исходных данных использованы радарные изображения спутников Sentinel-1. Для поляриметрического разложения радиосигнала применены неполно поляризационные снимки уровня обработки Level-1 Single Look Complex (SLC). Они имеют перекрестную (VH) и согласованную (VV) поляризации, снятые в режиме съемки Interferometric wide swath mode (IW). Этот выбор объясняется наличием информации о фазе радиосигнала, необходимой для анализа (разложения приходящего радиосигнала на составляющие). В исследовании использовано 16 снимков с датой съемки май 2018–2022 гг.

Таблица 1

Количество и даты использованных снимков Sentinel-1 и Sentinel-2

Table 1

Number and date of Sentinel-1 and Sentinel-2 images				
Год / Year	Даты снимков / Date			Облачность, % / Air cover
	Sentinel-1	Количество / Number	Sentinel-2	
2018	11.05.2018	1	18.05.2018	5,6
	09.05.2018	1		
	04.05.2018	1		
2019	16.05.2019	1	20.05.2019	0,1
	18.05.2018	1		
2020	28.04.2020	1	27.05.2020	2,5
	16.05.2020	1		
	17.05.2020	1		
	22.05.2020	1		
	28.05.2020	1		
	03.06.2020	1		
2021	07.05.2021	1	29.05.2021	59,9
	12.05.2021	1		
	24.05.2021	1		
	29.05.2021	1		
2022	07.05.2022	2	19.05.2022	0,1

(см. табл. 1). В этот период года наледи имеют максимальные размеры, и они отображаются контрастно с окружающими ландшафтами из-за растаявшего снежного покрова.

Первичная обработка радарных снимков проведена по следующему алгоритму: уточнение параметров орбиты – радиометрическая калибровка – склеивание отдельных полос съемки – обрезка полученного снимка по полигону (при необходимости) – преобразование пикселя изображения из наклонного в наземный диапазон (Multi-looking) – создание поляриметрической матрицы ковариации и когерентности для неполно поляризационного снимка (C2) – фильтрация спекл-шума – поправка на рельеф – разложение радиосигнала по параметрам H/α – неконтролируемая классификация Уишарта по параметрам H/α для неполно поляризационного снимка. Полученная классификация отраженного радиосигнала экспортировалась в tiff-файл для последующего его анализа в QGIS v.3.16.

В основе классификационной схемы (рис. 2) лежат такие параметры, как H и α [17]. Первый

характеризует энтропию возвращенного к радару радиосигнала, второй – угол его наклона, описывающий механизм рассеяния. На рис. 2 показаны девять классифицируемых зон. Наледи в момент их таяния (май) представляют собой увлажненные поверхности с неровным микрорельефом из-за включения неоднородностей и неравномерности стаивания. Поэтому на радарных снимках от подобных объектов происходит зеркальное отражение и объемное рассеяние радиосигнала соответственно, реже двойное переотражение радиосигнала. На классификационной схеме (см. рис. 2) это 6, 9, 5, 8 и 4 зоны соответственно.

В программе QGIS v. 3.16 ранее экспортированный классифицированный tiff-файл обрабатывается следующим образом. Не применяемые в исследовании зоны классификации 1–4, 7 удаляются, а к 4, 5, 8, 6 и 9 применяется маска, представляющая собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети. Таким образом, мы отфильтровываем отличные от наледей объекты, имеющие аналогичную схему

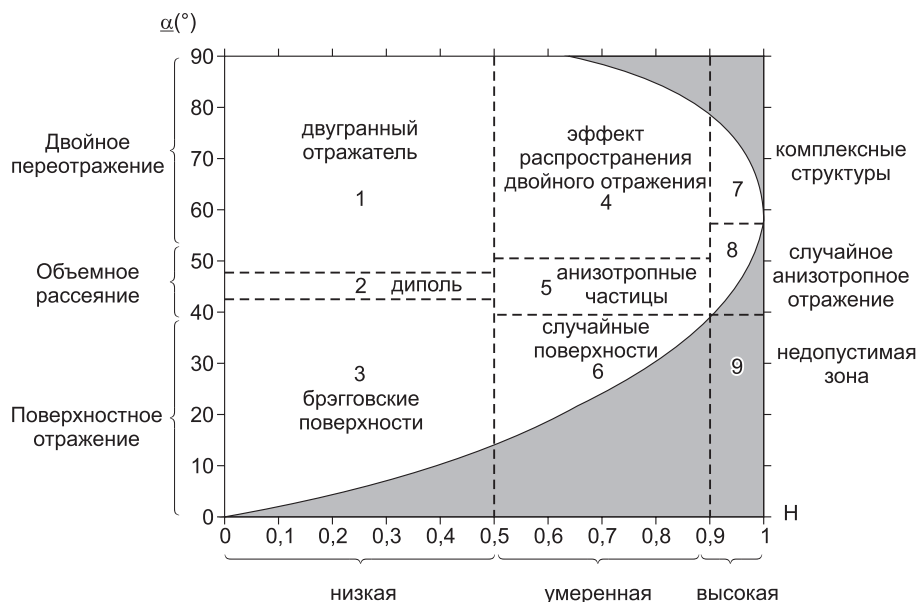


Рис. 2. Классификационная схема поляриметрического разложения радарного сигнала на снимке Sentinel-1

Fig. 2. Polarimetric decomposition classification of backscatter radar signal on Sentinel-1 image

отражения радиосигнала. В конечном итоге пиксели каждой наледи объединяются в группы и для них рассчитывается площадь полигона.

После расчета площадей наледей обоими способами проведено их сравнение между собой. Вычислено расхождение между полученными величинами.

На следующем этапе работ выполнен пространственный анализ расположения наледей Чульманского плато. Проведено исследование высотного их положения. Векторный слой наледей сравнен с слоем тектонических разломов и рыхлых и скальных отложений. Проведен анализ распределения наледей относительно порядков рек. Подобный анализ позволил предварительно оценить тип наледей по условиям их питания: наледи ключевых вод (положение наледей совпадает с разломами), грунтовых вод (положение наледей в пределах аллювиальных отложений) или смешанного типа (сочетание двух предыдущих факторов). Конечно, такая классификация наледей с помощью дистанционных методов является весьма условной и не отражает действительного природного гидрогеологического строения территории. Тем не менее, это позволит предварительно выявить общие закономерности распространения наледей в пределах Чульманского плато, наметить точки для более детального изучения их генезиса.

Для оценки климатического фактора наледообразования выполнен анализ метеоданных по метеостанции в пос. Чульман.

Результаты исследования

Идентификация наледей на РЛ-снимке. При дешифрировании наледей с помощью РЛ-снимков возможны несколько видов отраженного радиосигнала во время их весеннего таяния. Первый (рис. 3, а) обнаруживается в начале весеннего потепления (в нашем случае конец апреля–начало мая), когда средняя суточная температура воздуха еще имеет отрицательное значение, но в дневное время солнечная инсоляция приводит к таянию снежного покрова. В этот период времени наледь представляет собой ледяное тело с неровным микро- и мезорельефом, с отдельными участками излившихся на ее поверхность наледообразующих вод. От подобных объектов происходит преимущественно объемное рассеяние радиосигнала, что соответствует 8, реже 5 зонам классификации его поляриметрического разложения с высокой и умеренной энтропией соответственно (см. рис. 2). Сложнее интерпретируются участки с наледью, где ее мощность невелика и из-под нее оголяется древесная и кустарниковая растительность. Увлажненная поверхность и многочисленные ветви растений создают эффект двойного переотражения радиосигнала, обозначенный в зоне 4 классифика-

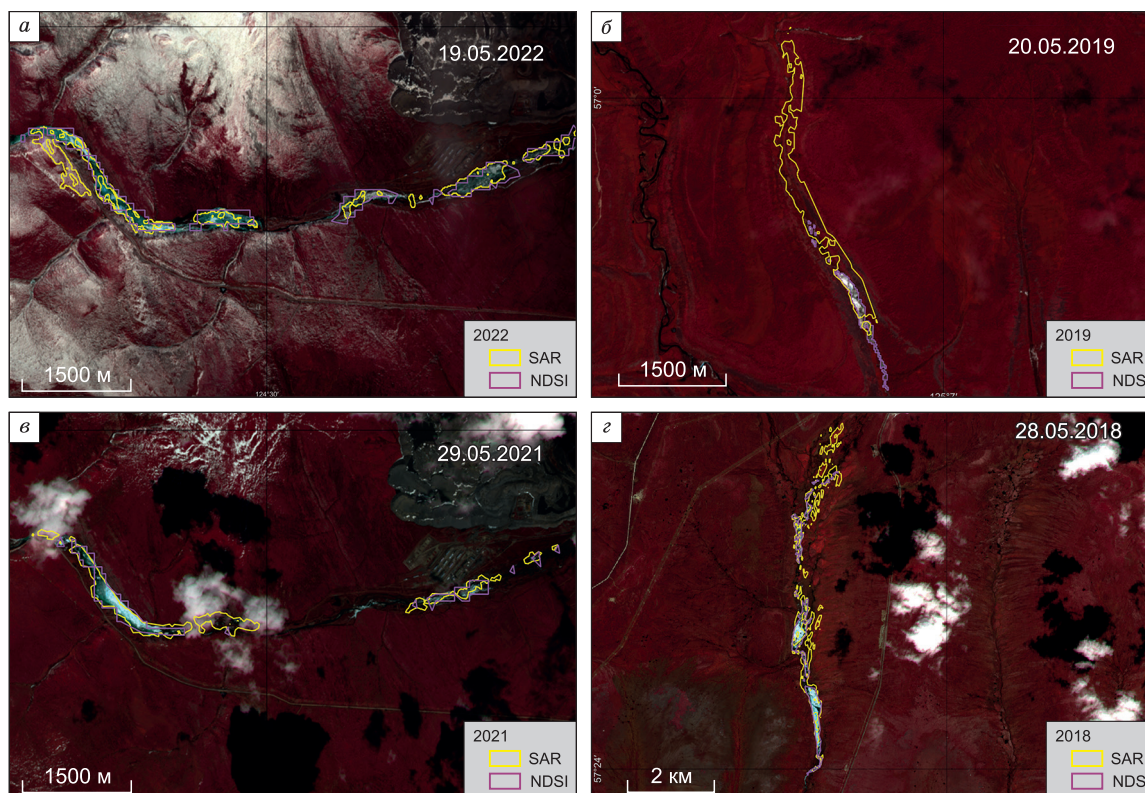


Рис. 3. Мультиспектральные изображения Sentinel-2 (синтез 3, 4 и 8 каналов) долин рек Верхняя Нерюнгра (а, в), Ингыр (б), Улахан-Муркугу (г) и границы наледей по данным РЛ-снимков (SAR) и индекса NDSI

Fig. 3. Multispectral imagery Sentinel-2 (bands 3, 4, 8) of the Verkhnyaya Nerunga River (a, в), Ingir River (б), Ulakhan-Merkugu River (г) valleys and icing areal extent based on SAR images and NDSI

ции при поляриметрическом его разложении (см. рис. 2). Также осложняют интерпретацию РЛ-снимков склоны, покрытые растительностью и увлажненные. На них создаются такие же эффекты отражения сигнала.

Второй тип отраженного радиосигнала (рис. 3, б–г) наблюдается во время активного весеннего таяния снега и начала половодья на реках (середина–конец мая). Наледь, как правило, находится в активной фазе деградации. Ее поверхность либо увлажнена (слои воды в трещинах или ее пленки на поверхности наледи), либо вовсе покрыта слоем воды (локальные озерки, участки руслового стока). При поляриметрическом разложении радиосигнала от таких объектов происходит зеркальное его отражение с умеренной или высокой энтропией, что соответствует зонам 6 и 9 классификации (см. рис. 2).

Наледи в пределах Чульманского плато расположены преимущественно в долинах рек. В связи с этим при дешифрировании наледей с помощью РЛ-снимков на речных поймах имеются объекты, схожие по характеристикам отражен-

ного от них радиосигнала. Например, влажные участки с растительностью, расположенные на поверхностях с малым уклоном (см. рис. 3, б). При поляриметрическом разложении радиосигнала они имеют черты объемного его рассеяния или двойного переотражения, что затрудняет идентификацию границ наледи в их пределах.

Также важно отметить, что контуры наледей, отрисованные по РЛ-снимкам, фиксировались площадью не меньше 10^4 м^2 . Причина этого лежит в основе применяемой методики поляриметрического разложения неполно поляризованного РЛ-изображения (перекрестной и согласованной поляризаций). Согласно расчетному алгоритму, данный способ разложения радиосигнала позволяет качественно установить его механизм без детализации его природы [18]. В связи с этим наледи среднего размера (10^3 – 10^4 м^2) и меньше на РЛ-снимках затушевываются на фоне окружающего ландшафта, происходит осреднение контуров.

Морфометрические и количественные характеристики наледей. В ходе исследования были дешифрированы контуры наледей в пределах

Таблица 2
Количество наледей и их суммарная площадь
по данным дешифрирования РЛ-снимков
и индекса NDSI

Table 2
The number of icings and their total area
according to the interpretation
of radar images and the NDSI index

Год / Year	Количество / Number		Площадь, км ² / Area, sq. km	
	SAR	NDSI	SAR	NDSI
2018	74	137	32,49	23,85
2019	47	146	34,96	23,90
2020	99	53	38,62	10,64
2021	99	46	51,48	30,10
2022	137	60	63,55	49,84

Чульманского плато по состоянию на май 2018–2022 гг. Результаты расчета их площадей отражены в табл. 2. За исследуемый отрезок времени было идентифицировано 237 наледей. Из года в год их количество различалось значительно. Причиной тому служат как естественные природные условия, глубина сезонного промерзания горных пород, дебит родников и др.), так и облачность и не стаявший снежный покров на космических изображениях. В связи с этим, количество наледей, рассчитанных по индексу NDSI и указанных в табл. 2 по каждому году, оказалось, вероятно, заниженным.

Суммарная максимальная площадь всех наледей Чульманского плато за 2018–2022 гг. составила 134,44 км². Площади наледей в разные годы, оцененные первым и вторым методами, различаются в 1,5–3 раза (см. табл. 2). Это связано с несоответствием дат используемых РЛ- и мультиспектральных снимков. Наибольший промежуток времени съемки составлял до 7 и 12 дней в 2020 и 2022 гг. соответственно. Причиной тому, во-первых, являлась высокая облачность над объектом исследования в течение мая на мультиспектральных снимках Sentinel-2. Во-вторых, неоднозначность интерпретации изображений Sentinel-1 на участках увлажненной поймы, граничащей с наледями.

Согласно классификации наледей по их площади Н.И. Толстихина [19] в пределах Чульманского плато получены следующие данные (рис. 4). Больше всего наледей очень крупных (141 на-

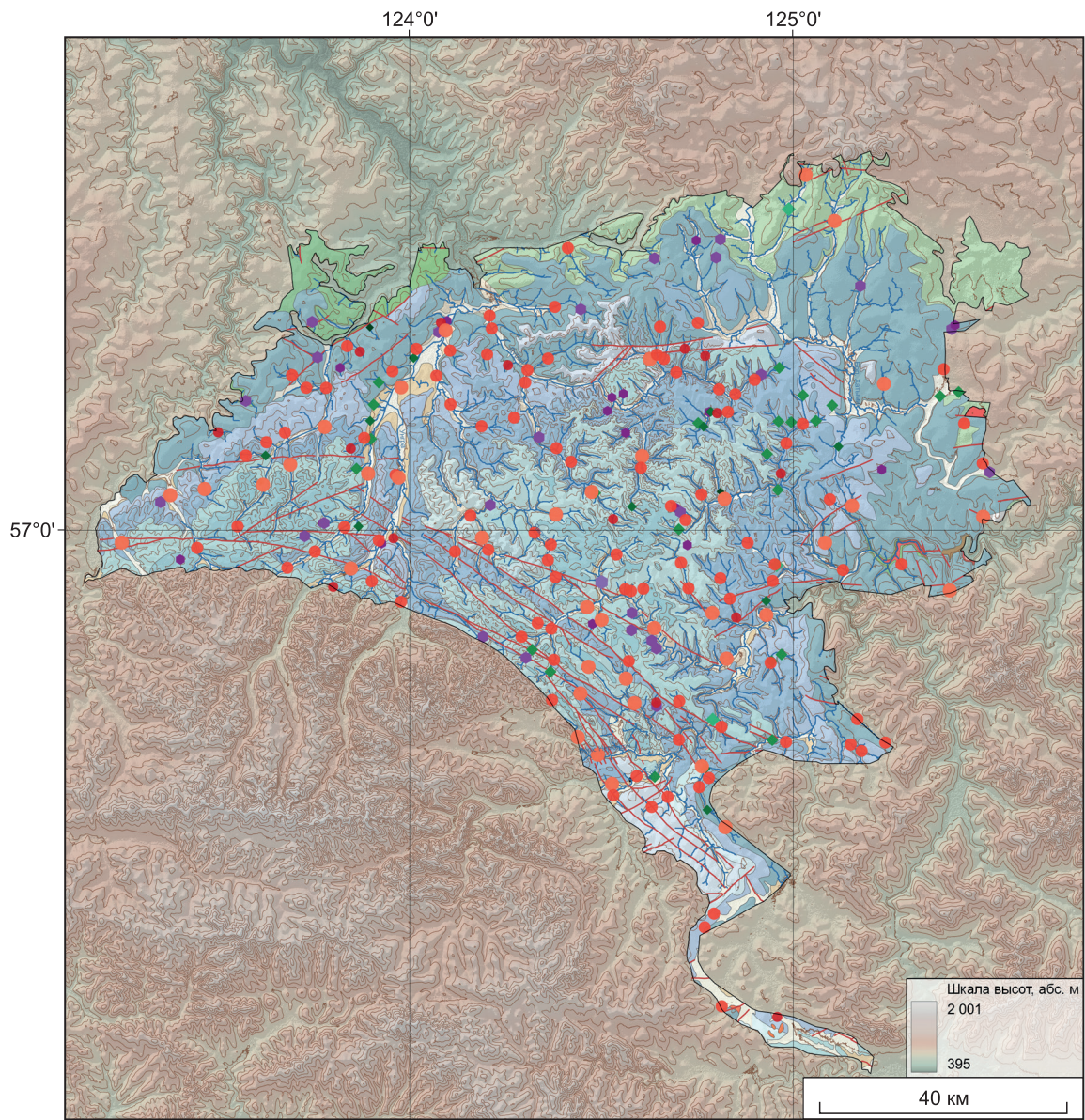
ледь), с площадью 10⁵–10⁶ м². Это порядка 59 % всех наледей этой территории. Наледи крупные (10⁴–10⁵ м²) и гигантские (>10⁶ м²) распределены в соотношении 21 и 18 % соответственно. Важно отметить, что наледи средние (10³–10⁴ м²) и меньше широко распространены на исследуемой территории, однако их идентификация по неполно поляризационным РЛ-снимкам затруднительна в силу генерализации параметров радиосигнала при его поляриметрическом разложении.

Обсуждение

Преимущества и ограничения применения РЛ-снимков в картировании наледей. Наилучшим временем определения плановых границ наледей подземных вод в пределах Чульманского плато является период начала снеготаяния (конец апреля–начало мая). В этот момент наледные объекты становятся наиболее контрастными по отношению к окружающему их ландшафту на РЛ-изображениях. Обратный радиосигнал, приходящий к спутнику от их контуров, характеризуется обратным его рассеянием с умеренной и высокой энтропией (5 и 8 сектор на рис. 2).

На рис. 5 представлены графики, отражающие разницу в площадях наледей, определенных по РЛ-снимкам и индексу NDSI. Согласно полученным результатам, коэффициент детерминации (R^2) низкий, 0,16–0,37. Во-первых, алгоритм разложения неполно поляризационного РЛ-снимка приводит к генерализации схожих свойств отраженных радиосигналов различных объектов. Это ведет к завышению площадей наледей. Во-вторых, использовались мультиспектральные и радарные изображения, полученные с небольшой разницей времени съемки. Тем не менее, существуют наледи, площади которых весьма близки. Подобных объектов обнаружено менее 10 %. Они приурочены к участкам долин, где границы поймы реки совпадают с границами наледной поляны. При этом их ширина составляет не менее сотни метров, что позволяет отчетливо выделить их на радарных изображениях (см. рис. 3, а, з).

Климатический фактор распространения наледей. С целью выявления причин разного количества и площадей наледей необходимо привести сведения о гидрометеорологических параметрах, которые напрямую влияют на интенсивность наледообразования. В период исследований средняя месячная температура воздуха с октября по



Наледи:

по РЛ-снимкам и индексу NDSI:

- гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)

по индексу NDSI:

- ◆ гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- ◆ очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- ◆ крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)
- ◆ средние ($1000\text{--}10\,000\text{ м}^2$)

по РЛ-снимкам

- гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)
- средние ($1000\text{--}10\,000\text{ м}^2$)
- границы Чульманского плато
- реки
- тектонические разломы

γPt	$J_2 dr_1$
Q_3	$\gamma_2 A$
$J_3 gr$	$Cm_{\gamma} jd$
$J_1 +_2 \check{cl}$	$gn-\gamma A$
$J_1 jt$	$J_2-3 gr$
Q_4	$J_2 dr$
$J_2 dr_2$	$J_1-2 \check{cl}$

Рис. 4. Карта распространения наледей Чульманского плато

Fig. 4. Map of icing distribution within the Chulmansky Plateau

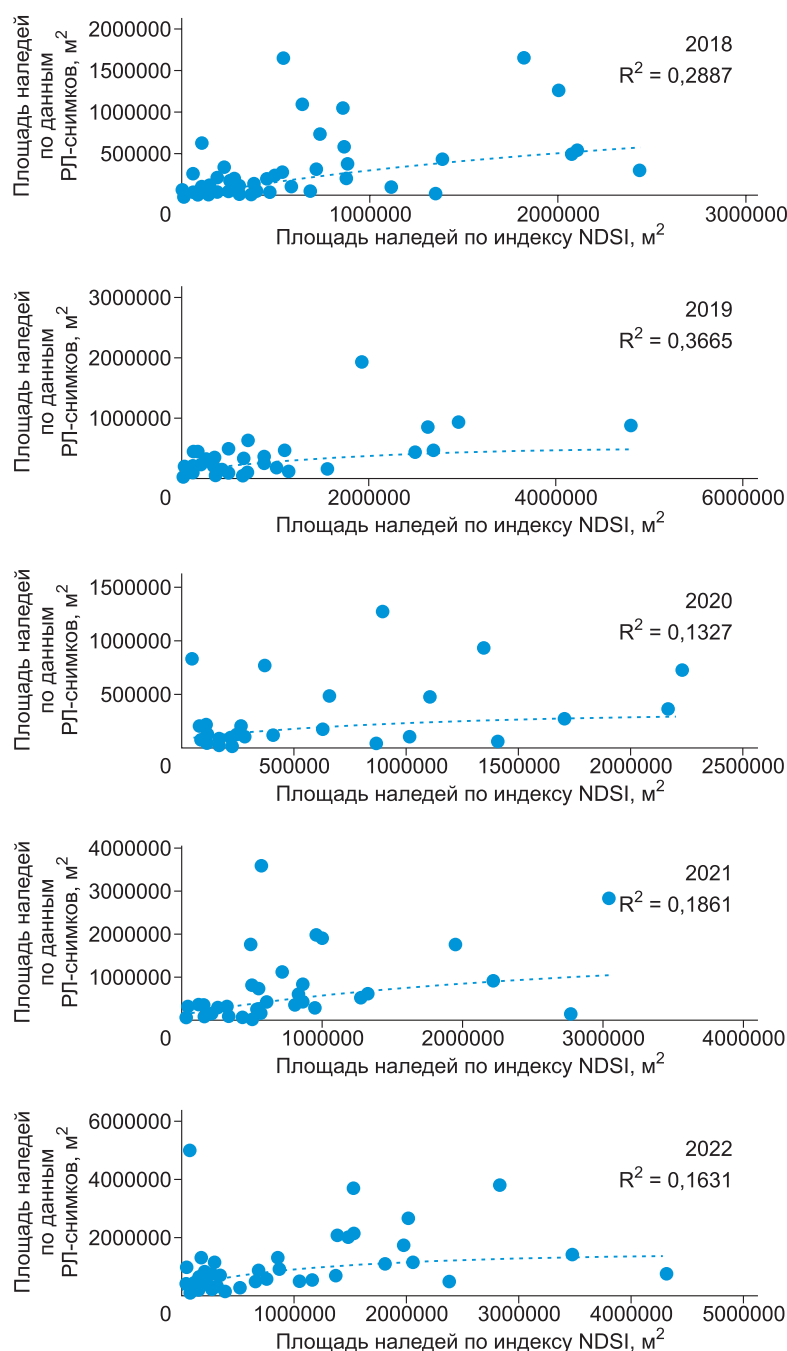


Рис. 5. Графики корреляции данных площадей наледей Чульманского плато, определенные методами дешифрирования РЛ-снимков и индекса NDSI за 2018–2022 гг.

Fig. 5. Graph of icing areal extent correlation of the Chulmanskoye Plateau determined by SAR and NDSI (2018–2022)

декабрь 2018–2021 гг. была выше нормы на 0,1–4,5 °С (рис. 6). Лишь начало зимы 2017 г. выдалось холоднее на 0,8–1,8 °С. Вторая половина зимы с января по май была теплее средней многолетней нормы на 0,1–5,5 °С в 2019 г. и 2020 г. Наиболее суровые зимы зафиксированы в 2018,

2021 и 2022 гг. со значениями температуры ниже нормы на 0,1–1,6, 1,2–5,6, 0,2–2,0 °С соответственно. Стоит повторить, что для исследуемой территории характерна высотная поясность в распределении температур воздуха, в связи с чем в речных долинах значения их

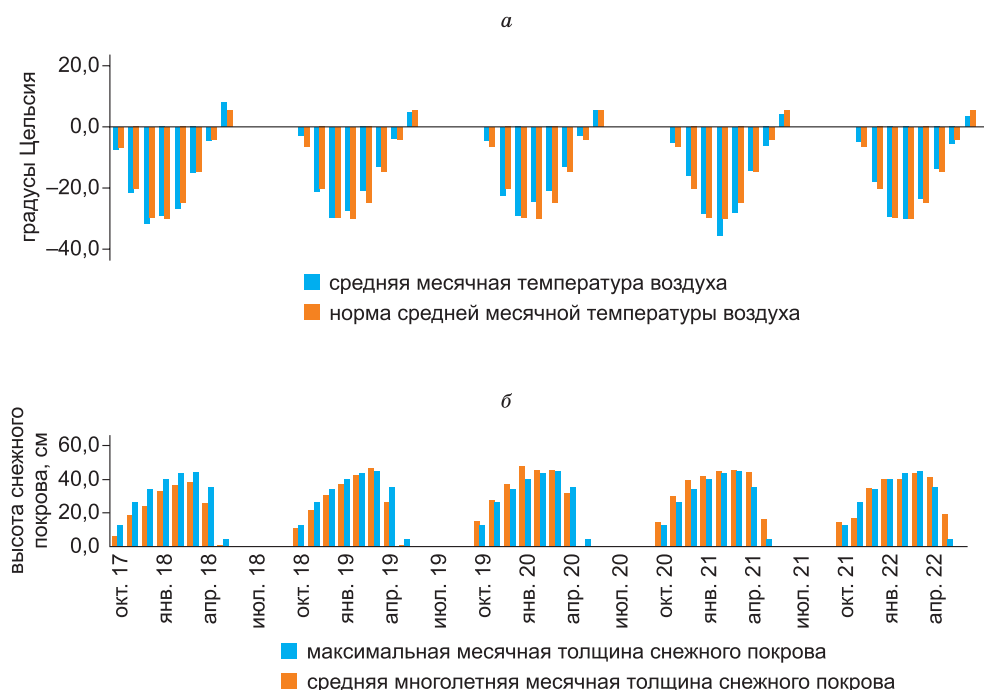


Рис. 6. График распределения средних месячных температур воздуха (а) и высоты снежного покрова (б) по данным метеостанции в пос. Чульман за 2017–2022 гг.

Fig. 6. Graph of mean monthly air temperature distribution (а) and snow depth (б) based on the Chulman weather station (2017–2022)

должны быть несколько ниже, чем на водоразделах.

Мощность снежного покрова на территории Чульманского плато зависит от местных ландшафтных условий. Значительным фактором является также ветровой перенос снега. При отсутствии фактических данных о снегонакоплении в речных долинах в период исследований приведем лишь общую тенденцию распределения высоты снега по годам на основе сведений по метеостанции на водоразделе (пос. Чульман). По данным рис. 6, по мощности снежного покрова наиболее близкими к его средней многолетней норме выдались зимы 2019–2022 гг. Однако в эти годы толщина снежного покрова была в целом выше средней на 0,7–6,3 см. Малоснежными выдались зимы 2017–2018 и 2018–2019 гг. Разница со средней многолетней нормой достигала 6,3–10,5 см и 0,9–9,2 см соответственно.

Величина снежного покрова и зимние температуры воздуха являются одними из главных факторов формирования глубины сезонного промерзания горных пород. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее благоприятные погодные условия для глубокого сезонного промер-

зания горных пород, и соответственно, наледеобразования существовали в малоснежные и холодные зимы. Таковыми являлись 2017–2018 гг., в меньшей степени 2021 и 2022 гг.

Геологический и мерзлотно-гидрогеологический факторы распространения наледей. Согласно составленной карте распространения наледей Чульманского плато (см. рис. 4), основная часть очень крупных и гигантских наледей приурочена к зонам тектонической трещиноватости горных пород. Вместе с этим, большую роль в активизации наледеобразования играют расчлененность рельефа территории и наличие сезонных и многолетнемерзлых горных пород. Последние обеспечивают напорный режим подземных вод. При этом разгрузка их осуществляется не обязательно по напорно-фильтрационным таликам, пространственно приуроченным к тектоническим разломам, но и в руслах рек через грунтово-фильтрационные талики (центральная часть Чульманского плато). На севере исследуемой территории, где расположена граница юрских и кембрийских отложений, наледей мало, несмотря на несогласное залегание и различие в литологическом составе горных пород. Рельеф здесь более сглаженный. Косвенным признаком важности

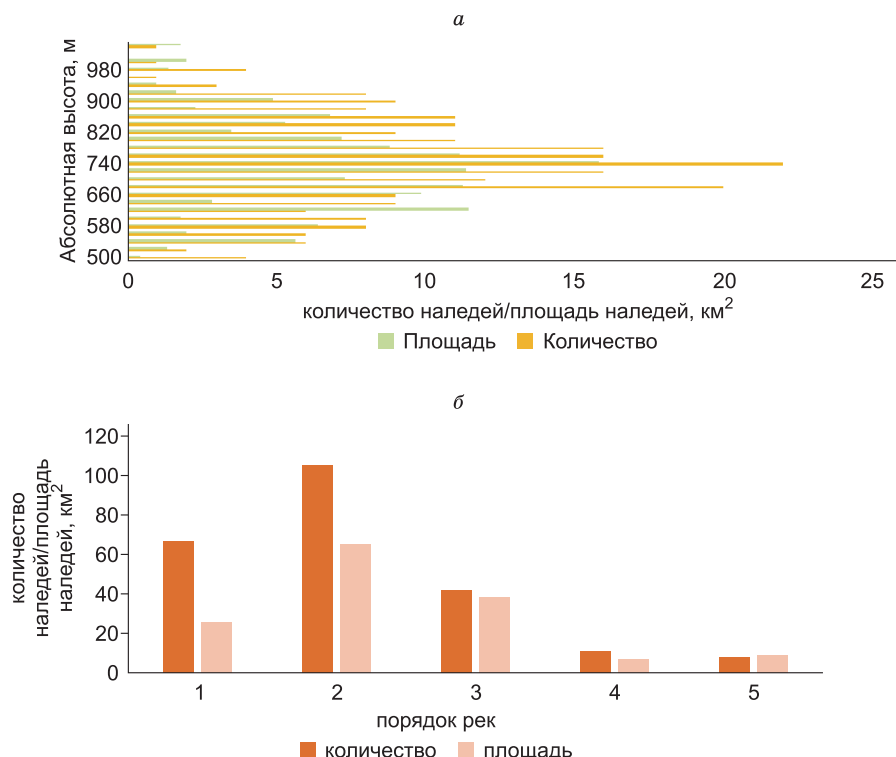


Рис. 7. Графики распределения количества и площади наледей Чульманского плато по высоте местности (а) и порядкам рек (б)

Fig. 7. Graph of amount and areal extent of icings distribution of the Chulmanskoye Plateau versus elevation (a) and river orders net (б)

роли сезонного промерзания водоносных таликов в наледеобразовании является его межгодовая динамика. Она проявляется в относительно теплые зимы: в 2019 и 2020 гг., когда глубина сезонного промерзания грунтово-фильтрационных таликов невелика, суммарная площадь наледей почти в 2 раза меньше, чем в более холодные зимы (см. табл. 2). Все эти выводы вполне согласуются с полученными ранее А.В. Гавриловым и А.Г. Топчиевым [6, 8, 9].

Режим подземных вод, участвующих в формировании наледей, играет важную роль в межгодовой динамике наледеобразования. Многолетними исследованиями установлено, что наледы, питающиеся совместно водами напорно-фильтрационных и грунтово-фильтрационных таликов, формируют, как правило, очень крупные и гигантские наледы [1–3, 6, 8, 20]. Из года в год отмечена значительная вариативность их морфометрических параметров, однако четкой связи этих изменений с основными показателями климата не обнаружено [2, 20]. Лишь небольшие наледы, питающиеся подземными водами зоны свободного водообмена, отчетливо реагируют на количество выпав-

ших атмосферных осадков за предыдущий теплый сезон [21].

Географическое положение наледей. В результате анализа полученных нами данных установлено, что наледный пояс в пределах Чульманского плато приурочен к абсолютным отметкам рельефа 520–1060 м (рис. 7, а). Наибольшее количество наледей (~60 %) расположено в диапазоне высот 680–860 м. Стоит отметить, что верхняя граница этого диапазона совпадает с отметками водоразделов Чульманского плато (820–1000 м). Наледи, фиксируемые на верхней границе диапазона их наибольшего скопления, располагаются в основном на юге и севере плато, где оно граничит с более высокими Становым и Западные Янги хребтами соответственно. Нижняя граница диапазона наибольшего развития наледей совпадает с глубинами вреза большинства местных водотоков. В связи с этим можно сделать вывод, что в питании большего количества наледей Чульманского плато участвуют, согласно разделению С.М. Фотиева [3], подземные воды зоны свободного водообмена, которые в этих долинах разгружаются.

Наледи, образующиеся в более глубоких долинах (реки Левая и Правая Унгра, Дурай и др.) на отметках 500–680 м немногочисленны, составляют около 24 % всего их количества. В днищах этих рек осуществляется разгрузка подземных вод зоны затрудненного и весьма затрудненного водообмена. По данным С.М. Фотиева [3], некоторые родники, формирующие наледи в глубоких долинах рек, имели сульфатный и хлоридный составы воды, что свидетельствует об их длительном периоде взаимодействия с горными породами. Дебиты источников этих вод высокие, а формируемые ими наледи классифицируются как очень крупные и гигантские. Эта закономерность отображается на рис. 7, а: при сравнительно небольшом количестве наледей на высотах до 680 м их суммарная площадь составляет более 28 % площади всех наледей. Подобная зависимость также отражается на графике распределения количества и размеров наледей относительно порядков рек (рис. 7, б). В более глубоких долинах (от 3-го порядка и выше) малому количеству наледей соответствует около половины их суммарной площади.

Выводы

Проведенные исследования по применению радарных изображений для картирования наледей подземных вод Чульманского плато являются первой попыткой и требуют дальнейшего усовершенствования. Несмотря на существенные ограничения в определении плановых границ наледей с помощью поляриметрического разложения неполно поляризационных радарных снимков, получен положительный опыт. Он связан с приемлемой точностью (до 10 %) определения площади наледи относительно индекса NDSI. Наилучшим временем съемки для применения этого метода картирования является период начала снеготаяния (первая половина мая). Наледи отчетливо идентифицируются на радарных изображениях, а механизм радиосигнала представляет собой объемное его рассеяние при умеренной или высокой энтропии. Местоположение таких участков наледообразования характеризуется совпадением контуров наледных полей и речной поймы, имеющих ширину не менее сотни метров. Примером может служить наледь в долине р. Верхняя Нерюнгра.

Основные ограничения применения неполно поляризационных радарных снимков при карти-

ровании наледей связаны с генерализацией схожих механизмов отражения радиосигнала от наледей и окружающих их объектов при поляриметрическом разложении радиосигнала. Такие случаи установлены на участках с широкой поймой реки, где талые снеговые воды и участки с растительностью совместно или порознь создают эффект двойного переотражения или объемного рассеяния радиосигнала соответственно с умеренной или высокой его энтропией. Сопоставление границ наледей, полученных методом дешифрирования РЛ-снимков с границами наледей по индексу NDSI, показало низкую сходимость, коэффициент детерминации составил не более $R^2 < 0,37$.

По результатам дешифрирования снимков с помощью индекса NDSI было насчитано 237 наледей суммарной площадью 134,44 км². Наледный пояс в пределах Чульманского плато развит в диапазоне высот 520–1060 м с наибольшей концентрацией наледей на отметках 680–860 м. Помимо геолого-тектонического, мерзлотно-гидрогеологического и климатического факторов, важную роль в развитии наледообразования играет рельеф местности. На Чульманском плато наледи преимущественно залегают в долинах рек, приуроченных к высокому градиенту рельефа.

Список литературы / References

1. Вельмина Н.А., Узембло В.В. *Гидрогеология центральной части Южной Якутии*. М., Л.: Издательство Академии наук СССР; 1959. 178 с.
2. Velmina N.A., Uzemblo V.V. *Hydrogeology of the central part of South Yakutia*. Moscow, Leningrad: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1959. 178 p.
3. Алексеев В.Р. *Ландшафтная индикация наледных явлений*. Новосибирск: Наука; 2005. 363 с.
4. Alekseev V.R. *Landscape indication of icing processes*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 363 p. (In Russ.)
5. Фотиев С.М. *Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна*. М.: Наука; 1965. 230 с.
6. Fotiev S.M. *Groundwater and frozen ground of the Southern Yakutian Coal Basin*. Moscow: Nauka; 1965. 230 p. (In Russ.)
7. Суходольский С.Е. *Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород*. М.: Наука; 1982. 152 с.
8. Sukhodolskiy S.E. *Paragenesis of groundwater and permafrost*. Moscow: Nauka; 1982. 152 p. (In Russ.)
9. Гаврилов А.В. О геофизиологической информативности спектрально-аэрофотоматериалов (на примере Чульманского района). В кн.: *Мерзлотные ис-*

следования. 1979. Выпуск XVIII. М.: Моск. ун-т; 1979. С. 141–153.

Gavrilov A.V. On geocryological information content of spectrazonal aerial photos (on example of the Chulman region). In: *Permafrost study. 1979; Issue 18*. Moscow: Moscow University; 1979, pp. 141–153. (In Russ.)

6. Гаврилов А.В. Классификация наледных участков южной части криолитозоны в целях изучения наледей аэро- и космическими методами. *Вестник Московского университета. Серия 4 Геология*. 1981;(1): 73–85.

Gavrilov A.V. Classification of icing sites of Southern part of cryolitozone for studying icings by aerial and cosmic techniques. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1981;(1):73–85. (In Russ.)

7. Чиждова Н.И. Характеристика относительной наледности Алдано-Тимптонского междуречья. *Вестник Московского университета. Серия 4 Геология*. 1980;(1):60–64.

Chizhova N.I. Characteristic of relative icings of the Aldan-Timpton watershed. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1980;(1):60–64. (In Russ.)

8. Топчиев А.Г. Космические методы изучения долин и наледей Чульманского района. В кн.: Спиридонов А.И., Сладкопцев С.А. (ред.). *Вопросы географии. Сборник 111: Геоморфология и строительство*. М.: Мысль; 1979. С. 169–175.

Topchiyev A.G. Space methods of studying aufeises and river valleys of the Chulman region. In: Spiridonov A.I., Sladkoptev S.A. (eds.). *Issues of Geography. Geomorphology and construction*. Moscow: Mysl'; 1979, pp. 169–175. (In Russ.)

9. Топчиев А.Г. Исследование наледей и подземных вод на территории криолитозоны по данным космической съемки. В кн.: *Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 30 сентября 2013 г. Часть 2*. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком»; 2013. С. 145–147.

Topchiyev A.G. Study of icings and groundwater on permafrost territory based on satellite imageries. In: *Science and education in 21st century: Proceedings of the International conference, 30 September 2013. Part 2*. Tambov: ООО “Consulting company Yukom”; 2013, pp. 145–147. (In Russ.)

10. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. *Наледеи зоны БАМ: экспедиционные исследования*. СПб.: Нестор-История; 2017. 319 с.

Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. *Iceings of the BAM zone: expeditionary research*. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 319 p. (In Russ.)

11. Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). *Earth System Science Data*. 2019;11(1): 409–420. <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>

12. Morse P.D., Wolfe S.A. *Iceings in the Great Slave region (1985–2014), Northwest Territories, mapped from Landsat Imagery*. Geological Survey of Canada, Open File 7720. 2014. <https://doi.org/10.4095/295540>

13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. *Science of the Total Environment*. 2021;780: 146604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>

14. Gagarin L., Wu Q., Cao W., Jiang G. Iceings of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: origins, hydrology and distribution. *Water*. 2022;14:2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>

15. Долгушин И.Ю. *Геоморфология западной части Алданского нагорья*. М.: Издательство АН СССР; 1961. 205 с.

Dolgushin I.Yu. *Geomorphology of Western part of the Aldan Highland*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1961. 205 p. (In Russ.)

16. Труш Н.И., Чиждов А.Б., Чиждова Н.И. и др. *Южная Якутия: Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горно-промышленного района*. М.: Издательство Московского университета; 1975. 444 с.

Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I., et al. *Southern Yakutia: Permafrost-hydrogeological and engineering-geological settings of the Aldan mining region*. Moscow: Moscow University; 1975. 444 p. (In Russ.)

17. User Guides - Sentinel-1 SAR [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/userguides/sentinel-1-sar>]. 2023 [цитировано 25 сентября 2023 г.]. Доступно: <https://sentinel.esa.int>

18. Cloude S.R. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a pascars case study. In: *Proceedings of the 3rd international workshop on science and applications of SAR polarimetry and polarimetric interferometry, Frascati, 22–26 January, 2007*. Frascati; 2007, pp. 1–6.

19. Толстикхин Н.И. *Подземные воды мерзлой зоны литосферы*. Л., М.: Госгеоллиздат; 1941. 204 с.

Tolstikhin N.I. *Ground waters of frozen zone of lithosphere*. Leningrad, Moscow: Gosgeolizdat; 1941. 204 p. (In Russ.)

20. Завадский Ф.Р., Железняк М.Н. Динамика формирования гигантских наледей в бассейне реки Верхняя Нерюнгра в условиях работы крупного водозабора. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013;77(6):55–60.

Zavadskiy F.R., Zheleznyak M.N. Gigantic iceings formation dynamics in Upper Nerungra River Basin under large water intake facility operation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;77(6):55–60. (In Russ.)

21. Gagarin L., Melnikov A., Ogonerov V., Bazhin K. Phenomena caused by seismic and geocryological processes across linear infrastructure, South Yakutia, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017;9(4):352–362.

Об авторах

ГАГАРИН Леонид Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

БАИШЕВ Нюргун Егорович, аспирант, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

МЕЛЬНИКОВ Андрей Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus Author ID: 57208581176, SPIN: 5751-8293, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

НИКОЛАЕВА Елизавета Сергеевна, студент, <https://orcid.org/0009-0005-3535-5316>, ResearcherID: JMC-1584-2023, SPIN 6444-1954, e-mail: nikolaeva_lizaveta@mail.ru

About the authors

GAGARIN, Leonid Aleksandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

BAISHEV, Nyurgun Egorovich, Graduate Student, Junior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

MELNIKOV, Andrey Evgen'evich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus Author ID: 57208581176, SPIN: 5751-8293, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

NIKOLAEVA, Elizaveta Sergeevna, Student, <https://orcid.org/0009-0005-3535-5316>, ResearcherID: JMC-1584-2023, SPIN 6444-1954, e-mail: nikolaeva_lizaveta@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 30.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 01.02.2024

Принята к публикации / Accepted 27.02.24

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Экология

УДК 552.321.(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-96-107>

Оригинальная статья

Совершенствование текущей конфигурации Арктической зоны Российской Федерации с учетом международного экологического сотрудничества в рамках Арктического Совета

А. М. Амирханов¹, М. А. Жуков^{✉,2}, И. М. Охлопков³, И. Н. Поспелов⁴,
Р. Л. Романенков^{1,5}, Т. В. Устинова²

¹Федеральная служба по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор),
г. Москва, Российская Федерация

²АНО «НКЦ «Север», г. Москва, Российская Федерация

³Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

⁴Институт экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва, Российская Федерация

⁵АНО «Центр «Арктические инициативы» г. Москва, Российская Федерация

✉ nkcsever@gmail.com

Аннотация

В статье анализируются проблемы соотношения пространства, в рамках которого реализуется особая государственная политика Российской Федерации с учетом международных обязательств России, к фактическому статусу арктических территорий. Границы Арктической зоны РФ (АЗРФ) и территорий, выделенных Рабочей группой по сохранению арктической флоры и фауны («Conservation of Arctic Flora and Fauna» – CAFF) Арктического Совета, совпадают лишь частично и варьируют в различных регионах. Расхождения объясняются отсутствием единых критериев определения южной границы Арктической зоны, при этом на указанных территориях осуществляются международные проекты по сохранению природной среды и биоразнообразия в Арктике. Предложен ряд территорий для включения в Арктическую зону как завершающий этап формирования состава АЗРФ. Выделение Арктической зоны важно для решения задач охраны окружающей среды и биологических ресурсов территории, обеспечения социального и экономического благополучия населения Арктики.

Ключевые слова: Арктика, Арктическая зона РФ, Арктический Совет, CAFF-граница

Для цитирования: Амирханов А.М., Жуков М.А., Охлопков И.М., Поспелов И.Н., Романенков Р.Л., Устинова Т.В. Совершенствование текущей конфигурации Арктической зоны Российской Федерации с учетом международного экологического сотрудничества в рамках Арктического Совета. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):96–107. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-96-107>

Improving the current configuration of the Russian Federation Arctic Zone, with account to international environmental cooperation within the framework of the Arctic Council

Amirkhan M. Amirchanov¹, Mikhail A. Zhukov^{✉,2}, Innokenty M. Okhlopkov³, Igor N. Pospelov⁴, Rustam L. Romanenkov⁵, Tatyana V. Ustinova²

¹Federal Service for Supervision of Natural Resources (Rosprirodnadzor), Moscow, Russian Federation

²ANO "NCC "North", Moscow, Russian Federation

³Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

⁴Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

⁵ANO "Center "Arctic Initiatives", Moscow, Russian Federation

✉nkcsever@gmail.com

Abstract

This article analyzes the problems of correlating the space within which the Russian Federation's special state policy is implemented, considering Russia's international obligations, to the actual status of the Arctic territories. The boundaries of the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) and the territories specified by the Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) working group of the Arctic Council are only partially coincident and vary in different regions. This discrepancy can be explained by the lack of uniform criteria for the identification of the southern border of the Arctic zone, while international projects aimed at preserving the natural environment and biodiversity in the Arctic are being implemented in these territories. A number of territories have been proposed for inclusion in the Arctic zone as part of the final stage of the Russian Arctic. It is important to define the Arctic zone in order to address the problems of protecting the environment and biological resources of the territory and ensuring the social and economic well-being of the Arctic population.

Keywords: Arctic, Russian Federation Arctic zone, Arctic Council, CAFF border

For citation: Amirchanov A.M., Zhukov M.A., Okhlopkov I.M., Pospelov I.N., Romanenkov R.L., Ustinova T.V. Improving the current configuration of Russian Federation Arctic Zone, with account to international environmental cooperation within the framework of the Arctic Council. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):96–107. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-96-107>

Введение

Формирование пространственной конфигурации Арктической зоны Российской Федерации (далее — АЗРФ) — сложный и внутренне противоречивый процесс, описанный в ряде публикаций и до настоящего времени не завершённый в полной мере. Выделение АЗРФ в составе территории страны непосредственно связано с созданием Арктического Совета, из-за участия в котором у Российской Федерации возникли международные обязательства в двух основных сферах: (1) охраны окружающей среды и биологических ресурсов Арктики, в первую очередь как среды обитания человека; (2) обеспечения социального и экономического благополучия населения Арктики [4, 7]. К этому надо добавить деятельность по обеспечению безопасности жизнедеятельности в Арктике. Идея сотрудничества арктических государств впервые была высказана в 1987 г. Ге-

неральным секретарем ЦК КПСС М.С. Горбачевым, а в 1988 г. постановлением Совета Министров СССР от 07.05.1988 № 591-121 была создана Государственная комиссия при Совете Министров СССР по делам Арктики (далее — Госкомиссия Совмина СССР). В январе 1989 г. Финляндия разослала письма другим арктическим государствам с предложением о проведении конференции по защите окружающей среды в Арктике, а 22 апреля 1989 г. Госкомиссия Совмина СССР приняла решение отнести к Арктике ряд территорий. В сентябре 1989 г. на конференции в Рованиemi на совещании министров приполярных государств договорились о создании Арктического Совета [3, 7].

Рабочая группа по сохранению арктической флоры и фауны («Conservation of Arctic Flora and Fauna» — CAFF) Арктического Совета определила состав территорий, включаемых в циркумполяр-



Рис. 1. CAFF-граница Арктики и включаемые в нее основные биомы

Fig. 1. CAFF-boundary of the Arctic and its main biomes

ную арктическую зону – объект природной зональности, рекомендованную Арктическим Советом для использования и другими рабочими группами (рис. 1) [1]. С другой стороны, Российская Федерация определила для себя в рамках своей территории состав АЗРФ в целях обеспечения не только экологического, но и социально-экономического благополучия населения Арктики (рис. 2) [7].

Как можно увидеть на рисунках, территория, о контуренная CAFF-границей, и территория АЗРФ совпадают только частично. Причем территория АЗРФ к западу от Республики Саха (Якутия) простирается на юг далее, чем CAFF-граница, а в Республике Саха (Якутия), Магаданской области и Камчатском крае уже CAFF-граница выходит за пределы АЗРФ. Арктический Совет разрабатывает международные программы и вырабатывает рекомендации для своих членов применительно к территориям, о контуренным CAFF-границей. Там, где эта территория не выходит за пределы АЗРФ, проблем не возникает. Но там, где оконтуриваемая CAFF-границей территория

за пределы АЗРФ выходит, возникают организационно-управленческие вопросы и их необходимо решить.

CAFF-граница на территории Российской Федерации

Описанная выше пространственная инверсия (от лат. *inversio* – переворачивание) связана с асимметрией, создаваемой теплой Северной Атлантикой и холодной Северной Пацификой, в результате чего природные зоны отклоняются к югу от широтного простираения тем далее, чем ближе к акватории Тихого океана. Если в Мурманской области, Ненецком национальном округе и Республике Коми CAFF-граница в целом совпадает с линией Северного полярного круга ($66^{\circ}33'44''$ северной широты), то в Магаданской области и Камчатском крае CAFF-граница продвигается на юг примерно до $60^{\circ}30'$ с.ш. вместе с распространением на эти территории тундровых, лесотундровых и северо-таежных редколесных сообществ, что вызвано близостью холодной Северной Пацифики.

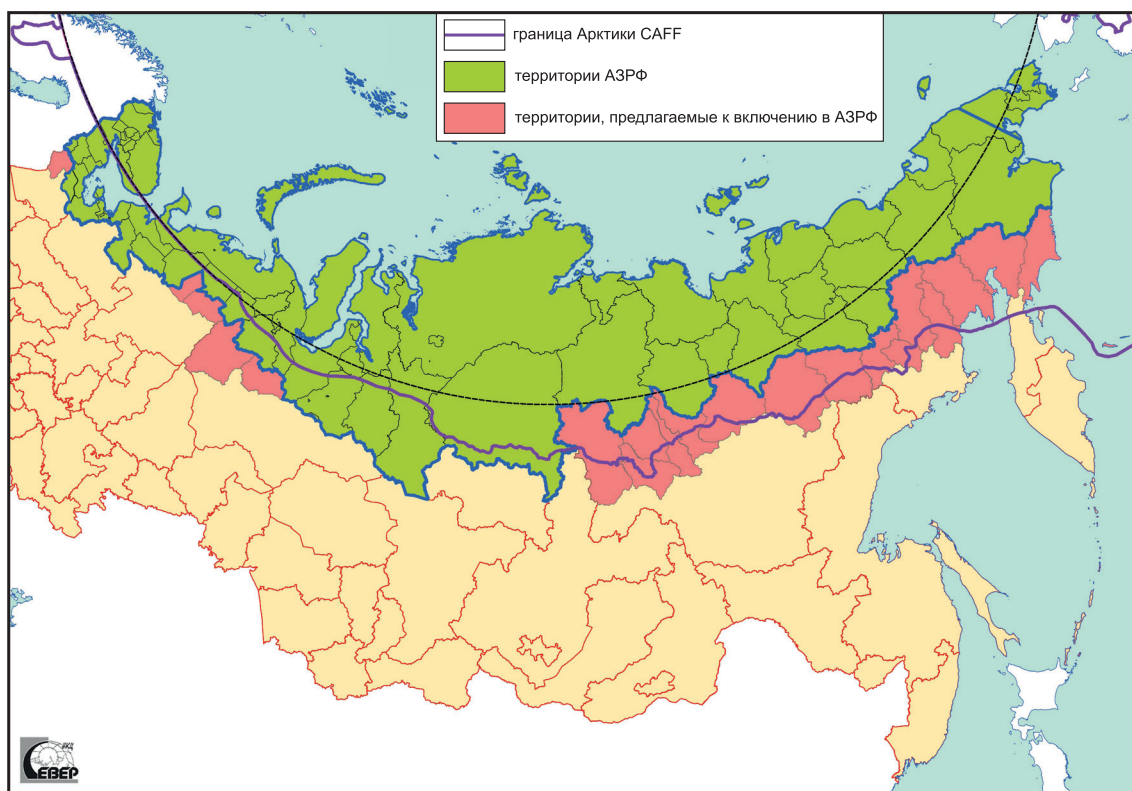


Рис. 2. CAFF-граница Арктики, Арктическая зона Российской Федерации и территории, предлагаемые к включению в Арктическую зону Российской Федерации

Fig. 2. CAFF-border of the Arctic, the Arctic zone of the Russian Federation and territories proposed for inclusion in the Arctic zone of the Russian Federation

Нельзя сказать, что, определяя для себя местоположение CAFF-границы, специалисты рабочей группы CAFF были методологически предельно строги и не принимали упрощенных компромиссных решений. Как сказано выше, западнее Урала CAFF-границу провели по линии Северного полярного круга. В Ямало-Ненецком автономном округе и в Туруханском районе Красноярского края CAFF-границу провели примерно по усредненной границе лесотундры и северной тайги с учетом того, что никакой границы-линии между ними нет, а наличествуют более или менее размытые экотоны. В Эвенкии CAFF-границу провели по северному борту долины р. Нижняя Тунгуска, хотя тундрово-редколесно-таежный с *Larix sibirica*, *Pinus obovate* и *Pinus sibirica* – растительный комплекс Среднесибирского плоскогорья распространен в равной мере как к северу, так и к югу от долины Нижней Тунгуски [10]. При переходе в пределы Республики Саха (Якутия) CAFF-границу (покидающую при этом пределы АЗРФ) провели по северному борту доли-

ны р. Вилюй до места ее впадения в р. Лена. Тут нужно подчеркнуть, что северная (левобережная) часть долины Вилюя, как и противоположная часть долины, преимущественно покрыта среднетаежными лиственничными лесами с *Larix gmelinii*. При этом на границе Красноярского края и Якутии на восточной окраине приподнятого Центрально-Сибирского плоскогорья в верхнем течении Вилюя и его притоков северо-таежные лиственничные леса с *Larix gmelinii* проникают далеко на юг за пределы CAFF-границы [10].

К востоку от р. Лена выше устья Вилюя CAFF-границу провели по юго-западным и южным склонам Верхоянского хребта до устья р. Алдан и далее по северному (восточному) склону долины Алдана до места сочленения Верхоянского хребта с хребтом Сетте-Дабан. Далее CAFF-граница проводится на восток несколько севернее водораздела между реками бассейна Охотского моря и Северного Ледовитого океана (СЛО) примерно по линии 62°30' с.ш., выходя на Охотоморское побережье между мысами Вили-

гинский и Островной по водоразделу рек Туманы и Кананыга примерно на широте 61° с.ш. При этом внутри САФФ-границы – восточносибирский тундрово-редколесно-северотаетный комплекс растительности с *Larix gmelinii* subsp. *cajanderi*. На южном макросклоне Верхоянского хребта, хребта Сунтар-Хаята и Яно-Оймяконского нагорья распространен тундрово-стланиково-редколесно-северотаетный комплекс растительности с *Larix gmelinii* subsp. *cajanderi* и *Pinus pumila*. А к югу от САФФ-границы – прибрежноохотский тундрово-стланиково-редколесный комплекс растительности с *Larix gmelinii* subsp. *cajanderi*. На отдельных участках в верхнем течении р. Колыма и ее притоков САФФ-граница включает в себя территории с прибрежноохотским тундрово-стланиково-редколесным комплексом растительности с *Larix gmelinii* subsp. *cajanderi* [10]. Далее САФФ-граница, включая в арктическую природную зону полуостров Тайгонос, проводится по Камчатскому полуострову от бухты Подкагерная до залива Уала. САФФ-граница проведена в самом узком месте полуострова, примерно сохраняя свое пространственное простираие по 60°30' с.ш. Расположенные к северу от САФФ-границы ерниковые мохово-лишайниковые южные тундры с *Betula exilis* и *Carex lugens* в сочетании по водоразделам с редколесьями с *Larix gmelinii* subsp. *cajanderi* и *Pinus pumila* распространены и южнее этой границы, хотя простираются на юг относительно недалеко [10]. Далее на восток в пределы САФФ-границы включены Командорские острова.

Следует иметь в виду, что понятие «природная граница» условно. Степень выраженности природных границ сильно варьирует в различных регионах, представляя местами то относительно четкую линию (при данном уровне генерализации), то широкий (иногда до сотен километров) экотон с сильно размытыми границами. В связи с этим эксперты, разработавшие предложения по проведению САФФ-границы, вынуждены были использовать фиксированные в пространстве рубежи, не связанные с собственно природной зональностью. Нужно подчеркнуть, что предложений по определению южной природной границы Арктики в научной литературе много и САФФ-граница – только один из многих возможных вариантов ее проведения [14]. Такая граница – всегда некая обобщенная экспертная оценка суммы учитываемых обстоятельств, и понятие «граница» используется за неимением луч-

шего. Потребность в проведении таких границ связана с отсутствием линий-границ естественных, оконтуривающих сравнительно однородные пространства с соответствующими свойствами, которые формировали бы компактные территории, относимые к определенным категориям. В этих случаях вынужденно используют любые удобные рубежи, которые сами не имеют отношения к избираемым критериям, но позволяют с некоторым приближением задачу решить, пусть и нарушая, местами, избранные критерии. Например, в бассейне Вилюя внутри контура САФФ-границы оказался участок со среднетаежной растительностью, в то время как никакие специалисты нигде и никогда не признавали возможным включение средней тайги в состав природной арктической зоны. Это мы видим и на рис. 1, где наличествует только один участок средней тайги в порядке исключения.

Материалы и методы

Арктическая зона Российской Федерации

Выделение АЗРФ необходимо не только для решения задач охраны окружающей среды и биологических ресурсов Арктики (в первую очередь как среды обитания человека), но и для обеспечения социального и экономического благополучия населения Арктики [4]. На Восьмой министерской сессии Арктического совета в мае 2013 г. министры восьми государств — членов Арктического Совета подписали Кирунскую декларацию, в которой «...признали, что экономическая деятельность в Арктике является неотъемлемой частью устойчивого развития народов и сообществ региона» [12]. В этих целях в Арктическом Совете создана рабочая группа по устойчивому развитию в Арктике — SDWG. Помимо нее в 2014 г. был учрежден Арктический экономический совет (АЭС) в качестве независимой организации деловых кругов арктических государств. В его состав входят по три представителя от государств-членов и постоянных участников АС. От России в АЭС участвуют представители РСПП, ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Совкомфлот» на уровне заместителей руководителей [13].

Специфические природно-хозяйственные условия требуют применения адекватных им инструментов и регуляторных механизмов, не применяемых в более благоприятных условиях жизнедеятельности и хозяйствования [3]. Но если территория выделяется для целей экономиче-

ского регулирования, она в целом или составляющие ее части должны быть объектами государственного управления или местного самоуправления, уже имеющими закрепленные за ними территории. В этом случае подразумевается определение состава АЗРФ через перечень административных и муниципальных образований. Понятие «граница АЗРФ» при этом излишне, а карта с ее отображением как суммы административных и муниципальных границ не является обязательным элементом и исполняет исключительно иллюстративные функции. Более того, использование понятия «граница АЗРФ» может ввести в заблуждение неопытных управленцев, как это уже было с Минрегионом России, где делались попытки формировать потенциально автономизируемое образование. Данная инициатива развития не получила, но понятие «граница АЗРФ» продолжает активно использоваться, и она даже неоднократно именовалась административной без каких-либо на то оснований. Эта история, как и вопрос в целом, подробно рассмотрены в книге «Определение состава Арктической зоны Российской Федерации» [4].

Нормативной основой для рассмотрения вопроса об отнесении конкретной территории к составу АЗРФ в настоящее время является заключение Государственного научного центра Российской Федерации «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (далее — ГНЦ РФ «ААНИИ») Росгидромета от 04.07.2013 № 140-03937/13и (приложение к письму Минрегиона России от 08.07.2013 № 12051-СН/02) о критериях включения территорий в АЗРФ, разработанное в рамках исследований в интересах Минэкономразвития России по теме «Территориальное зонирование Арктической зоны Российской Федерации по критериям состояния окружающей среды» и закрепленное в качестве методологической основы протоколом совещания 18.06.2013 у заместителя Председателя Правительства России Д. Н. Козака [4, 7].

Согласно указанному заключению, АЗРФ складывается из арктического и субарктического поясов. При этом вводятся понятия: (1) «арктическая природная территория» — природный комплекс, расположенный в пределах АЗРФ и включающий морские водные объекты, относящиеся к бассейну Северного Ледовитого океана, включая Белое море, островные территории, прибрежные низменности и равнины с арктически-

ми ландшафтами (тундры), прибрежные склоны гор и нагорий, поверхностный сток с которых направлен в арктические моря; (2) «субарктическая природная территория» — территория, которая в пределах АЗРФ охватывает зоны лесотундровых и северотаежных ландшафтов, а также часть водосборной площади бассейна Тихого океана (северо-западное побережье Берингова моря). В качестве основных характеристик двух поименованных физико-географических областей указываются: а) разнообразие природных объектов (равнины, низменности, возвышенности, горные сооружения); б) арктический и субарктический климат; в) арктические и субарктические ландшафты; г) поверхностный сток в моря Северного Ледовитого океана, включающие Белое море, на Чукотском полуострове — в Тихий океан.

Поскольку тема завершающего этапа НИР, выполнявшегося ГНЦ РФ «ААНИИ», формулировалась как «Разработка предложений по определению южной границы Арктической зоны Российской Федерации», южную границу арктической природной территории ГНЦ РФ «ААНИИ» предложило выделять по ландшафтным, геоморфологическим и гидрографическим признакам, набор которых весьма противоречив. Геоморфологические и гидрографические признаки не имеют арктической специфики, и их использование абсолютно произвольно. Более того, перечню основных характеристик предшествует определение территории АЗРФ по границе исторически сложившегося арктического природно-хозяйственного комплекса, сочетающего морские и сухопутные виды деятельности системы управления в пределах муниципальных образований и автономных округов, расположенных на территориях, прилегающих к арктическим морям [7]. Что касается климатического подхода, то климат сам по себе не стабилен, климатические параметры для конкретных территорий флюктуируют во времени и имеют вектор смещения в соответствии с общими климатическими изменениями. Б.П. Алисов разделял арктический и субарктический пояса, относя границу арктического пояса к летнему, а субарктического — к зимнему положению арктического климатологического фронта [2]. Субарктика у него охватывала значительные площади бореальных лесов, а усредненное положение атмосферного фронта различно у различных авторов и даже в публикациях самого Б.П. Алисова. Заключение ГНЦ РФ «ААНИИ»

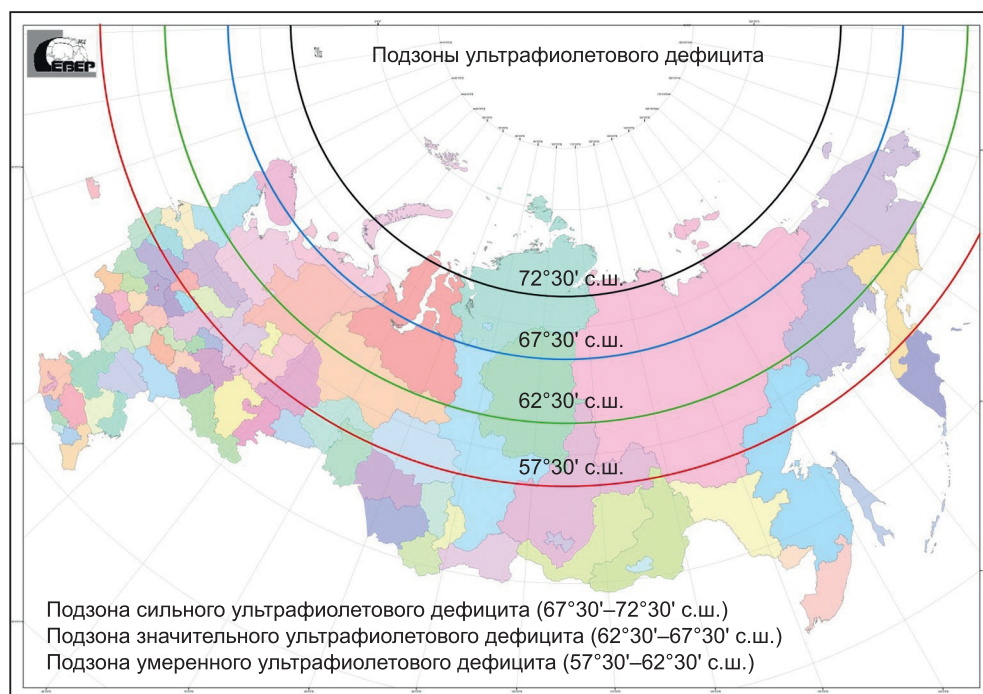


Рис. 3. Подзоны ультрафиолетового дефицита

Fig. 3. Ultraviolet deficiency subzones

Росгидромета не дает развернутого раскрытия понятия «арктический и субарктический климат», в то время как понятие «арктические и субарктические ландшафты» в целом раскрыто в описании понятий «арктическая природная территория» и «субарктическая природная территория». В результате при разработке проекта указа Президента России о составе АЗРФ [17] сотрудниками Минрегиона России критерии климата не были использованы нигде, даже в ультрадискомфортной Республике Саха (Якутия). В целом содержание Указа Президента России от 02.05.2014 № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» очень существенно отклонялось от смысла и содержания заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» и в дальнейшем целым рядом нормативных правовых актов состав АЗРФ последовательно приближался к соответствию базовым критериям заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» [7].

Поскольку арктическая зона как объект природной зональности и АЗРФ как объект государственного управления в тот период не различались ни уполномоченными управленцами, ни привлекаемыми ими учеными (в сферу деятельности которых входили предметы сугубо научные), ГНЦ РФ «ААНИИ» предложило южную

границу *арктической природной территории*, а не АЗРФ. Это, в частности, нашло свое выражение в том, что о хозяйственных критериях в заключении не говорится ничего. Оно не дает и четко установленных широтных критериев, но очевидно подразумевает их, так как широтным положением во многом определяется природная зональность. Причем оно влияет не только на растительный и животный мир, почвенный покров и погодные процессы, но и непосредственно на население в части температурного режима, продолжительности полярного дня и ночи, дефицита ультрафиолетовой (УФ) радиации (рис. 3), повышенной электромагнитной активности среды, непосредственно воздействующей на состояние здоровья населения и возможности связи.

В целом, заключение ГНЦ РФ «ААНИИ» внутренне противоречиво и все предлагаемые в нем критерии одновременно и логически согласованно применить невозможно. Но есть базовый критерий: арктическая и субарктическая природная территория – понятия, чье содержание в целом описано и очевидно. И этого как базового ориентира достаточно. Теория вопроса описана в монографии «Определение состава Арктической зоны Российской Федерации» [7].

Обсуждение и результаты

Совершенствование состава Арктической зоны Российской Федерации

История разработки проекта состава АЗРФ, а затем и его совершенствования демонстрирует решающую роль управленцев в выработке решения. А они учитывают только самые простые и наглядные критерии, с учетом меры настойчивости руководства регионов и убедительности аргументов, которыми его вооружили специалисты. Следование рекомендациям науки только декларировалось не только по субъективным, но, отчасти, и по объективным причинам – в их числе внутренняя противоречивость критериев заключения ГНЦ РФ «ААНИИ», что мы разбирали ранее [4, 7]. Тем не менее, при правильном подходе указаниями данного документа пользоваться можно, что и предписано делать органам управления протоколом совещания 18.06.2013 у заместителя Председателя Правительства России Д.Н. Козака. Применительно к обсуждаемому вопросу влияние этого фактора описано в статье «Территории Республики Коми, не вошедшие в состав Арктической зоны Российской Федерации, но соответствующие критериям включения в нее» [6]. В кратком изложении суть сводится к тому, что первый шаг оптимизации состава АЗРФ основывался на выходе территорий на побережье СЛО (Республика Карелия), второй шаг – на учете линии Полярного круга (Республика Коми, Красноярский край и Республика Саха (Якутия)). Третьим шагом может быть приведение состава АЗРФ к базовому критерию заключения ГНЦ РФ «ААНИИ»: «арктические и субарктические ландшафты», главным визуальным маркером которых является растительность, в субарктических ландшафтах – лесотундра и северная тайга. Подход прост и очевиден, но к востоку от рек Лена и Алдан вплоть до побережья Охотского моря расположены низкотундры с растительностью северотаежного характера, простирающиеся далеко на юг. Соответственно, необходимо использовать дополнительные критерии, система которых предложена в монографии «Определение состава Арктической зоны Российской Федерации» [4]. Среди дополнительных природных критериев целесообразно использовать дефицит УФ-радиации (см. рис. 3) и САФФ-границу (см. рис. 1), в пределах которой Российская Федерация принимает на себя обязательства по международным программам охраны природы и сохранения биоразнообразия в

Арктическом Совете [4, 7]. Такой подход был использован ранее в ряде публикаций при рассмотрении вопросов и обосновании предложений по включению в состав АЗРФ Муезерского муниципального района Республики Карелия; Ижемского муниципального района и муниципального района Печора Республики Коми; Среднеканского, Омсукчанского, Северо-Эвенского, Сусуманского и Ягоднинского муниципальных районов Магаданской области и Олукторского и Пенжинского муниципальных районов Камчатского края [5, 6, 7, 15]. Поскольку в научной литературе эти вопросы уже рассмотрены, в настоящей статье остановимся только на тех территориях, которые в научной литературе в связи с данной проблемой еще не обсуждались.

В начале сентября 2023 г. глава Ханты-Мансийского автономного округа (далее – ХМАО) Наталья Комарова сообщила, что Президент России Владимир Путин одобрил включение в состав Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) Березовского и Белоярского муниципальных районов ХМАО. Вопрос об их включении в состав АЗРФ региональные власти начали прорабатывать еще в 2021 г. Одним из важных критериев, предложенных ГНЦ РФ «ААНИИ», который применим к ХМАО, является нахождение включаемых в АЗРФ территорий в пределах северной тайги, что определяет их субарктический облик. В пределах Березовского и Белоярского муниципальных районов ХМАО происходит постепенное замещение среднетаежных растительных сообществ на северотаежные. И в остальном эти районы имеют переходные характеристики между субарктическим и просто северным обликами природной среды. Связано это с тем, что долина р. Обь прорезает линию Сибирских увалов, склоны северной экспозиции которых покрыты северотаежной растительностью, а склоны южной экспозиции — среднетаежной. В продольной части р. Обь эта достаточно четкая природная граница превращается в зону плавного изменения параметров природной среды, чему способствует вынос тепла по долине текущей с юга крупной реки. Эту ситуацию можно рассматривать как результат согревающего воздействия на изначально субарктическую природную среду. Промежуточный, переходный характер облика природной среды Березовского и Белоярского муниципальных районов в целом специалистами осознавался, но трактоваться это могло самым различным образом [9].

В итоге перевесили экономические соображения — освоение минеральных ресурсов этих территорий требовало применения к ним экономического режима Федерального закона от 13.07.2020 № 193-ФЗ «О государственной поддержке предпринимательской деятельности в Арктической зоне Российской Федерации». Нет оснований рассматривать последнее обстоятельство как нечто негативное по той причине, что выделение АЗРФ в составе территорий страны было осуществлено в связи и с обеспечением условий устойчивого развития арктических регионов в интересах населения этих регионов. Территории двух обсуждаемых районов располагаются между 65° и 62° с.ш. — подзона значительного ультрафиолетового дефицита, что соответствует используемым критериям. САФФ-граница проходит немного севернее названных районов, но в данном случае политическое решение принято исходя из социально-экономических соображений. Площадь Березовского муниципального района — 88 100 км², население — 22 941 чел. (2021). Площадь Белоярского муниципального района — 41 646 км², население — 28 897 чел. (2021).

В Республике Саха (Якутия) САФФ-граница проходит через восемь улусов (муниципальных районов). Мирнинский улус простирается с севера на юг от линии Полярного круга (66°33'44" с.ш.) до примерно 62° с.ш. — подзона значительного ультрафиолетового дефицита. Растительный покров охарактеризован выше и, как в случае с двумя описанными выше районами ХМАО, представляет собой сложное сочетание северотаежных и среднетаежных лиственничных лесных сообществ при очень существенном преобладании сообществ северотаежных [10, 16]. Площадь улуса — 165 779 км², население — 71 308 чел. (2023). На тех же широтах, в подзоне значительного ультрафиолетового дефицита находятся: Нюрбинский, Сунтарский, Верхневилуйский, Вилюйский улусы. Растительность в целом схожа с Мирнинским улусом с той разницей, что в них преобладают среднетаежные сообщества [10]. Площадь Нюрбинского улуса — 52 436 км², население — 22 997 чел. (2023); Сунтарского улуса — 57 804 км², население — 22 352 чел. (2023); Верхневилуйского улуса — 42 050 км², население — 20 889 чел. (2023); Вилюйского улуса — 55 193,5 км², население — 25 121 чел. (2023). Расположенные восточнее рек Лена и Алдан Кобяйский, Томпонский и Оймяконский улусы находятся на тех

же широтах, в подзоне значительного ультрафиолетового дефицита. Описанный выше тундрово-редколесно-северотаежный облик растительности полностью соответствует критериям заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» [10]. Площадь Кобяйского улуса — 107 789 км², население — 11 188 чел. (2023); Томпонского улуса — 135 843,5 км², население — 11 064 чел. (2023); Оймяконского улуса — 92 254,7 км², население — 7600 чел. (2023).

Охватываемые САФФ-границей Командорские острова покрыты тундрово-стланиково-каменноберезовым с *Betula ermanii* и *Pinus pumila* комплексом растительности, полностью соответствующим критериям заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» [4]. Командорские острова располагаются между 55°30' и 54°30' с.ш. Такое широтное положение соответствует подзоне незначительного (слабого) ультрафиолетового дефицита, что в целом не соответствует рекомендуемым критериям [4]. Но нужно учитывать, что острова находятся в акватории южной неледovитой части Берингова моря (южная граница кромки плавающих льдов проходит немного севернее). На климат островов оказывают влияние холодное течение из Северного Ледовитого океана и ветви теплого течения Куросио. В результате их взаимодействия формируется довольно своеобразный климат с насыщенной влагой атмосферой и уменьшенным количеством солнечных дней. Средняя годовая температура на о. Беринга 2,1 °С, на о. Медный — 2,8 °С. Карта «Климатическое районирование» Национального атласа России оценивает климат Командор как умеренно холодный и избыточно влажный. В Физико-географическом атласе мира на Командорах сумма солнечной радиации минимальна по миру — менее 60 ккал. на 1 см² в год (рис. 4) [11].

Таким образом, океанический климат сам по себе снижает количество усвояемого ультрафиолета в сравнении с континентальными территориями на этих же широтах и в реальности ультрафиолетовый дефицит на Командорах нужно оценивать как сильный. На Командорских островах создан Алеутский муниципальный район общей площадью 1 580 км² с населением 624 чел. (2023). Острова целиком включены в состав Национального парка «Командорские острова» имени С.В. Маракова и основная специализация островов — природоохранная деятельность, что дополнительно усиливает значимость такого критерия как их включение в периметр САФФ-границы.

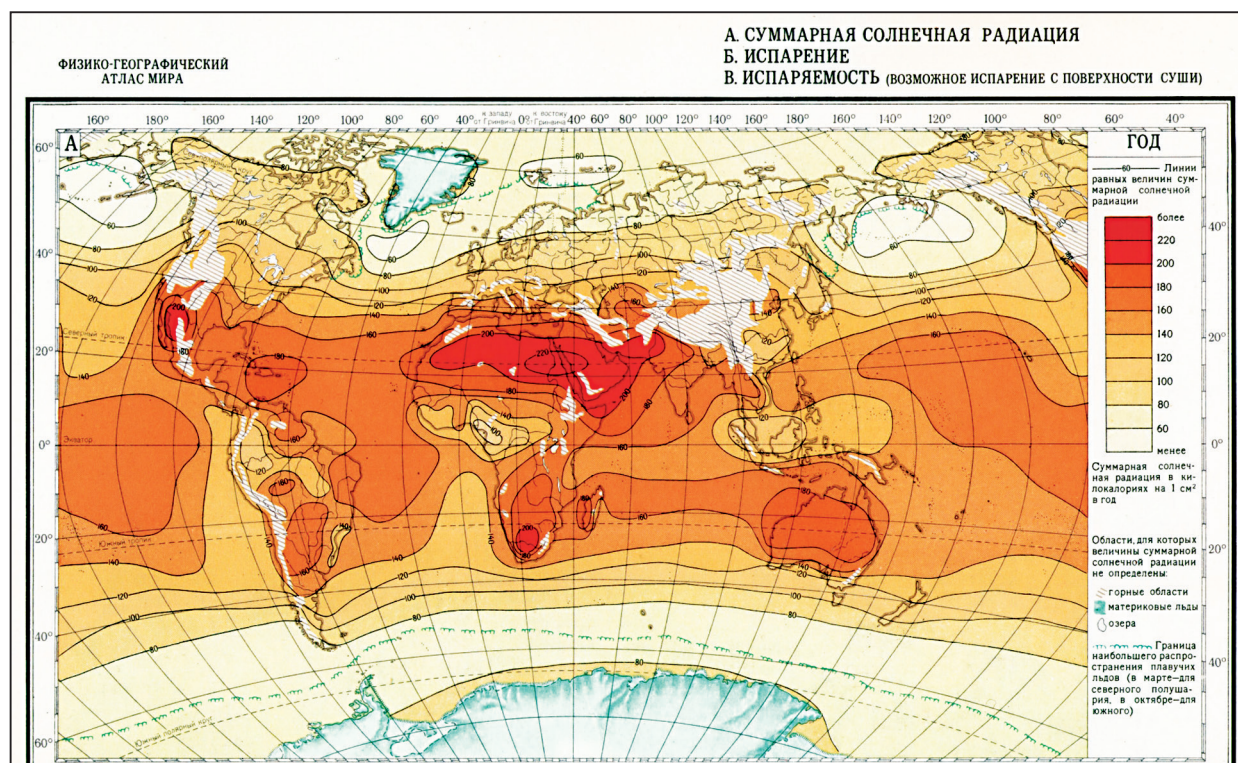


Рис. 4. Физико-географический атлас мира

Fig. 4. Physical map of the world

Закключение

Описанные в настоящей статье территории, предлагаемые к включению в состав АЗРФ в связи с тем, что они включены в периметр САФФ-границы, в целом соответствуют природным критериям заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» и наиболее значимому биомедицинскому критерию влияния на организм человека. Мирнинский, Нюрбинский, Сунтарский, Верхневилуйский, Вилюйский улусы с точки зрения сложного комплексного характера растительности и с точки зрения критериев заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» находятся на некоторой грани соответствия. Но территории этих улусов в значительной их части включены в периметр САФФ-границы, в то время как описанные выше Березовский и Белоярский муниципальные районы ХМАО с точки зрения критериев заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» находятся ровно в таком же положении при том, что в периметр САФФ-границы они не включены и международных экологических обязательств в рамках Арктического Совета на их территории у страны нет. Тем не менее, политическое решение по экономическим основаниям по этим районам принято, а равные основания в реализации государственной региональной политики — важ-

ное условие внутренней устойчивости государства. Более того, участки со среднетаежными лесными насаждениями есть в Онежском районе Архангельской области и в Туруханском районе Красноярского края. Причем, в Туруханском районе часть территории со среднетаежными лесными насаждениями простирается с севера на юг на 250 км. Конечно, это была техническая ошибка, допущенная сотрудниками Минрегиона России в процессе подготовки проекта Указа Президента Российской Федерации В.В. Путина от 02.05.2014 № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации» [4]. Но ошибка эта законодательно закреплена и стала прецедентным основанием для включения в состав АЗРФ и других муниципальных районов, часть которых покрыта среднетаежной растительностью. В целом, перечисленные в данной статье территории, предлагаемые к включению в состав АЗРФ (см. рис. 2), обеспечивают завершение формирования состава АЗРФ в соответствии с критериями заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» и критериями, предложенными Арктическим Советом в форме САФФ-границы. Теоретически, управленцы Минрегиона России должны были сделать это сразу. Но по сумме разнообразных при-

чин ни критерии заключения ГНЦ РФ «ААНИИ», ни позиция Арктического Совета, выраженная в САФФ-границе, не учитывались и даже не обсуждались. Рано или поздно это надо исполнить, уравняв тем самым регионы в правах по крайней мере в отношении критериев заключения ГНЦ РФ «ААНИИ» и сложившейся практики их применения.

Список литературы / References

1. Huntington H.P. *Program for the Conservation of the Arctic Flora and Fauna (CAFF). Arctic Flora and Fauna: Status and Conservation*. Helsinki; 2001. 266 p.
2. Алисов Б.П., Полтораус Б.В. *Климатология*. М.: Издательство Московского университета; 1974. 299 с.
3. Alisov B.P., Poltoraus B.V. *Climatology*. Moscow: Moscow University Publishing House; 1974. 299 p. (In Russ.)
4. Жуков М.А. Государственная арктическая политика России в системе международных отношений. В кн.: *Европейская зона российской Арктики: сценарии развития: Материалы Всероссийской научной конференции, г. Сыктывкар, 18–19 октября 2017 г.* Ч. 1. Сыктывкар; 2017. С. 41–52.
5. Zhukov M.A. State Arctic policy of Russia in the system of international relations. In: *European zone of the Russian Arctic: development scenarios: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference, Syktyvkar, October 18–19, 2017, Part 1*. Syktyvkar; 2017, pp. 41–52. (In Russ.)
6. Жуков М.А., Крайнов В.Н., Попов Д.А. *Определение состава Арктической зоны Российской Федерации*. Сыктывкар: ГОУ ВО КРАГСиУ; 2018. 251 с.
7. Zhukov M.A., Krainov V.N., Popov D.A. *Determination of the composition of the Arctic zone of the Russian Federation*. Syktyvkar: KRAGSiU 2018. 251 p. (In Russ.)
8. Жуков М.А., Телеснина В.М. Общие принципы определения состава Арктической зоны Российской Федерации и вопросы ее расширения в тихоокеанской части страны. *Вестник Коми Республиканской академии государственной службы управления. Серия теория и практика управления*. 2021;3(33):75–81.
9. Zhukov M.A., Telesnina V.M. General principles for determining the composition of the Arctic zone of the Russian Federation and issues of its expansion in the Pacific part of the country. *Vestnik of the Komi Republican Academy of State Service and Administration. Theory and practice of management*. 2021;3(33):75–81. (In Russ.)
10. Жуков М.А., Попов Д.А., Телеснина В.М. Территории Республики Коми, не вошедшие в состав Арктической зоны Российской Федерации, но соответствующие критериям включения в нее. *Вестник Коми Республиканской академии государственной службы управления. Серия теория и практика управления*. 2022;37(3):39–47.
11. Zhukov M. A., Popov D. A., Telesnina V. M. Territories of the Komi Republic that are not included in the Arctic zone of the Russian Federation, but meet the criteria for inclusion in it. *Vestnik of the Komi Republican Academy of State Service and Administration. Theory and practice of management*. 2022;37(3):39–47. (In Russ.)
12. Жуков М.А., Романенков Р.Л., Тишков А.А. и др. *Методология стратегического планирования и правового регулирования в Арктической зоне Российской Федерации*. М.: Физматкнига, 2023. 144 с.
13. Zhukov M.A., Romanenkov R.L., Tishkov A.A., et al. *Methodology of strategic planning and legal regulation in the Arctic zone of the Russian Federation*. Moscow: Fizmatkniga; 2023. 144 p. (In Russ.)
14. Жуков М. А. Предисловие. В кн: *Сохранение биоразнообразия в Арктике. Проблемы, задачи, решения*. М.: Физматкнига; 2023. С. 11–15.
15. Zhukov M.A. Preface. In: *Conservation of biodiversity in the Arctic. Problems, tasks, solutions*. Moscow: Fizmatkniga, 2023, pp. 11–15. (In Russ.)
16. Жуков М.А. Березовский и Белоярский муниципальные районы ХМАО. включены в состав Арктической зоны Российской Федерации. Арктика сегодня. URL: <https://www.arctic-today.ru/index.php/rajonirovanie-arktiki/396-berezovskij-i-beloyarskij-munitsipalnye-rajony-khmao-vklyucheny-v-sostav-arkticheskoy-zony-rossijskoj-federatsii> (дата обращения: 26.02.2024)
17. Zhukov M.A. Berezovsky and Beloyarsky municipal districts of Khanty-Mansi Autonomous Okrug have been included in the Arctic zone of the Russian Federation. *The Arctic today*. URL: <https://www.arctic-today.ru/index.php/rajonirovanie-arktiki/396-berezovskij-i-beloyarskij-munitsipalnye-rajony-khmao-vklyucheny-v-sostav-arkticheskoy-zony-rossijskoj-federatsii> (accessed: 26.02.2024)
18. Карта «Растительность». В кн.: *Национальный атлас России*. Том 2. «Природа. Экология». М.; 2004. С. 328–330. <https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html>
19. Map “Vegetation”. In: *National Atlas of Russia*. Vol. 2 “Nature. Ecology”. Moscow; 2004, pp. 328–330. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html>
20. Карта «Суммарная солнечная радиация». В кн.: *Физико-географический атлас мира*. М.: Академия наук СССР и Главное управление геодезии и картографии ГГК СССР; 1964. С. 22.
21. Map “Total solar radiation”. In: *Physicogeographical atlas of the world*. Moscow: USSR Academy of Sciences and Geodesy and Cartography Directorate of the USSR State Civil Committee; 1964, p. 22. (In Russ.)
22. Пиясов А.Н., Котов А.В. Некоторые аспекты международного экономического сотрудничества в Арктике. *Вестник СПбГУ. Серия 6. Политология. Международные отношения*. 2016;(2):81–96.
23. Pilyasov A.N., Kotov A.V. Some aspects of international economic cooperation in the Arctic. *Vestnik of Saint Petersburg University. Political science. International relations*. 2016;(2):81–96. (In Russ.)
24. Пиясов А.Н. Региональная промышленная политика в арктических территориях: какая она есть и какой ей быть? *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2021;24(3):7–29. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2021.73.001>
25. Pilyasov A.N. Regional industrial policy in the Arctic territories: what is it and what should it be? *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka [The North and*

the Market: Forming the Economic Order]. 2021;24(3):7–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2220-802X.3.2021.73.001>

14. Тишков А.А. Российская Арктика: экологические ограничения хозяйственной деятельности. В кн.: *Россия и ее регионы: интеграционный потенциал, риски, пути перехода к устойчивому развитию*. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2012. С. 425–444.

Tishkov A.A. Russian Arctic: environmental limitations of economic activity. In: *Russia and its regions: integration potential, risks, ways of sustainable development transition*. Moscow: KMK. 2012, pp. 425–444. (In Russ.)

15. Тишков А.А., Жуков М.А., Телеснина В.М. Вопросы оптимизации состава Арктической зоны Российской Федерации. *Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения*. 2022;9(1):9–16.

Tishkov A.A., Zhukov M.A., Telesnina V.M. Issues of optimizing the composition of the Arctic zone of the Russian Federation. *Arctic 2035: current issues, problems, solutions*. 2022;9(1):9–16. (In Russ.)

16. Филиппов В.В., Жуков М.А. *Проблемы устойчивого развития арктической зоны Российской Федерации*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН; 2005. 54 с.

Philippov V.V., Zhukov M.A. *Problems of sustainable development of the Arctic zone of the Russian Federation*. Yakutsk: YaSc SB RAS; 2005. 54 p.

17. Указ Президента России от 02.05.2014 № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации».

Decree of the President of Russia dated May 2, 2014 No. 296 “On the land territories of the Arctic zone of the Russian Federation.” (In Russ.)

Об авторах

АМИРХАНОВ Амирхан Магомедович, кандидат биологических наук, советник руководителя, Росприроднадзор

ЖУКОВ Михаил Андреевич, кандидат биологических наук, ученый секретарь научного совета АНО «НКЦ «Север», e-mail: nkcsever@gmail.com

ОХЛОПКОВ Иннокентий Михайлович, кандидат биологических наук, директор, ИБПК СО РАН, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, SPIN: 9031-6218, e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

ПОСПЕЛОВ Игорь Николаевич, научный сотрудник, Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, <https://doi.org/0000-0001-9564-5589>, ResearcherID: S-7976-2016, Scopus Author ID: 6603057052, SPIN: 7455-4750, e-mail: pleuropogon@gmail.com

РОМАНЕНКОВ Рустам Леонидович, генеральный директор, АНО «Центр «Арктические инициативы»; руководитель секции по вопросам Арктики и сохранения биоразнообразия при научно-техническом Совете Росприроднадзора, e-mail: rlromanenkov@ark-in.ru

УСТИНОВА Татьяна Викторовна, директор, АНО «НКЦ «Север», e-mail: tatus1107@gmail.com

About the authors

AMIRKHANOV, Amirkhan Magomedovich, Cand. Sci. (Biol.), Counselor to the Head, Federal Service for Supervision of Natural Resources (Rosprirodnadzor)

ZHUKOV, Mikhail Andreevich, Cand. Sci. (Biol.), Scientific Secretary, ANO “NCC “North”, Moscow, Russian Federation, e-mail: nkcsever@gmail.com

OKHLOPKOV, Innokenty Mikhailovich, Cand. Sci. (Biol.), Director, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, <https://orcid.org/0000-0002-6227-5216>, SPIN: 9031-6218, e-mail: imokhlopkov@yandex.ru

POSPELOV, Igor Nikolaevich, Researcher, Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, <https://doi.org/0000-0001-9564-5589>, ResearcherID: S-7976-2016, Scopus Author ID: 6603057052, SPIN: 7455-4750, e-mail: pleuropogon@gmail.com

ROMANENKOV, Rustam Leonidovich, General Director, ANO “Center “Arctic Initiatives”; Head of the section on Arctic issues and biodiversity conservation at the Scientific and Technical Council, Federal Service for Supervision of Natural Resources (Rosprirodnadzor), e-mail: rlromanenkov@ark-in.ru

USTINOVA, Tatyana Viktorovna, Director, ANO “NCC “North”, Moscow, Russian Federation, e-mail: tatus1107@gmail.com

Поступила в редакцию / Submitted 21.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 02.03.2024

Принята к публикации / Accepted 05.02.2024

Адаптация кустарничков к условиям арктических тундр Западного Шпицбергена

Н. Ю. Шмакова^{✉,1}, Е. Ф. Марковская², К. В. Морозова², О. В. Ермолаева¹

¹Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина
Кольского научного центра РАН, г. Кировск, Российская Федерация,

²Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Российская Федерация

✉shmanatalya@yandex.ru

Аннотация

Устойчивость биоты арктических территорий в условиях изменения климата и увеличения антропогенной нагрузки определяется адаптивным потенциалом отдельных видов. Цель работы – оценка адаптивного потенциала кустарничков (*Betula nana*, *Vaccinium uliginosum*, *Salix polaris*) флоры Западного Шпицбергена на основании морфолого-анатомического исследования и анализа жирных кислот (ЖК) суммарных липидов листьев. Показано, что все исследованные виды имеют сходные характеристики анатомии листа: мелколистность, дорсовентральное строение с четкой дифференцировкой на палисадный и губчатый мезофилл, что обеспечивает их существование в Арктике. Для *S. polaris* характерны высокие значения объема устьичного аппарата, амфистоматичный тип листа, высокий коэффициент палисадности, большой объем механической ткани листа и высокое содержание ненасыщенных жирных кислот (ННЖК). Эти особенности в условиях Западного Шпицбергена обеспечивают высокую функциональную активность, прохождение всех этапов онтогенеза и широкое распространение вида. В отличие от *S. polaris*, для *B. nana* и *V. uliginosum* характерны уменьшение площади листа, снижение коэффициента палисадности, гипостоматический тип листа, что в сочетании с увеличением разнообразия «второстепенных» ННЖК, а также отсутствием генеративного развития может свидетельствовать о более высоком для них уровне экстремальности условий. Эти особенности могут быть причиной их ограниченной представленности в экотопах Западного Шпицбергена. Показано, что более высокий адаптивный потенциал *S. polaris* способен обеспечить большую его устойчивость в условиях изменения среды обитания в отличие от *B. nana* и *V. uliginosum*. Все исследованные виды могут быть использованы как маркерные для мониторинга состояния среды в условиях высокой Арктики.

Ключевые слова: *Salix polaris*, *Betula nana*, *Vaccinium uliginosum* ssp. *microphyllum*, анатомия, жирнокислотный состав листьев, адаптации, Западный Шпицберген

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ПАБСИ КНЦ РАН «Растительно-почвенные ресурсы, совершенствование методов управления охраняемыми природными территориями в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия и оптимизации среды обитания человека на архипелаге Шпицберген» (№ 0189-2019-0025; № гос. регистрации 1021032422551-2-1.6.11).

Для цитирования: Шмакова Н.Ю., Марковская Е.Ф., Морозова К.В., Ермолаева О.В. Адаптация кустарничков к условиям арктических тундр Западного Шпицбергена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):108–120. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-108-120>

Original article

Adaptation of dwarf shrubs to Arctic tundra conditions in West Svalbard

Natalia Yu. Shmakova^{✉,1}, Evgenia F. Markovskaya², Kira V. Morozova², Olga V. Ermolaeva¹

¹Polar-Alpine Botanical Garden-Institute, Kola Science Centre Kirovsk, Russian Federation,

²Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

✉shmanatalya@yandex.ru

Abstract

The stability of the biota in the Arctic regions under climate change and increasing anthropogenic burdens is influenced by the adaptive potential of its representatives. This study aimed to assess the adaptive potential of dwarf shrubs

(*Betula nana*, *Vaccinium uliginosum*, and *Salix polaris*) in the flora of West Svalbard on the basis of their morphological and anatomical features and total leaf lipid fatty acid content. All species have similar leaf anatomy characteristics: small leaves, dorsoventral structure with clear differentiation into palisade and spongy mesophyll, which ensures their growth in the Arctic. However, *S. polaris* is characterized by high volumes of the stomatal apparatus, an amphistomatic type of leaf, a high palisade coefficient, a large volume of mechanical leaf tissue, and a high content of unsaturated fatty acids (UFA). These features provide high functional activity, passage through all stages of ontogenesis, and a wide distribution of the species in West Svalbard. In contrast to *S. polaris*, *B. nana* and *V. uliginosum* are characterized by a decrease in leaf area, a decrease in the palisade coefficient, and a hypostomatic leaf type, which, combined with an increase in the diversity of “secondary” UFA, as well as the lack of generative development, may indicate a higher level pressure of extreme conditions for the species. Thus, these features may explain their limited representation in the ecotopes of West Svalbard. In contrast to *B. nana* and *V. uliginosum*, the higher adaptive potential of *S. polaris* ensures its greater stability in conditions of changing habitat. All studied dwarf shrub species can be used as markers for monitoring the environment in the high Arctic.

Keywords: *Salix polaris*, *Betula nana*, *Vaccinium uliginosum* ssp. *microphyllum*, leaf anatomy, fatty acids, adaptation, West Svalbard Island

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences “Plant and soil resources, improvement of methods of management of protected natural territories under conditions of climatic changes and anthropogenic impact and optimization of human habitat in the Svalbard archipelago” (No. 0189-2019-0025; Registration No. 1021032422551-2-1.6.11).

For citation: Shmakova N.Yu., Markovskaya E.F., Morozova K.V., Ermolaeva O.V. Adaptation of dwarf shrubs to Arctic tundra conditions in West Svalbard. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):108–120. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-108-120>

Введение

Современное отношение к Арктике определяется интересом не только к ее ресурсному богатству, но и адаптивному потенциалу представителей флоры и фауны в связи с прогнозируемыми изменениями климата, увеличением техногенной нагрузки [1, 2].

Климатические особенности этого региона включают экстремально низкие температуры, короткий вегетационный период с круглосуточным полярным днем, продолжительный зимний период с полярной ночью, нестабильный уровень освещенности в сочетании с измененным спектральным составом света и обилием рассеянной радиации, ветры, шторма, разные виды осадков и самые неожиданные сочетания этих факторов [3]. У растений в экстремальных условиях произрастания основная задача – это выживание. Некоторые виды, мигрирующие в высокие широты, приспособились к этим условиям, а для других они стали преградой. Первая группа видов включает дополнительные множественные механизмы приспособления и занимает широкий спектр экотопов. Вторая существует по пути избегания, в нее входит большинство кустарничков, которые занимают наиболее благоприятные локальные экотопы в арктических тундрах [1, 4–7]. Система выживания тесно связана с состоянием мембранной системы растительного организма, которая должна не только поддерживать его целостность,

но и обеспечивать активное функциональное состояние и успешное произрастание видов в условиях жизнедеятельности организма [8]. Физические свойства биологических мембран, в частности их «текучесть» или подвижность, зависят от состава липидов и степени десатурации жирных кислот (ЖК) в растениях [9]. Растения, произрастающие в условиях нестабильного суточного климата, имеют специальный механизм, обеспечивающий поддержание ненасыщенности мембран на постоянном уровне при резких суточных изменениях температуры [10]. Наличие «суточного климата» и является особенностью Арктики в период вегетации в условиях круглосуточного дня. Липиды как структурно-функциональные компоненты мембран и других органоидов клетки, как сигнальные молекулы и как форма накопленного углерода и энергии являются важными участниками адаптационного процесса. Липиды выполняют защитную функцию за счет воскового слоя, создавая мощный кутикулярный барьер, предотвращая высыхание и проникновение инфекции [11]. Устойчивость растений, прежде всего к холоду, коррелирует с наличием в клеточных мембранах полиненасыщенных жирных кислот. В оптимизации уровня текучести мембран с участием ЖК ключевую роль играют жирнокислотные десатуразы, регулирующие изменение количества двойных связей в цепях ЖК мембранных липидов. ЖК с ненасыщенными ацильными це-

пиями образуют жидкие мембраны и неупорядоченные липидные фазы. Напротив, ЖК с очень длинными насыщенными цепями преобладают в жестких и упорядоченных липидных фазах [12, 13]. Но у аборигенных растений Якутии большое участие в поддержании активности мембранных систем ФСА принимают как насыщенные, так и ненасыщенные ЖК [8]. Их соотношение зависит от вида растений и температурных условий в период вегетации. Важная роль насыщенных ЖК в поддержании активности мембранных систем отмечена в работах и других авторов [14].

Знание взаимосвязей физиолого-биохимических механизмов, способствующих продвижению разных групп растений в районы высокой Арктики, с особенностями их морфолого-анатомических параметров может дать понимание механизмов адаптации и обоснование их широкого или локального распространения. В этом направлении для флоры Арктики интересны кустарнички высоких широт, представительность которых ограничена несколькими видами [3].

Цель работы – оценка адаптивного потенциала трех видов кустарничков флоры Западного Шпицбергена (*Betula nana* L., *Salix polaris* Wahlenb., *Vaccinium uliginosum* L. ssp. *microphyllum* Lange) на основании морфолого-анатомического исследования и анализа жирных кислот суммарных липидов листьев.

Материал и методы

Район исследования. Работа выполнена в окрестностях п. Баренцбург (78°03'38.2" N, 14°12'59.6" E) и бухты Колсбей (78°08'41.4" N, 15°01'27.3" E) на территории о. Западный Шпицберген. Климат острова связан с теплым течением Гольфстрим вдоль западного берега архипелага, что отличает его от других мест на этих широтах Арктики [15]. Климат характеризуется умеренными температурами летом и зимой, среднегодовая температура воздуха составляет +5,8 °C, средняя температура самого теплого месяца (июль) +8,0 °C, а наиболее холодного (февраль) –18 °C. За год в среднем выпадает 563 мм осадков, с преобладанием снега, в течение всего года наблюдается высокая относительная влажность воздуха около 78 %. Продолжительность полярного дня составляет 127 дней, а полярной ночи – 120 дней [16]. Вечная мерзлота распространена на глубину до 300 см, оттаивает слой от 30 до 150 см. Снежный покров может достигать высоты более 1 м, и его высота регулируется ветрами. Продолжительность

вегетационного периода на острове составляет 40–70 дней. Все эти факторы определяют особенности растительного покрова, вариabельность растительных сообществ и механизмы адаптации растений на архипелаге Шпицберген.

Объекты. Работа выполнена на трех видах листопадных кустарничков, встречающихся в сообществах арктических тундр острова Западный Шпицберген.

Salix polaris Wahlenb. (ива полярная). Хионофильный арктический вид с евразийско-западно-американским ареалом [17]. Простратный кустарничек, гигромезофит, единственный среди всех видов кустарничков постоянный компонент высокоарктических флор Евразии. Одно из наиболее широко распространенных среди всех растений Шпицбергена, присутствует на всех крупных и многих небольших островах [3, 18]. *Salix polaris* входит в группу коллективных доминантов, отмечена почти во всех типах местообитаний [16].

Vaccinium uliginosum L. ssp. *microphyllum* Lange (голубика мелколистная). Гипоаркто-монтанный циркумполярный вид. Прямостоячий кустарничек, мезофит [17]. В полосе гипоарктических тундр характеризуется очень широкой экологической амплитудой; в подзону арктических тундр заходит лишь спорадически и редко. На Шпицбергене представлена мелколистная простратная форма, особенно типична на щебнистых сухих открытых участках в широких горных долинах [3]. Голубика – теплолюбивый вид, обитающий в наиболее благоприятных местах, обращенных к югу и юго-западу, с высокой степенью инсоляции. Нами была обнаружена на склонах южной экспозиции, вблизи поселка Колсбей. На Шпицбергене вид находится под угрозой исчезновения [18].

Betula nana L. A. Löve & D. Löve (береза карликовая). Циркумполярный, арктобореальный, эвритопный вид с европейским ареалом. На Шпицбергене – низкий кустарничек до 10–20 см высотой, распростертый с укореняющимися ветвями, образующими большие коврики (клоны). На Западном Шпицбергене находится северная граница распространения этого вида, нами обнаружен в единственном местообитании вблизи поселка Колсбей, где при определенных микроусловиях (склон южной экспозиции, в понижении) формирует стелющиеся по земле березовые заросли. Поскольку растение неспособно (или почти неспособно) размножаться в нынешних климатических условиях на Шпицбергене, в настоящее время оно ограничено местами со стабиль-

ной растительностью и почвенными условиями. Теплолюбивый вид. На Шпицбергене вид находится под угрозой исчезновения [18].

Пробы растительного материала изучаемых видов (хорошо развитые листья без признаков повреждения) отбирали в растительных сообществах арктических тундр в июле в окрестностях поселка Баренцбург (*S. polaris*) и бухты Колсбей (*B. nana*, *V. uliginosum* L. ssp. *microphyllum*). У доминантного вида *S. polaris* отбирали листья с 10–20 особей (10–20 г), у редких видов – с 3–5 особей (до 5–10 г).

Определение липидов. Для исследования фракционного и жирнокислотного состава липидов свежий растительный материал фиксировали методом лиофильной сушки в химико-аналитической лаборатории Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген. Исследование фракционного и жирнокислотного состава липидов выполнено на научном оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (лаборатория аналитическая ИЛ КарНЦ РАН).

Суммарные липиды экстрагировали смесью хлороформа и метанола в соотношении 2:1 и фракционировали методом колоночной хроматографии. Определение жирнокислотного состава (ЖК) липидных фракций проводили хроматографическим методом на газожидкостном хроматографе «Хроматэк-Кристалл-5000.1» (Россия) при следующих условиях: капиллярная колонка HP INNOWAX (30 м, 0,32 мм); температура колонки, испарителя, пламенно-ионизационного детектора – 205, 240 и 260 °С соответственно; газ-носитель – азот; скорость пропускания через колонку азота, водорода, воздуха – 50, 40, 400 мл/мин соответственно. Идентификацию ЖК проводили по временам удерживания стандартных образцов (Supelko, 37 компонентов, США).

Определение количественного содержания ЖК проводили методом внутреннего стандарта (в качестве стандарта – маргариновая кислота) [19]. Расчет делали в мг на г сухой массы и далее рассчитывали в весовых % от суммы.

Коэффициент ненасыщенности жирных кислот (К) рассчитывали по формуле: $K = \sum \text{ненасыщенных (НН) ЖК} / \sum \text{насыщенных (Н) ЖК}$.

Активность ацил-липидных $\Delta 9$, $\Delta 12$ и $\omega 3$ десатураз, катализирующих введение двойных связей в углеродные цепи олеиновой (C18:1), линолевой (C18:2) и линоленовой (C18:3) кис-

лот, определялась как стериол- (SDR), олеил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразные отношения, рассчитанные на основании содержания компонентов [20].

Морфолого-анатомический анализ. Площадь листьев определяли методом компьютерного сканирования в программе ImageJ. Параметры мезоструктуры листа определяли по методике А.Т. Мокроносова и Р.А. Борзенковой [21] при помощи светового микроскопа МИКМЕД-6 (ЛОМО, Россия) с использованием окуляр-микрометра WF10X/22 мм при увеличении $4\times$, $10\times$, $40\times$ в 30–120-кратной повторности. Площадь устьица (S_{yc}) вычисляли по формуле $S_{yc} = \pi DL/4$, где D – длина, L – ширина устьица. Объем клеток (V) палисадного мезофилла рассчитывали по формуле [22] $V = (1/4\pi)D^2Lk$, где L – длина, D – ширина клетки, k (поправочный коэффициент) = $0,38 + 0,117(L/D)$. Объем клеток тканей губчатого мезофилла и склеренхимы рассчитывали по формуле $V = (4/3\pi)(L/2)(D/2)^2$, так как отношение длины к ширине клеток было менее 2,5. Подсчет числа хлоропластов проводили в 30–72-кратной повторности отдельно в клетках палисадной и губчатой паренхимы, измерения числа клеток выполняли в 100 больших квадратах камеры Горяева в 20 повторностях.

Статистический анализ. Статистическая обработка данных проведена с использованием стандартных пакетов программ Microsoft Excel 2010. В таблицах представлены средние значения и их стандартные ошибки. Для оценки достоверности различий использовали t-критерий Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Морфолого-анатомические исследования. Листья *Salix polaris*, *Betula nana*, *Vaccinium uliginosum* ssp. *microphyllum* в условиях арктических тундр имеют довольно мелкие размеры. Наибольшая площадь листовой пластинки отмечена у широко распространенного среди исследуемых видов *S. polaris*. У *V. uliginosum* и *B. nana* площадь в 3,7 и 2 раза меньше, чем у ивы (табл. 1). По толщине листа различия между видами менее выражены (190–230 мкм). Согласно данным [23], толщина листа в 200–250 мкм характерна для ксеромезо- и мезоксерофитов, что позволяет отнести все виды к мезофитам.

Листья исследуемых кустарничков имеют типично дорсовентральное строение, ассимиляционная ткань листовой пластинки имеет четко

Таблица 1

**Параметры анатомической структуры листьев кустарничков арктических тундр
на Западном Шпицбергене**

Table 1

Anatomical indices of dwarf shrub leaves of arctic tundra in West Svalbard

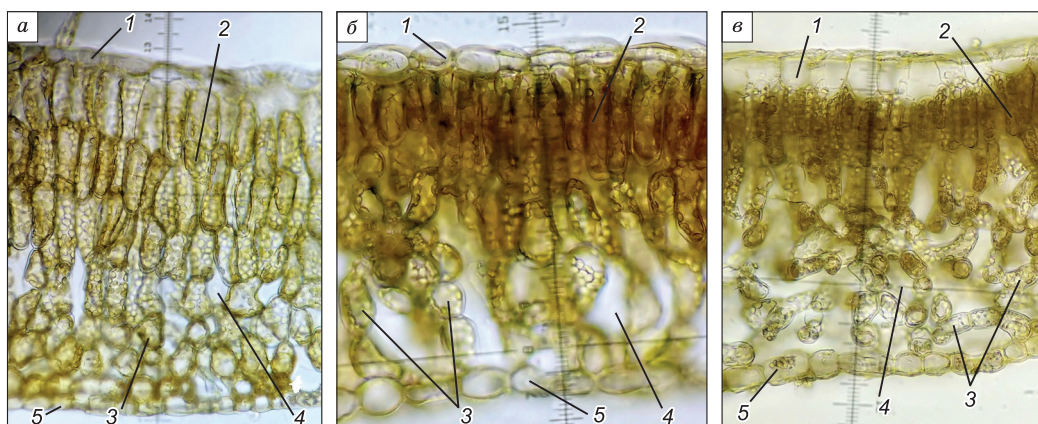
Показатели Indices	<i>Salix polaris</i>	<i>Vaccinium uliginosum</i>	<i>Betula nana</i>
Площадь, см ² / Area, cm ²	1,1±0,05	0,3±0,01	0,5±0,01
Толщина, мкм / Thickness, μm:			
листа / leaf	202,7±3,2	191,0±3,3	230,7±3,6
кутикула / cuticle	3,5±0,2	3,8±0,2	3,3±0,2
эпидерма, В/Н /epidermis, U/L	15,0±0,3/12,6±0,2	17,1±0,3/16,8±0,4	24,1±1,0/15,1±0,4
ПМ (N слоев) / PM (N layers)	97,0±2,2 (2–3)	62,0±1,5 (2)	63,7±1,3 (2)
ГМ (N слоев) / SM (N layers)	84,7±4,1 (3–4)	91,0±1,9 (2–4)	113,0±2,2 (5–6)
Клетки ПМ / PM cells:			
L, мкм / Length, μm	41,6±0,9	41,1±1,2	31,1±1,0
D, мкм / Width, μm	13,0±0,3	13,5±0,3	11,0±0,2
V, тыс. мкм ³ / Volume, thousand μm ³	4,1±0,1	4,4±0,2	2,2±0,1
N, тыс.шт./см ² / Number, thousand pieces/cm ²	176±4	191±7	166±6
Клетки ГМ / SM cells:			
L, мкм / Length, μm	23,6±0,6	23,6±0,7	22,0±0,5
D, мкм / Width, μm	16,1±0,4	17,0±0,4	14,7±0,3
V, тыс. мкм ³ / Volume, thousand μm ³	3,4±0,2	3,6±0,2	2,6±0,1
N, тыс.шт./см ² / Number, thousand pieces/cm ²	145±5	148±6	150±4
Клетки склеренхимы / Sclerenchyma cells:			
L, мкм / Length, μm	17,5±0,6	14,3±0,4	12,7±0,4
D, мкм / Width, μm	11,3±0,5	10,6±0,5	9,6±0,4
V, тыс. мкм ³ / Volume thousand, μm ³	1,3±0,1	0,8±0,1	0,7±0,1
Устьица, В/Н / Stomata, U/L			
L, мкм / Length, μm	32,4±0,3 / 31,0±0,4	– / 28,0±0,6	– / 37,3±0,7
D, мкм / Width, μm	25,6±0,2 / 22,6±0,3	– / 19,1±0,4	– / 29,1±0,5
Сус, мкм ² / Stomata area, μm ²	654,1±12,0/554,3±15,5	– / 423,0±17,0	– / 874,0±25,1
N, шт./мм ² / Number, pieces/mm ²	98±2 / 146±8	– / 203±4	– / 182±4
Число хлоропластов на клетку, шт., ПМ/ГМ / Chloroplast number per cell, pieces, PM/SM	23±0,4/ 19±0,4	24±0,5/ 17±0,4	21±0,4/ 16±0,3

Примечание. Эпидерма: В – верхняя, Н – нижняя; Мезофилл (М): П – палисадный, Г – губчатый.

Note. Epidermis: U – upper, L – lower; Mesophyll (M): P – palisade, S – spongy.

выраженную дифференциацию на палисадный и губчатый мезофилл (см. рисунок). Палисадный мезофилл расположен на адаксиальной стороне листа и состоит из 2–3 слоев плотно расположенных вытянутых клеток (индекс формы L/D у *S. polaris* – 3,2, *V. uliginosum* – 3,0, у *B. nana* составляет 2,8). Можно отметить, что только у *S. polaris* встречались листья с тремя слоями палисадных клеток. Губчатый мезофилл – на абаксиальной стороне и представлен неправильными овальными и округлыми клетками (индекс формы у всех трех видов – в среднем – 1,5). У *S. polaris* губчатый мезофилл представлен

3–4 слоями плотно упакованных клеток с небольшими межклетниками. Губчатая паренхима у *B. nana* представлена 5–6 слоями клеток, объем которых в 1,2 раза больше клеток палисадного мезофилла. Для *V. uliginosum* выделяются 2–4 слоя рыхло расположенных клеток в губчатом мезофилле, объем и количество которых в 1,2 раза меньше, по сравнению с клетками палисадного слоя. Оба эти вида в губчатом слое имеют крупные межклетники. Коэффициент палисадности (отношение толщины палисадной к толщине губчатой ткани) составил: у *S. polaris* – 1,1, *V. uliginosum* – 0,68, *B. nana* – 0,56.



Фрагменты поперечного среза листьев: а – *Salix polaris*, б – *Vaccinium uliginosum* L. ssp. *microphyllum*, в – *Betula nana*. 1 – верхняя эпидерма, 2 – палисадный мезофилл, 3 – губчатый мезофилл, 4 – межклетник, 5 – нижняя эпидерма (увеличение 40^х, фото Ермолаевой О.В.)

Fragments of a cross-section of leaves: а – *Salix polaris*, б – *Vaccinium uliginosum* L. ssp. *microphyllum*, в – *Betula nana*. 1 – upper epidermis, 2 – palisade mesophyll, 3 – spongy mesophyll, 4 – intercellular, 5 – lower epidermis (magnification 40^x, photo by Ermolaeva O.V.)

Покровная ткань у листьев изучаемых видов на поперечном срезе представлена однослойной верхней и нижней эпидермой, поверхность которой покрыта кутикулой толщиной около 3–4 мкм. Показано, что у *S. polaris* верхняя эпидерма также толще нижней в 1,2 раза, у *B. nana* верхняя эпидерма в 1,6 раза толще нижней эпидермы, клетки имеют кругло-квадратичную или прямоугольную форму и вытянуты вдоль листа (индекс формы – 0,8). Клетки нижней эпидермы имеют извилистые стенки, мельче, в основном кругло-квадратичные (индекс формы – 1,1). У *V. uliginosum* толщина верхней и нижней эпидермы достоверно не различалась.

У *S. polaris* – амфистоматический тип листовой пластинки (устьица располагаются на обеих сторонах листа). Причем устьица на верхней эпидерме имеют большие размеры и площадь по сравнению с таковыми на нижней эпидерме. При этом количество их в 1,5 раза меньше, чем на нижней эпидерме. У *V. uliginosum* и *B. nana* – гипостоматический (устьица хаотично расположены на нижней стороне листа). У всех видов устьица расположены в одной плоскости с эпидермой. Замыкающие клетки устьиц окружены околоустьичными клетками, которые по форме не отличаются от клеток эпидермы (аномоцитный тип устьичного аппарата). Для *V. uliginosum* и *B. nana* характерно увеличение количества устьиц (180–203 шт./мм²) по сравнению с *S. polaris*, но площадь их у березы в 2 раза больше, чем у голубики. Устьица у *V. uliginosum* имеют

более вытянутую форму, чем у *B. nana* (индекс формы – 1,5 и 1,3 соответственно). Отметим, что у широко распространенного в арктической тундре *S. polaris* количество устьиц на нижней эпидерме в среднем в 1,3 раза меньше, чем у *V. uliginosum* и *B. nana*.

В жилках листовой пластинки формируется механическая ткань склеренхима. У *S. polaris* под нижней эпидермой в центральной жилке листа формируются два слоя механической ткани колленхимы, а один–два слоя склеренхимы с объемом клеток 1,3±0,1 тыс. мкм³ образуются во всех жилках со стороны ксилемы и флоэмы коллатерального проводящего пучка. У *B. nana* клетки склеренхимы объемом 0,7±0,1 тыс. мкм³ расположены в два–три слоя со стороны ксилемы, в один–два слоя со стороны флоэмы коллатерального проводящего пучка. На обеих сторонах листа расположены пельтатные (эфирномасличные) железки, диаметр которых на Западном Шпицбергене достигает 112,0±2,0 мкм, и формируются клетки со слизью. У *V. uliginosum* склеренхима состоит из клеток объемом 0,8±0,1 тыс. мкм³ и расположена в два–три слоя со стороны ксилемы, в три–пять слоев со стороны флоэмы коллатерального проводящего пучка.

Изученные виды в условиях арктических тундр содержат 16–24 хлоропластов в клетке мезофилла. При этом в палисадном слое их количество в 1,2–1,4 раза больше, чем в губчатом.

Физиолого-биохимические исследования. Содержание суммарных липидов (СЛ). Наибо-

Содержание суммарных липидов и жирных кислот
в листьях кустарничков Западного Шпицбергена

Table 2

The content of total lipids and fatty acids in the dwarf shrubs leaves in West Svalbard

Вид Species	Суммарные липиды, мг/г а.с.в. Total lipids, mg/g dry weight	Общая сумма ЖК, мг/г а.с.в. НЖК / ННЖК Total fatty acids, mg/g dry weight, SFA/ UFA
<i>Salix polaris</i>	125,37	68,31 / 193,33
<i>Betula nana</i>	108,57	75,61 / 105,08
<i>Vaccinium uliginosum</i>	86,48	79,07 / 95,86

Примечание. НЖК – насыщенные жирные кислоты. ННЖК – ненасыщенные жирные кислоты, а.с.в. – абсолютно сухой вес.

Note. SFA – saturated fatty acids, UFA – unsaturated fatty acids.

лее высокие значения СЛ отмечены у *S. polaris* – широко распространенного доминантного вида сообществ арктической тундры Западного Шпицбергена. У редких видов *B. nana* и *V. uliginosum* содержание СЛ меньше на 13–31 %. Общая сумма жирных кислот в группе насыщенных ЖК (НЖК) варьирует незначительно – 68–79 мг/г а.с.в., тогда как среди ненасыщенных жирных кислот (ННЖК) различия между видами составляют до двух раз (табл. 2).

Жирные кислоты суммарных липидов. В составе СЛ ассимилирующих органов исследованных кустарничков идентифицировано 15 типов индивидуальных ЖК, различающихся по длине углеродных цепей и числу двойных связей. Длина углеродной цепи варьировала от 16 до 22 атомов (табл. 3), и у *S. polaris* идентифицировано 12 доминантных ЖК, у *V. uliginosum* и *B. nana* – по 14 ЖК. Основными ЖК у всех видов, на которые приходится 72–93 % от суммы ЖК, были С16:0 (пальмитиновая), С18:2 (n-6, линолевая) и С18:3 (n-3, α-линоленовая).

Содержание насыщенных жирных кислот (НЖК) в составе СЛ варьирует от 25 до 45 % от суммы ЖК (см. табл. 3). У широко распространенного вида высокоарктических флор Европы *S. polaris* содержание НЖК в 1,8 раза меньше, чем у *B. nana* и *V. uliginosum*. Основной вклад в состав НЖК вносит ЖК С16:0, и ее значение составляет 23–35 %.

Наиболее высокий уровень содержания ненасыщенных жирных кислот (ННЖК) среди изучаемых видов отмечен у *S. polaris* (75 %). Содержание моноеновых ЖК у *B. nana*, *V. uliginosum* составило 11–13 %, а у *S. polaris* – 5 % (см. табл. 3). Основной вклад в состав моноеновых

ЖК у *B. nana*, *V. uliginosum* вносит кислота С18:1(n-9), присутствует гондоиновая кислота С20:1(n-9), а у голубики мелколистной она занимает второе место после С18:1(n-9). Количество диеновых ЖК у *S. polaris* и *B. nana* более высокое (в 2–2,5 раза), чем моноеновых, а у *V. uliginosum*, наоборот, их количество ниже в 1,2 раза (см. табл. 3). Диеновые кислоты представлены кислотами двух семейств: с двойными связями в положении (n-6) и (n-9). Главной из них является линолевая – С18:2(n-6), содержание которой составляет около 90 % среди диеновых ЖК у всех видов.

Содержание триеновых кислот у всех трех видов увеличивается по сравнению с диеновыми кислотами. И наиболее высокие значения отмечены для *S. polaris*. Главной триеновой ЖК является С18:3(n-3), ее содержание достигает наибольших значений у *S. polaris* 57 %, а двух других видов – около 28 %. Кроме того, в минорных количествах идентифицированы кислоты других биосинтетических семейств, например, 16:3(n-6), 18:3(n-4), 18:3(n-6). Содержание длинноцепочечных ЖК (С20–22) у *S. polaris* составило 1,6 %, у теплолюбивых редких видов *V. uliginosum* и *B. nana* – 12,9 и 6,6 % соответственно (табл. 3).

Оценка ненасыщенности и активности десатураз ЖК. Количество ННЖК существенно влияет на проницаемость мембран и активность многих мембраносвязанных ферментов [24]. При оценке ненасыщенности ЖК у исследованных видов используют разные показатели: коэффициент ненасыщенности ЖК (К), индекс двойной связи (ИДС). Так, у исследованных видов кустарничков Западного Шпицбергена значение К

Таблица 3

Групповой состав жирных кислот суммарных липидов (% от суммы)
кустарничков Западного Шпицбергена

Table 3

Group composition of fatty acids of total lipids (% of the total)
of dwarf shrubs of West Svalbard

ЖК Fatty acids (FA)	<i>Salix polaris</i>	<i>Vaccinium uliginosum</i>	<i>Betula nana</i>
Насыщенные Saturated FA	25,12	45,41	42,16
16:0	22,64±1,98	32,0±2,96	34,81±3,83
18:0	1,51±0,06	5,05±0,45	3,11±0,12
20:0	0,54±0,03	6,90±0,41	2,07±0,13
22:0	0,43±0,01	1,46±0,04	2,17±0,15
Ненасыщенные Unsaturated FA	74,86	54,6	57,78
моноеновые monoenoic UFA	4,82	13,37	10,66
16:1 (n-5)	2,48±0,14	2,37±0,08	2,69±0,18
16:1 (n-7)	0,38±0,01	0,97±0,06	0,98±0,05
18:1 (n-9)	1,96±0,85	5,88±0,25	6,42±0,35
20:1 (n-9)	–	4,15±0,34	0,57±0,03
диеновые dienoic UFA	12,17	10,96	17,61
16:2 (n-9)	–	–	2,63±0,11
18:2 (n-6)	11,56±0,98	10,61±0,87	13,26±0,87
20:2 (n-6)	0,61±0,04	0,35±0,01	1,78±0,17
триеновые trienoic UFA	57,87	30,27	29,51
16:3 (n-6)	0,48±0,02	0,73±0,03	1,64±0,12
18:3 (n-3)	57,12±3,53	28,83±1,43	27,27±1,85
18:3 (n-4)	–	0,27±0,01	0,60±0,01
18:3 (n-6)	0,27±0,01	0,44±0,02	–

Примечание. Прочерк – ЖК не обнаружены или содержание менее 0,1 %.

Note. Dash, not found in composition or their content is less than 0.1 %.

изменяется от максимального значения – 2,98 у *S. polaris* до 1,37 у *B. nana* и 1,20 у *V. uliginosum* соответственно (табл. 4). Чем выше значение К, тем больше содержание ненасыщенных жирных кислот и выше степень приспособления к условиям обитания. Распределение видов по величине ИДС, где учитывается не только соотношение ЖК, но и наличие в них двойных связей, показало сходную закономерность с максимальными значениями у *S. polaris*.

Расчет активности ферментного комплекса десатураз ЖК в СЛ у древесных растений показы-

вает, что десатуразы, ответственные за образование диеновых ЖК, более активны по сравнению с активностью десатураз, обеспечивающих синтез моно- и триеновых ЖК у всех видов исследованных растений Западного Шпицбергена. Наиболее высокие значения активности для SDR (ω 9-десатураза) получены для *B. nana*, а для ODR (ω 3-десатураза) и LDR (ω 12-десатураза) для *S. polaris*.

Показателем липидного обмена, по которому можно судить о более благоприятных условиях для развития растений, является величина соот-

Активность ацил-липидных $\Delta 9$, $\Delta 12$ и $\omega 3$ десатураз
листьев кустарничков Западного Шпицбергена

Table 4

Activity of acyl-lipid $\Delta 9$, $\Delta 12$ and $\omega 3$ desaturases
of dwarf shrub leaves of West Svalbard

Активность десатураз Desaturase activity	<i>Salix polaris</i>	<i>Betula nana</i>	<i>Vaccinium uliginosum</i>
К	2,98	1,37	1,20
ИДС	2,03	1,35	1,26
ODR	0,97	0,86	0,87
LDR	0,83	0,67	0,73
SDR	0,56	0,67	0,54
18:3 (n-3)/18:2 (n-6)	4,94	2,06	2,72

Примечание. К – коэффициент ненасыщенности жирных кислот, ИДС – индекс двойной связи, стероил- (SDR), олеил- (ODR) и линолеил- (LDR) десатуразные отношения.

Note. K is the unsaturation coefficient of fatty acids, IDS is the double bond index, steroyl- (SDR), oleyl- (ODR) and linoleyl- (LDR) desaturate ratios.

ношения ЖК C18:3/C18:2, которыми богаты растения. В этом случае его величина, как предполагают авторы, не должна быть менее 2 [25]. Для всех исследованных видов этот показатель оказался выше: для *S. polaris* – 4,9, для *B. nana* – 2,1, *V. uliginosum* – 2,7 (см. табл. 4).

Полученные данные показали, что исследованные виды по параметрам анатомической структуры листьев имеют сходное строение основных показателей мезоструктуры листа: мелколиственность, дорсовентральное строение листа с четкой дифференцировкой на палисадный и губчатый мезофилл. Однако имеются и различия между видами, которые затрагивают некоторые особенности структуры и процессов жизнедеятельности. Так, площадь листа *S. polaris* в 2–4 раза больше, увеличивается число слоев палисадной паренхимы, что обеспечивает более высокий коэффициент палисадности, чем у *B. nana* и *V. uliginosum*. Основной особенностью структуры листа *S. polaris* является амфистоматический тип листовой пластинки, когда устьица расположены как на верхней, так и на нижней стороне листа, в отличие от *B. nana* и *V. uliginosum*. Известно, что растения с амфистоматическими листьями обладают повышенной эффективностью фотосинтеза [26]. Для исследованных кустарничков характерно формирование механической ткани (склеренхимы) в структурах листа, а для *S. polaris* отмечено появление в жилках листа

еще и колленхимы. Эти ткани выполняют опорную функцию, что необходимо для устойчивости растений в условиях сильных ветров. Анатомические параметры видов хорошо согласуются с установленными в работе особенностями липидного метаболизма: высоким содержанием ННЖК, значением коэффициента ненасыщенности (К), значительно более высоким коэффициентом благоприятности условий по показателям соотношения линолевой и линоленовой ЖК. Эти показатели свидетельствуют о более высокой функциональной активности ивы полярной по сравнению с другими кустарничками.

Одним из условий продвижения растений в условия Арктики является поддержание гомеостаза организма в экстремальных условиях среды, что предполагает развитие покровных тканей и защитных структур, охраняющих организм от негативного воздействия факторов. В этот процесс вовлечена и клеточная стенка, которая помимо защитной функции включена и в метаболические процессы, активно участвуя в поддержании апопластического потока [27]. Именно для ивы полярной отмечается более высокая активность работы апопластной системы, что наряду с другими особенностями обеспечивает ее феномен эврибионтности на территории Западного Шпицбергена. Возможности успешного произрастания *B. nana* и *V. uliginosum* обеспечиваются другими механизмами их организации и адаптации. Так,

для структуры листа *B. nana* характерны более высокие значения толщины слоя кутикулы, но уменьшение объема склеренхимы и наличие эфирномасличных железок и клеток со слизью. Высокое содержание суммарных флавоноидов в листьях березы карликовой и группы соединений фенольной структуры в клеточной стенке этого вида подтвердило, что флавоноиды являются основными защитными соединениями у *B. nana* [6]. Известно, что клеточная стенка *B. nana* имеет высокую ионообменную способность по сравнению с *S. polaris*, что обеспечивает усиление ее прочности и жесткости [28]. Это путь большей изоляции от неблагоприятных условий и способ автономной активизации метаболических систем апопласта у *B. nana*. Особенностью *B. nana* и *V. uliginosum* является большее разнообразие ННЖК, значительное увеличение содержания длинноцепочечных жирных кислот, что может быть связано с экстремальностью условий для этих видов [14]. Так, у *B. nana* синтезируются дополнительно ЖК – C20:1(n-9), 16:2(n-9), 18:3(n-6), а у *V. uliginosum* – C16:2(n-9) и C20:1(n-9). Их присутствие в условиях своеобразного климата Западного Шпицбергена свидетельствует о более активном участии ферментативных комплексов десатураз разных биосинтетических семейств в синтезе и регуляции ЖК и поддержании текучести мембранных систем этих видов [29].

Для растений высоких широт отмечается активизация водного потока по системе апопласта и метаболических процессов в клеточной стенке [27]. У кустарничков (*S. polaris*, *B. nana*) отмечена более высокая функциональная активность по сравнению с растениями южных широт [28], что подтверждается их высокой фотосинтетической и дыхательной активностью. Мы предполагаем, что увеличение механических структур, большие объемы устьичного аппарата за счет его расположения на обеих сторонах листа *S. polaris* также включены в стимуляцию водного режима. У этого вида, как и у других представителей рода *Salicaceae*, отмечена высокая доля ионных групп пектиновой природы в клеточной стенке, что также способствует активизации водного обмена [28]. С активизацией водного обмена тесно связано минеральное питание растений. Ранее было показано, что *S. polaris* и *B. nana* входят в группу видов растений с высоким содержанием общего азота и его содержание составило 2,6 % а.с.в. и 2,9 % соответственно [6].

Заключение

Показано, что исследованные виды кустарничков адаптированы к экстремальным условиям Западного Шпицбергена, но имеют разные стратегии. Для *S. polaris* характерны высокие значения объема устьичного аппарата, амфистоматичный тип листа, высокий коэффициент палисадности, большой объем механической ткани листа и высокое содержание ненасыщенных жирных кислот (ННЖК). Вид активно взаимодействует с факторами среды за счет стандартных структурно-функциональных изменений, в том числе и поддержания текучести мембранных систем. Эти особенности в условиях Западного Шпицбергена обеспечивают высокую функциональную активность, прохождение всех этапов онтогенеза и широкое распространение вида.

В отличие от *S. polaris* для *B. nana* и *V. uliginosum* характерны уменьшение площади листа, снижение коэффициента палисадности, гипостоматический тип листа, увеличение разнообразия «второстепенных» ННЖК, отсутствие генеративного развития, что свидетельствует о более высоком для них уровне экстремальности условий. Эти особенности могут быть причиной их ограниченной представленности в экотопах Западного Шпицбергена. Поддержание жизнедеятельности *B. nana* и *V. uliginosum*, оказавшихся на краю ареала распространения, происходит только за счет вегетативного размножения в условиях локальных экотопов.

Гетерогенность территории Западного Шпицбергена обеспечивается за счет перемежающихся горных массивов и равнинных долин, а также выходов термальных вод [30]. Эти особенности территории арктических высокогорий и пути формирования флоры Арктики обеспечили ее разнообразие путем аккумуляирования различных по генезису и биологическим особенностям видов высоких широт в современную эпоху. Б.А. Тихомиров [4] считает, что «не может быть единого типа арктических растений», поскольку в гетерогенной полярной среде встречаются виды, часть из которых успешно адаптировалась, а другие не смогли освоить широкий диапазон условий, но остаются в составе флоры Арктики. Их местообитания ограничены локальными экотопами, специфические условия которых позволяют поддерживать функциональную активность только в процессе вегетативного развития. Таким образом, выявлены две группы

кустарничков с разными адаптационными возможностями, которые формировались в процессе их адаптации к условиям Шпицбергена. Это дает основание для включения этих видов как маркерных для мониторинга состояния среды в гетерогенных условиях высокой Арктики.

Список литературы / References

1. Чернов Ю.И. *Экология и биогеография*. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2008. 580 с.
Chernov Yu.I. *Ecology and biogeography*. Moscow: KMK; 2008. 580 p. (In Russ.)
2. Крутиков А.В., Смирнова О.О., Бочарова Л.К. Стратегия развития российской Арктики. Итоги и перспективы. *Арктика и Север*. 2020;(40):254–269. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.254>.
3. Krutikov A.V., Smirnova O.O., Bocharova L.K. Strategy for the development of the Russian Arctic. Results and prospects. *Arktika i Sever* [Arctic and North]. 2020;(40):254–269. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.40.254>.
4. Rønning O.I. *The Flora of Svalbard*. Oslo: Norsk Polarinstitutt; 1996. 184 p.
5. Тихомиров Б.А. *Очерки по биологии растений Арктики*. М.; Л.: Изд-во АН СССР; 1963. 153 с.
Tikhomirov B.A. *Essays on the Arctic plant biology*. Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1963. 153 p. (In Russ.)
6. Матвеева Н.В. *Зональность в растительном покрове Арктики*. СПб.: Изд-во Ботанического института им. В. Л. Комарова; 1998. 218 с.
Matveeva N.V. *Zoning in the vegetation cover of the Arctic*. St. Petersburg: Komarov Botanical Institute Publishing House; 1998. 218 p. (In Russ.)
7. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю. *Растения и лишайники Западного Шпицбергена: экология, физиология*. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ; 2017. 270 с.
Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu. *Plants and lichens of Western Spitsbergen: ecology, physiology*. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University Publishing House; 2017. 270 p. (In Russ.)
8. Марковская Е.Ф., Розенцвиг О.А., Шмакова Н.Ю. и др. Участие липидов в адаптации высших сосудистых растений к условиям Западного Шпицбергена. *Журнал общей биологии*. 2021;82(6):419–430. <https://doi.org/10.31857/S0044459621060063>
9. Markovskaya E.F., Rozentzvet O.A., Shmakova N.Yu., et al. Involvement of lipids into adaptations of higher vascular plants to the conditions of West Spitsbergen. *Zhurnal Obshchei biologii*. 2021;82(6):419–430. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044459621060063>.
10. Нохсоров В.В., Дударева Л.В., Петров К.А. Состав и содержание липидов и их жирных кислот в хвое *Pinus sylvestris* и *Picea obovata* Ledeb. при их закаливании к низкой температуре в условиях криолитозоны Якутии. *Физиология растений*. 2019;66(4):286–294. <https://doi.org/10.1134/S0015330319040109>.
11. Nokhsorov V.V., Dudareva L.V., Petrov K.A. Composition and content of lipids and their fatty acids in the needles of *Pinus sylvestris* and *Picea obovata* Ledeb. during their quenching to low temperature in the cryolithoon of Yakutia. *Plant Physiology*. 2019;66(4):286–294. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330319040109>.
12. Zhang M., Barg R., Yin M., et al. Modulated fatty acid desaturation via overexpression of two distinct x-3 desaturases differentially alters tolerance to various abiotic stresses in transgenic tobacco cells and plants. *The Plant Journal*. 2005;44(3):361–371. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2005.02536.x>
13. Zheng G., Tian B., Zhang F., et al. Plant adaptation to frequent alterations between high and low temperatures: remodeling of membrane lipids and maintenance of unsaturation levels. *Plant Cell Environ*. 2011;34(9):1431–1442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02341.x>
14. Schmid K.M., Ohlrogge J.B. Lipid metabolism in plants. In: Vance D.E., Vance J.E. (eds.) *Biochemistry of lipids, lipoproteins and membranes*. Amsterdam: Elsevier; 2002:93–126. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7306\(02\)36006-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-7306(02)36006-X)
15. Niemela P.S., Hyvonen M.T., Vattulainen I. Atom-scale molecular interactions in lipid raft mixtures. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2009;1788(1):122–135. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2008.08.018>
16. Quinn P.J., Wolf C. The liquid-ordered phase in membranes. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Biomembranes*. 2009;1788(1):33–46. <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2008.08.005>
17. Жуков А.В. Жирные кислоты с очень длинной цепью в составе мембранных липидов растений. *Физиология растений*. 2018;65(6):418–437. <https://doi.org/10.1134/S0015330318050184>
18. Zhukov A.V. Fatty acids with a very long chain in the composition of plant membrane lipids. *Plant Physiology*. 2018;65(6):418–437. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0015330318050184>.
19. Тисленко Д.И., Иванов Б.В. Долгопериодная изменчивость температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген в период первого (1920–1940 гг.) и современного потепления в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015; 104(2):93–101.
20. Tislenko D.I., Ivanov B.V. Long-term variability of Atlantic waters temperature in the Fjords of Spitsbergen conditions of modern warming. *Problemy Arktiki i Subarkтики*. 2015;104(2):93–101. (In Russ.)
21. Королева Н.Е., Константинова Н.А., Белкина О.А. и др. *Флора и растительность побережья залива Гренфьорд (архипелаг Шпицберген)*. Апатиты: Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина; 2008. 111 с.

- Koroleva N.E., Konstantinova N.A., Belkina O.A., et al. *Flora and vegetation of Grønfford area (Spitsbergen archipelago)*. Apatity: Polar-Alpine Botanical Garden-Institute Publishing House; 2008. 111 p. (In Russ.)
17. Секретарева Н.А. *Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий*. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2004. 129 с.
- Sekretareva N.A. *Vascular plants of the Russian Arctic and adjacent territories*. Moscow: KMK; 2004. 129 p. (In Russ.)
18. Vascular plants in Svalbard. The flora of Svalbard; 2020 [This page was last edited on 14 July 2023]. Доступно: <https://www.svalbardflora.no/oldsite/> Second edition.
19. Шуляковская Т.А., Ильинова М.К., Карелина Т.В. Липидный состав тканей ствола *Betula pendula* и *B. pendula* var. *carelica* (Betulaceae). *Растительные ресурсы*. 2014;50(1):94–104.
- Shulyakovskaya T.A., Il'inova M.K., Karelina T.V. The lipid composition of the trunk tissues of *Betula pendula* and *B. pendula* var. *carelica* (Betulaceae). *Rastitelnye resursy*. 2014;50(1):94–104. (In Russ.)
20. Алаудинова Е.В., Миронов П.В. Липиды меристем лесообразующих хвойных пород центральной Сибири в условиях низкотемпературной адаптации. 2. Особенности метаболизма жирных кислот фосфолипидов меристем *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L. и *Pinus sylvestris* L. *Химия растительного сырья*. 2009;(2):71–76.
- Alaudinova E.V., Mironov P.V. Lipids of meristems of forest-forming conifers of Central Siberia in conditions of low-temperature adaptation. 2. Features of metabolism of fatty acids of phospholipids of meristems *Larix sibirica* Ledeb., *Picea obovata* L. and *Pinus sylvestris* L. *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2009;(2):71–76. (In Russ.)
21. Мокроносов А.Т., Борзенкова Р.А. Методика количественной оценки структуры функциональной активности фотосинтезирующих тканей и органов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;61(3):119–133.
- Mokronosov A.T., Borzenkova R.A. Method of quantitative estimate of the structure and functional activity of photosynthetic tissues and organs. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1978;61(3):119–133. (In Russ.)
22. Борзенкова Р.А., Храмцова Е.В. *Определение мезоструктурных характеристик фотосинтетического аппарата растений*. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та; 2006. 14 с.
- Borzenkova R.A., Hramtsova E.V. *Determination of mesostructural characteristics of the photosynthetic apparatus of plants*. Ekaterinburg: Ural University Publishing House; 2006. 14 p. (In Russ.)
23. Иванова Л.А. Адаптивные признаки структуры листа растений разных экологических групп. *Экология*. 2014;(2):109–118. <https://doi.org/10.7868/S0367059714020024>
- Ivanova L.A. Adaptive signs of leaf structure of plants of different ecological groups. *Russian Journal of Ecology*. 2014;(2):109–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367059714020024>.
24. Loll B., Kern J., Saenger W., et al. Lipids in photosystem II: Interactions with protein and cofactors. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics*. 2007;(1767):509–519. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2006.12.009>
25. Laskay G., Lehoczki E. Correlation between linolenic-acid deficiency in chloroplast membrane lipids and decreasing photosynthetic activity in barley. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)*. 1986;849(1):77–84. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(86\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0005-2728(86)90098-8)
26. Rotondi A., Rossi F., Asunis C., Cesaraccio C. Leaf xeromorphic adaptations of some plants of a coastal Mediterranean macchia ecosystem. *Journal of Mediterranean Ecology*. 2003;3(4):25–35.
27. Гамалей Ю.В. *Транспортная система сосудистых растений*. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та; 2004. 421 с.
- Gamaley Ju.V. *Transport system of vascular plants*. St. Petersburg: St. Petersburg University Publishing House; 2004. 421 p. (In Russ.)
28. Марковская Е.Ф., Шмакова Н.Ю., Теребова Е.Н. Содержание общего азота и особенности клеточной стенки некоторых видов флоры Западного Шпицбергена. *Фундаментальные исследования*. 2014;(12):124–130.
- Markovskaya E.F., Shmakova N.Yu., Terebova E.N. The content of total nitrogen and the features of the cell wall of some species of flora of Western Svalbard. *Fundamental research*. 2014;(12):124–130. (In Russ.)
29. Лось Д.А. *Десатуразы жирных кислот*. М.: Научный мир; 2014. 370 с.
- Los' D.A. *Fatty acid desaturases*. Moscow: Scientific world; 2014. 370 p. (In Russ.)
30. Alsos I.G., Eidesen P.B., Ehrich D., et al. Frequent long-distance plant colonization in the changing Arctic. *Science*. 2007;316(5831):1606–1609. <https://doi.org/10.1126/science.1139178>

Об авторах

ШМАКОВА Наталья Юрьевна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8342-1764>, ResearcherID: 97378, Scopus Author ID: 57191981695, e-mail: shmanatalya@yandex.ru

МАРКОВСКАЯ Евгения Федоровна, доктор биологических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-0658-6845>, Scopus Author ID: 6603350545, SPIN: 9314-1071:121063, e-mail: volev10@mail.ru

Н. Ю. Шмакова и др. ♦ Адаптация кустарничков к условиям арктических тундр Западного Шпицбергена

МОРОЗОВА Кира Владимировна, кандидат биологических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6655-5197>, Scopus Author ID: 56906831100, e-mail: mkv25@bk.ru

ЕРМОЛАЕВА Ольга Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6310-3846>, ResearcherID: 1016999, e-mail: olia.ermolik@yandex.ru

About the authors

SHMAKOVA, Natalia Yurjevna, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7718-7681>, ResearcherID: 97378, Scopus Author ID: 57191981695, e-mail: shmanatalya@yandex.ru

MARKOVSKAYA, Evgenia Fedorovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-0658-6845>, Scopus Author ID: 6603350545, SPIN: 9314-1071:121063, e-mail: volev10@mail.ru

MOROZOVA, Kira Vladimirovna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-6655-5197>, Scopus Author ID: 56906831100, e-mail: mkv25@bk.ru

ERMOLAEVA, Olga Vladimirovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6310-3846>, ResearcherID: 1016999, e-mail: olia.ermolik@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 26.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 15.01.2024

Принята к публикации / Accepted 19.02.2024

УДК 574.2

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-121-128>

Оригинальная статья

Влияние выбросов Саяногорского алюминиевого комбината на изменчивость морфологических признаков и фитопатологическое состояние сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753)

И. В. Пак✉, М. В. Семенова, В. Л. Рябикова, В. В. Сагалакова

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, Российская Федерация

✉ i.v.pak@utmn.ru

Аннотация

Целью исследования является изучение изменчивости морфологических признаков, частоты некрозов и цитогенетических показателей у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753), произрастающей на территориях, подвергающихся техногенному воздействию Саяногорского алюминиевого завода (САЗ). Показано, что на загрязненных участках достоверно уменьшаются показатели репродуктивных органов сосны, снижаются энергия прорастания и всхожесть семян, увеличивается частота некрозов хвои в сравнении с контролем. На основе цитогенетического анализа определены митотический индекс и частота аномальных митозов в клетках апикальной меристемы проростков сосны обыкновенной. На загрязненных участках митотическая активность в 1,35–0,8 раза меньше в сравнении с контролем. Выявлена тенденция к увеличению частоты аномальных митозов у сосны обыкновенной на опытных участках. Полученные данные позволили оценить состояние сосны обыкновенной на территории, подвергающейся воздействию САЗ.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, частота некрозов хвои, энергия прорастания семян, всхожесть семян, хромосомные нарушения, митотический индекс

Для цитирования: Пак И.В., Семенова М.В., Рябикова В.Л., Сагалакова В.В. Влияние выбросов Саяногорского алюминиевого комбината на изменчивость морфологических признаков и фитопатологическое состояние сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L., 1753). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):121–128. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-121-128>

Original article

Influence of Sayanogorsk Aluminum Plant emissions on morphological characteristics and phytopathology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L., 1753)

Irina V. Pak✉, Marina V. Semenova, Valentina L. Ryabikova, Victoria V. Sagalakova

University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

✉ i.v.pak@utmn.ru

Abstract

This article presents data on the variability of morphological features and cytogenetic indicators in Scots Pine (*Pinus sylvestris*) growing in areas affected by the industrial activity of the Sayanogorsk Aluminum Plant (SAP). We demonstrated that in polluted plots located at a distance of 1 and 5 km from the plant, the reproductive organ indicators of pine significantly decreased, germination energy and viability decreased, and needle necrosis frequency increased compared with the control. A significant increase in the frequency of class III needle necrosis in experimental plots by 7.2–8.6 times compared with the control, as well as a decrease in germination energy and seed germination in experimental plots by 1.1 and 1.3–1.5 times indicates the strong negative impact of SAP emissions on pine. Mitotic index and frequency of chromosomal aberrations in the apical meristem cells of Scots Pine seedlings were determined by cytogenetic analysis. A considerable reduction in mitotic activity by 1.35 to 0.8 times was observed in the meristem

cells of Scots Pine growing in experimental plots, compared with the control plot. A tendency toward an increase in the frequency of abnormal mitoses of Scots Pine in the experimental areas was observed. Thus, the data obtained made it possible to assess the condition of Scots Pine in areas exposed to the influence of SAP.

Keywords: Scots Pine, needle's necrosis frequency, seed's germination energy, seed's viability, chromosomal aberrations, mitotic index

For citation: Pak I.V., Semenova M.V., Ryabikova V.L., Sagalakova V.V. Influence of Saynogorsk Aluminum Plant emissions on morphological characteristics and phytopathology of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L., 1753). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):121–128. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-121-128>

Введение

В результате активного развития промышленности в Восточной Сибири все острее становится проблема оценки состояния живых организмов в условиях нарастающего антропогенного давления [1, 2]. Особое внимание привлекает сосна обыкновенная как широко распространенный вид-биоиндикатор, чувствительный к стрессовым воздействиям [3, 4]. Даже при соблюдении всех санитарных и экологических норм невозможно исключить выбросы в окружающую среду загрязняющих веществ, многие из которых являются токсикантами для растений [2, 3, 5–8]. В связи с этим актуальным является поиск у видов-биоиндикаторов признаков, которые позволили бы оценивать влияние техногенного загрязнения.

Целью настоящего исследования является изучение изменчивости морфологических признаков и оценка цитогенетических показателей у *Pinus sylvestris* L., произрастающей на территориях, подвергающихся техногенному воздействию САЗ.

Объекты и методы исследования

Исследования были проведены в 2021–2022 гг. в г. Саяногорск (Республика Хакасия). Объектом исследования явилась сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Сбор материала осуществляли в трех районах: первый и второй располагались в районе САЗ (АО «РУСАЛ Саяногорск») и являлись опытными, третий выступал контрольным. Для проведения исследований подбирали участки с одинаковыми лесорастительными условиями. Леса на них представлены средневозрастными сосняками с травяным покровом. Саяногорский алюминиевый завод – завод группы РУСАЛ, расположенный на территории Республики Хакасия в южной части Минусинской котловины, в 15 км на север от Западных Саян. Это современное российское предприятие металлургии, основной про-

филь деятельности которого – алюминиевая промышленность.

В качестве первого опытного участка был выбран сосновый лес, расположенный рядом с с. Новонисейка на расстоянии 5 км от САЗ (рис. 1) в юго-восточном направлении, на котором отмечено максимальное загрязнение почвы продуктами алюминиевой промышленности: содержание в почве фтора до 2 ПДК, бенз(а)пирена до 1,5 ПДК; фтора 1,1–2,0 ПДК [9].

Второй опытный участок расположен на расстоянии 1 км от промузла. Данная территория входит в пределы санитарно-защитной зоны Саяногорского промузла и в значительной степени подвергается техногенному загрязнению (см. рис. 1).

В качестве контрольного участка была выбрана территория соснового леса в окрестностях загородного отеля «Жарки», располагающаяся на горном хребте Джойский в Республике Хакасия на расстоянии около 35 км от САЗ.

Сбор материала для морфологического анализа: хвоя, побеги, шишки, производился по стандартной методике [10], от 10 модельных деревьев на каждом участке (окружность ствола и диаметр составляли на участке 1 $81,0 \pm 0,44$ см и $25,7 \pm 0,14$ см соответственно; на участке 2 – $80,9 \pm 0,37$ см и $25,7 \pm 0,14$; на контрольном участке – $81,0 \pm 0,47$ см и $25,7 \pm 0,15$). Для определения частоты некрозов хвои использовали стандартные методики [11–13]. В анализе использовали по 100 хвоинок с контрольного и опытных участков. Определяли I, II, III классы некроза [11].

Для определения показателей всхожести и энергии прорастания семян отбирались по 100 шишек с контрольного и опытных участков. Сбор производился в ноябре, в соответствии с периодом созревания семян (октябрь–декабрь). Из собранных шишек извлекались семена. Для проращивания отбирали созревшие обескрыленные семена. Было отобрано 310 штук семян с опытного участка 1, 310 штук семян с опытного участка 2 и 310 штук семян с контрольного. После стратификации семена проращивали.

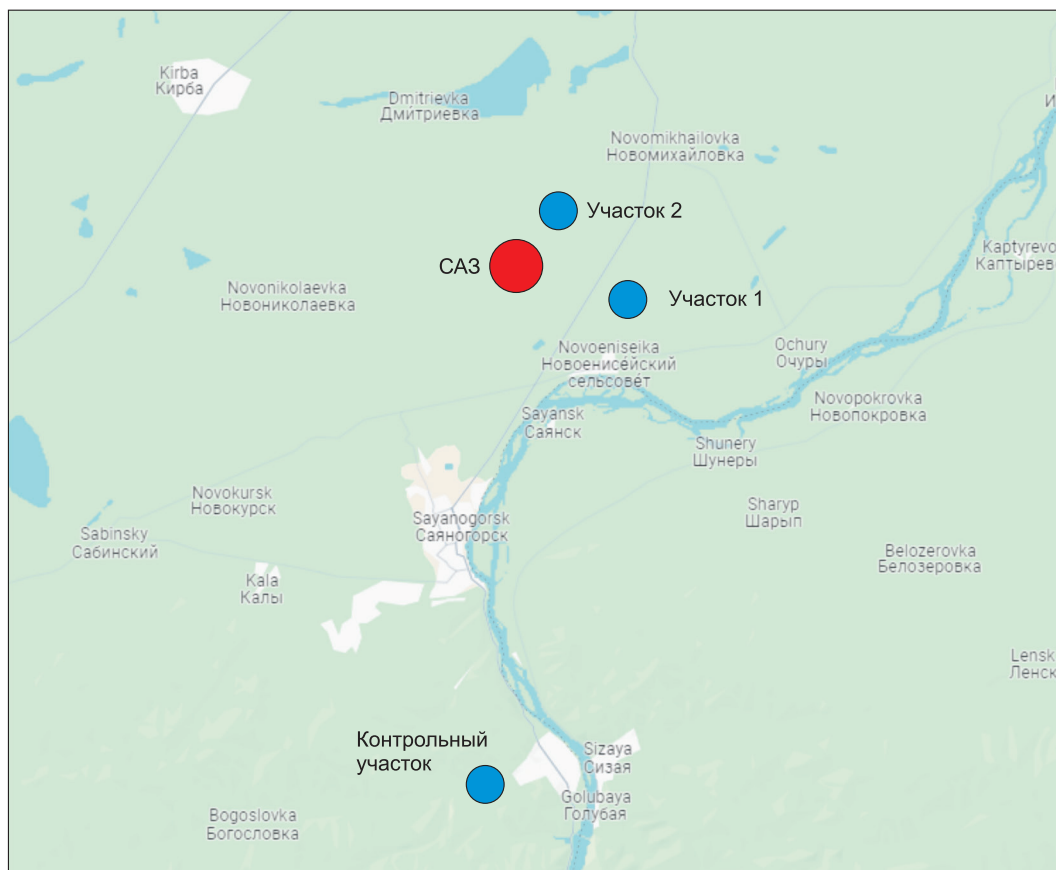


Рис. 1. Схема расположения опытных участков

Fig. 1. Location of experimental plots

Проращивание проводилось по стандартной методике [14]. Определение энергии прорастания на 7 сутки и всхожести на 15 сутки проводилось в соответствии с ГОСТ 13056.6-97 «Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести» [15].

Определение митотического индекса в клетках апикальной меристемы проростков сосны обыкновенной проводили по стандартной методике [16]. Фиксировали проростки в фиксаторе Кларка, окрашивание проводили 2%-м раствором ацетоорсеина, приготовление препаратов осуществляли также по этой методике. При проведении цитогенетического анализа использовали микроскоп «AxioStar» при увеличении ок. $10 \times$ об. 100. Проводили подсчет числа фаз митоза: профаз, метафаз, анафаз и телофаз в делящихся клетках и клеток в состоянии интерфазы (рис. 2). Митотический индекс определяли в промилле как отношение числа клеток в митозе к общему числу просмотренных клеток, включая клетки в интерфазе [16].

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета прикладных программ MS Excel и Statistica.

Результаты и обсуждение

Предприятия алюминиевой промышленности являются мощным источником загрязнения прилегающих к нему территорий: почвы, атмосферы, водоемов. По данным проекта нормативов ПДВ от АО «РУСАЛ Саяногорск», в атмосферный воздух с САЗ поступает 79 видов различных загрязняющих веществ, из которых наиболее опасными (I–IV класс опасности) являются следующие: бенз(а)пирен; фтористые соединения; ди-алюминия триоксид; пыль неорганическая (SiO_2 до 20 %); углерод (сажа); диоксиды азота и серы; оксид углерода [9].

Анализ морфологической изменчивости видов-биоиндикаторов позволяет относительно быстро, без использования специального лабораторного оборудования дать оценку состояния растения по его внешним признакам и опосредованно судить об экологической ситуации на исследуемых

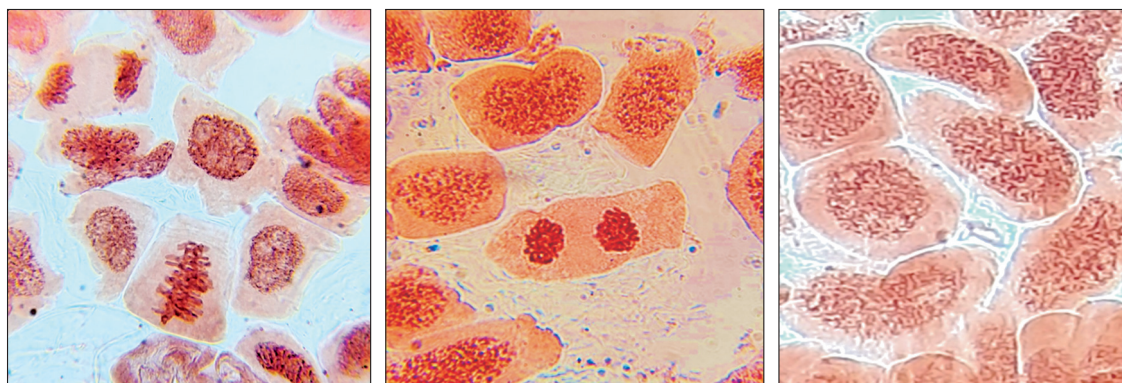


Рис. 2. Фазы митоза в клетках меристемы проростков сосны обыкновенной: анафаза и метафаза; телофаза; профазы (слева направо соответственно)

Fig. 2. Mitosis phases in meristem cells of Scots Pine seedlings: anaphase and metaphase; telophase; prophase (from left to right)

территориях. Сосна является достаточно чувствительным к техногенному загрязнению видом [12]. Ядовитые вещества, вырабатываемые при получении алюминия – оксиды серы, азота, фториды

непосредственно влияют на хвою сосны, провоцируя некрозы, приводя к дефолиации [3, 5, 6, 8].

В табл. 1 приведены статистические данные морфологического исследования признаков взрос-

Таблица 1

Показатели морфологических признаков сосны обыкновенной, произрастающей на разном расстоянии от промышленного комплекса САЗа

Table 1

Indicators of morphological features of Scots Pine growing at different distances from the SAP industrial complex

Признаки / Indicators	Опытный участок 1 / Experimental plot 1		Опытный участок 2 / Experimental plot 2		Контрольный участок / Control plot	
	$\bar{x} \pm m_x, \%$	CV, %	$\bar{x} \pm m_x, \%$	CV, %	$\bar{x} \pm m_x, \%$	CV, %
Показатели проростков, выращенных в лабораторных условиях из семян, собранных на разных участках (на 15 сутки)						
Длина корешка, мм	4,65±0,21^	11,73	4,04±0,22^	14,47	4,49±0,25	14,44
Длина стебелька, мм	13,42±0,93	18,40	12,64±0,30	6,37	14,27±1,02	18,89
Морфометрические показатели взрослых деревьев, произрастающих на разных участках						
Длина прироста за текущий год, см	18,06±0,52	9,08	18,00±0,53	9,25	18,36±0,50	8,63
Длина хвоинки, см (на побегах текущего года)	5,89±0,20	10,91	6,62±0,73	23,26	5,51±0,27	15,67
Количество пучков, шт. (на побегах текущего года)	86,00±3,48	12,88	89,00±3,71	13,90	80,00±3,82	15,26
Длина шишки, см	4,17±0,06*	14,13	4,07±0,05*	13,47	4,41±0,04	7,96
Ширина шишки, см	2,46±0,03	14,10	2,40±0,03*	13,81	2,53±0,03	11,57
Масса шишки, г	6,83±0,18*^	26,58	6,13±0,16*^	26,44	8,43±0,20	23,26

* Различия между контрольным и опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$); ^ – различия между опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$).

* The differences between the control and experimental plots are statistically significant ($p \leq 0,05$); ^ – differences between experimental plots are statistically significant ($p \leq 0,05$).

лых деревьев сосны обыкновенной, растущей на опытных и контрольном участках, а также данные проращивания семян. Выявлено уменьшение размерных показателей шишек у сосны на опытных участках в сравнении с контролем, что свидетельствует о влиянии загрязняющих веществ на репродуктивные органы сосны.

Оценка изменчивости морфологических признаков показала, что значения коэффициентов вариации выше на опытных участках в сравнении с контролем по всем исследованным признакам. Однако, различия по изменчивости не были существенными: на участке 1 значения коэффициентов вариации колебались в пределах от 9,08 до 26,58 %; на участке 2 – от 6,37 до 26,44; на контрольном участке – от 8,63 до 23,26 % (см. табл. 1).

Полигоны изменчивости морфологических признаков на контрольном и опытных участках различались незначительно (рис. 3). Площадь полигона изменчивости морфологических признаков у сосны, произрастающей на участке 2, меньше, чем на контрольном и опытном участке 2. Но выявленные различия по значениям коэффициентов вариации незначительны.

Поражение хвои сосны обыкновенной некрозами и хлорозами связано с негативным действием загрязняющих веществ в почве и воздухе, таких как фториды, диоксид серы, мелкодисперсная пыль. Известно, частота некрозов и хлорозов является объективным показателем состояния окружающей среды, присутствия в ней загрязняющих веществ [17]. В наших исследованиях была проанализирована частота поражения хвои сосны обыкновенной некрозом, что позволило оценить подверженность сосны негативному влиянию выбросов САЗ (рис. 4).

Как видно из рис. 4, частота некрозов III класса резко возрастает на опытных участках, в то время как на контрольном участке преобладают некрозы I класса. Увеличение частоты некрозов III класса, критического для здоровья сосны, свидетельствует о негативном действии выбросов САЗ, загрязняющих почву и воздух.

При проращивании семян сосны с опытных и контрольного районов на 7-й и 15-й день были определены энергия прорастания семян и их всхожесть (табл. 2). Отмечено уменьшение показателей жизнеспособности семян на опытных участках в сравнении с контролем. Энергия прорастания у сосны на участке 1 снижается в сравнении с контролем в 0,8 раза; на участке 2 – в

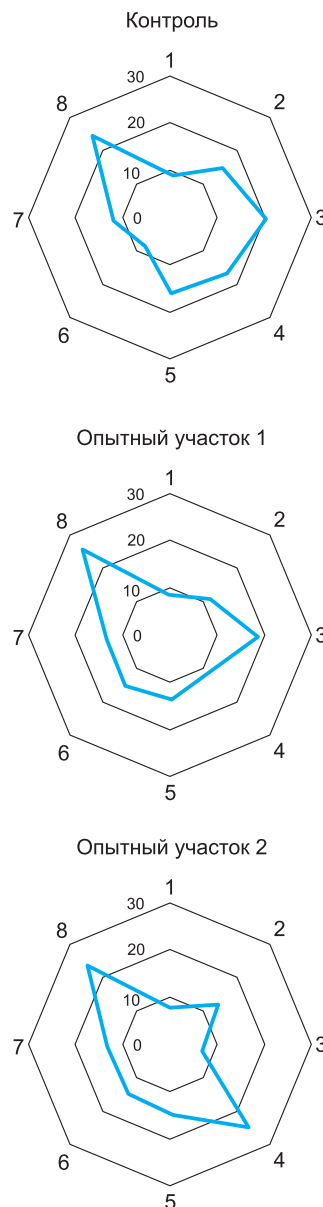


Рис. 3. Полигоны изменчивости морфологических признаков (CV, %) у сосны обыкновенной на разных участках: 1 – длина побега, 2 – длина корешка, 3 – длина ростка, 4 – длина хвоинки, 5 – количество пучков, 6 – длина шишки, 7 – ширина шишки, 8 – масса шишки

Fig. 3. Polygons of variability of morphological features (CV, %) in Scots Pine in different areas: 1 – shoot length, 2 – root length, 3 – sprout length, 4 – needle length, 5 – number of buds, 6 – cone length, 7 – cone width, 8 – cone mass

0,9 раза. Всхожесть семян сосны также уменьшается в 0,6–0,7 раза на опытных участках в сравнении с контрольным участком.

Снижение показателей жизнеспособности (энергии прорастания и всхожести) может быть следствием уменьшения митотической актив-

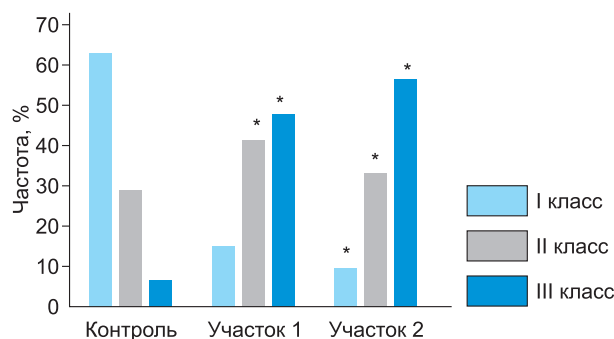


Рис. 4. Характеристика поражения хвои сосны обыкновенной некрозами I–III классов: * – различия между контрольным и опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$)

Fig. 4. Characteristics of damage to Scots Pine needles by necrosis of classes I–III: * – the differences between the control and experimental areas are statistically significant ($p \leq 0.05$)

ности и увеличения доли аномальных митозов в тканях (табл. 3).

Проведенный цитогенетический анализ выявил достоверное снижение митотической активности в тканях апикальной меристемы проростков сосны на опытных участках (см. табл. 3). Митотический индекс у сосны на опытном участке 1 уменьшается на 10,25 %; на опытном участке 2 – на 56,82 % в сравнении с контролем, что свидетельствует о нарушении клеточного цикла и угнетении жизнедеятельности клетки.

В табл. 3 представлены также данные по частоте аномальных митозов в клетках сосны на опытных и контрольном участках. Выявлена тенденция к увеличению частоты аномальных митозов на опытных участках, но различия с

Таблица 2

Энергия прорастания и всхожесть семян сосны обыкновенной на разных участках

Table 2

Germination energy and viability of Scots Pine seeds in different areas

Показатель / Indicator	Опытный район 1 / Experimental plot 1		Опытный район 2 / Experimental plot 2		Контрольный район / Control plot	
	$x \pm m, \%$	CV, %	$x \pm m, \%$	CV, %	$x \pm m, \%$	CV, %
Энергия прорастания	$17,74 \pm 1,05^*$	30,02	$15,48 \pm 0,51^*$	19,76	$23,81 \pm 0,53$	21,77
Всхожесть	$50,97 \pm 1,07^{*^{\wedge}}$	12,50	$55,16 \pm 1,45^{*^{\wedge}}$	15,76	$60,94 \pm 1,14$	11,20

* – различия между контрольным и опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$); ^ – различия между опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$).

* – differences between control and experimental plots are statistically significant ($p \leq 0.05$); ^ – differences between the experimental plots are statistically significant ($p \leq 0.05$).

Таблица 3

Митотический индекс и доля нормальных митозов у проростков сосны обыкновенной в исследуемых районах

Table 3

Mitotic index and proportion of normal mitoses in Scots Pine seedlings in the studied plots

Участок / Plot	Просмотрено клеток, шт. / Number of viewed cells, pcs	Просмотрено митозов, шт. / Number of viewed cells, pcs	Средняя частота аномальных митозов на 1 проросток, % / Average frequency of abnormal mitoses per 1 seedling, %	Митотический индекс, % / Mitotic index, %
			$x \pm m, \%$	$x \pm m, \%$
Контрольный участок	7091	1280	$13,46 \pm 2,21$	$181,04 \pm 1,397$
Опытный участок 1	7668	1122	$15,13 \pm 3,00$	$174,75 \pm 1,401^{*^{\wedge}}$
Опытный участок 2	7427	921	$18,22 \pm 2,95$	$124,22 \pm 0,9^{*^{\wedge}}$

* – различия между контрольным и опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$); ^ – различия между опытными участками статистически достоверны ($p \leq 0,05$).

* – the differences between the control and experimental areas are statistically significant ($p \leq 0.05$); ^ – differences between experimental areas are statistically significant ($p \leq 0.05$).

контролем не носили статистически достоверного характера.

Заключение

Негативное влияние выбросов Саяногорского алюминиевого завода на сосну обыкновенную проявилось в уменьшении значений репродуктивных органов (размеров и массы шишек), снижении показателей всхожести и энергии прорастания, достоверном увеличении частоты некрозов хвои на опытных участках в сравнении с контролем.

Цитогенетический анализ выявил достоверное снижение митотической активности клеток апикальной меристемы у сосны обыкновенной на опытных участках в сравнении с контролем. Отмечена тенденция к увеличению частоты аномальных митозов у сосны обыкновенной на участках, близких к заводу. Все это свидетельствует об отрицательном воздействии загрязняющих веществ на активность деления и стабильность хромосомного аппарата клеток.

Список литературы / References

1. Шалак Т. В. *История развития алюминиевой промышленности Восточной Сибири (1950–1980 гг.)*: Автореф. дис. ... канд. истор. наук. Иркутск; 2004. 30 с.
Shalak T.V. *History of the development of the aluminum industry in Eastern Siberia (1950–1980)*. Abstr. ... Diss. Cand. Sci., Irkutsk; 2004. 30 p. (In Russ.)
2. Матевосова К.Л., Грязнова В.А., Чазов Т.К. Экологические проблемы и устойчивое развитие алюминиевой промышленности. *Отходы и ресурсы*. 2019;6(2): 1–17. <https://doi.org/10.15862/11ECOR219>
Matevosova K.L., Gryaznova V.A., Chazov T.K. Environmental problems and sustainable development of aluminum industry. *Russian journal of resources, conservation and recycling*. 2019;6(2):1–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.15862/11ECOR219>
3. Ковылина О.П., Зарубина И.А., Ковылин А.Н. Оценка жизненного состояния сосны обыкновенной в зоне техногенного загрязнения. *Хвойные бореальной зоны*. 2008;25(3–4):284–289.
Kovylyina O.P., Zarubina I.A., Kovylin A.N. Assessment of the vital state of Scots pine in the zone of technogenic pollution. *Conifers of the Boreal area*. 2008;25(3–4): 284–289. (In Russ.)
4. Алексеева А.Н. *Pinus sylvestris* L. как индикатор окружающей природной среды города Красноярска. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2020;19(2):173–176. <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020097>
Alekseeva A.N. *Pinus sylvestris* L. as an indicator of the natural environment of the city of Krasnoyarsk. *Problems of botany of Southern Siberia and Mongolia*. 2020; 19(2):173–176. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020097>
5. Тарчевский В.В. Влияние дымо-газовых выделений промышленных предприятий Урала на растительность. В кн.: *Растения и промышленная среда: сборник научных работ кафедры ботаники*. Свердловск: УрГУ; 1964. С. 5–69.
Tarchevsky V.V. The influence of smoke and gas emissions from industrial enterprises of the Urals on vegetation. In: *Plants and industrial environment: Collection of scientific works of the Department of Botany*. Sverdlovsk: Ural State University. 1964, pp. 5–69. (In Russ.)
6. Каницкая Л.В., Колмогоров А.В. Влияние газовых выбросов при производстве алюминия на состояние окружающей среды. *Успехи современного естествознания*. 2009;(8):17–18. [Прочитано 28.01.2022]. Доступно: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=14050>
Kanitskaya L.V., Kolmogorov A.V. The influence of gas emissions during aluminum production on the state of the environment. *Advances in current natural sciences*. 2009;(8):17–18. [Cited 28.01.2022] Available: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=14050> (In Russ.)
7. Сибгатулин В.Г., Шишацкий Н.Г. Красноярский алюминиевый завод: экологический фактор. *ЭКО*. 2018;(4):48–66. <https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2018-4-48-66>
Sibgatulin V.G., Shishatsky N.G. Krasnoyarsk aluminum smelter: environmental factor. *ECO*. 2018;(4):48–66. (In Russ.)
8. Likus-Cie J., Socha J., Gruba P., Pietrzykowski M. The current state of environmental pollution with sulfur dioxide (SO₂) in Poland based on sulfur concentration in Scots pine needles. *Environmental Pollution*. 2020;258: 113559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113559>
9. Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) намечаемой деятельности АО «РУСАЛ Саяногорск». Книга 1. Предварительный вариант материалов ОВОС. СПб.: РУСАЛ ИТЦ; 2019. 299 с. URL:https://ineca.ru/?dr=about&about=news/2019/8/03/505&docname=1_BOOK_1
Environmental impact assessment (EIA) of the planned activities of JSC RUSAL Sayanogorsk. Book 1. Preliminary version of EIA materials. St. Petersburg: RUSAL ETC; 2019. 299 p. (In Russ.) URL:https://ineca.ru/?dr=about&about=news/2019/8/03/505&docname=1_BOOK_1
10. Найденова Л.С., Епринцев С.А., Попов В.Н. Проведение цитогенетического мониторинга в г. Воронеже, используя древесные породы деревьев, на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth). *Вестник Воронежского университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2008;(1):115–122.
Naydenova L.S., Eprintsev S.A., Popov V.N. Undertaking cytogenesis monitoring in Voronezh using wood sorts trees, on example of the birch (*Betula pendula*). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2008;(1):115–122. (In Russ.)

11. Ашихмина Т.Я. *Экологический мониторинг*. М.: Академический Проект; Альма Матер; 2008. 416 с.
Ashikhmina T.Ya. *Environmental monitoring*. Moscow: Akademicheskii Proekt; Alma Mater; 2008. 416 p. (In Russ.)
12. Березкина М.Г. Мониторинг состояния городской среды при помощи сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) как основного биоиндикатора. В кн.: Черных Н.А. (ред.). *Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов, Вып. 12*. М.: ИПЦ «Луч»; 2010. С. 217–222.
Berezkina M.G. Monitoring of urban environment using a pine ordinary (*Pinus sylvestris* L.) as a basic biological indicator. In: Chernykh N.A. (ed.). *The Urgent Ecological and Nature Management Problems, Issue 12: Coll. Res. Articles*. Moscow: Luch; 2010, pp. 217–222. (In Russ.)
13. Иванова Е.Ю. Оценка состояния атмосферного воздуха города Нововоронежа биологическими методами. *Вестник Воронежского университета. Серия. География. Геоэкология*. 2013;(1):157–162.
Ivanova E.Yu. Assessment of the state of atmospheric air in the city of Novovoronezh using biological methods. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2013;(1):157–162. (In Russ.)
14. Рунова Е.М., Данишеск М.В., Чжан С.А., Пузанова О.А. Некоторые особенности всхожести семян сосны обыкновенной с плюсовых насаждений Иркутской области. *Системы. Методы. Технологии*. 2014; 22(2):183–186.
Runova E.M., Danishek M.V., Zhang S.A., Puzanova O.A. Some features of germinating power of Scots pine seeds from plus stands of Irkutsk region. *Systems. Methods. Technologies*. 2014;2(22):183–186. (In Russ.)
15. ГОСТ 13056-97 *Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести*. Дата введения 01.07.1998. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: ИПК: Издательство стандартов; 1998. 27 с.
GOST 13056-97 *Seeds of trees and shrubs. Method for determining germination*. Date of introduction: 07/01/1998. Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. Minsk: IPK; 1998. 27 p. (In Russ.)
16. Паушева З.П. *Практикум по цитологии растений*. М.: Агропромиздат; 1988. 271 с.
Pausheva Z.P. *Workshop on plant cytology*. Moscow: Agropromizdat; 1998. 271 p. (In Russ.)
17. Дончева Л.В., Казакова Л.К. *Ландшафтная индикация загрязнений природной среды*. М.: Экология; 1992. 256 с.
Doncheva L.V., Kazakova L.K. *Landscape indication of environmental pollution*. Moscow: Ekologiya; 1992. 256 p. (In Russ.)

Об авторах

ПАК Ирина Владимировна, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и генетики, <https://orcid.org/0000-0001-7038-2583>, ResearcherID: N-2972-2016, Scopus Author ID: 9266991500, SPIN: 1724-3783 e-mail: i.v.pak@utmn.ru

СЕМЕНОВА Марина Викторовна, кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры, <https://orcid.org/0009-0009-3738-1920>, ResearcherID: KFB-1384-2024, SPIN: 1357-3940, e-mail: m.s.semenova@utmn.ru

РЯБИКОВА Валентина Львовна, старший преподаватель кафедры ботаники, биотехнологии и ландшафтной архитектуры, <https://orcid.org/0009-0004-7382-282X>; ResearcherID: KFA-9404-2024, SPIN: 1246-0623, e-mail: v.l.ryabikova@utmn.ru

САГАЛАКОВА Виктория Викторовна, студент, e-mail: stu0000215666@utmn.ru

About the authors

PAK, Irina Vladimirovna, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of the Department of Ecology and Genetics, <https://orcid.org/0000-0001-7038-2583>, ResearcherID: N-2972-2016, Scopus Author ID: 9266991500, SPIN: 1724-3783, e-mail: i.v.pak@utmn.ru

SEMEANOVA, Marina Viktorovna, Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor of the Department of Botany, Biotechnology and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0009-0009-3738-1920>, ResearcherID: KFB-1384-2024, SPIN: 1357-3940, e-mail: m.v.semenova@utmn.ru

RYABIKOVA, Valentina Lvovna, Senior Lecturer of the Department of Botany, Biotechnology and Landscape Architecture, <https://orcid.org/0009-0004-7382-282X>; ResearcherID: KFA-9404-2024, SPIN: 1246-0623 e-mail: v.l.ryabikova@utmn.ru

SAGALAKOVA, Victoria Victorovna, Student, e-mail: stud0000215666@study.utmn.ru

Поступила в редакцию / Submitted 30.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 27.09.2023

Принята к публикации / Accepted 03.03.2024

Биологические ресурсы

УДК 599.735.3:591.9:575.174:574.3(571.56-18)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-129-142>

Оригинальная статья

Современное состояние лено-оленинской популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla)

Е. В. Кириллин, Н. В. Мамаев, В. В. Степанова✉

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉valstep@yandex.ru

Аннотация

В организации и ведении промысла дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758) важнейшей проблемой является создание системы рациональной эксплуатации запасов диких оленей, основанной на достоверных данных по численности, распространению, половозрастной структуре и стадности популяции. Цель работы – охарактеризовать современное состояние численности, структуры и ареала лено-оленинской популяции тундрового дикого северного оленя (ЛОП ДСО). Численность ЛОП ДСО основана на анализе авиаучета, проведенного с 10 июля по 12 июля 2018 г. В работе также были использованы данные координат от спутниковых трекер-ошейников GLONASS/Argos и фондовые материалы авиаучетных работ в тундровой части Якутии. В результате изучения полученных данных определено поголовье ЛОП ДСО в 83 260 голов. Анализ показал, что олени размещались тремя обособленными группировками: маточные стада, смешанные и самцовые. Основное поголовье ЛОП составляли самки (44,2 %), телата текущего года рождения (22,4) и молодняк 1–2 года (17,5 %). За 32 года отмечено уменьшение доли взрослых самцов на 62,2 %, увеличение доли сеголетков и молодняка. Динамика численности ЛОП с середины прошлого столетия показывает постепенный рост численности популяции с 21 тыс. до 95 тыс. особей в 2009 г. и в последнее десятилетие некоторое снижение до 83,2 тыс. особей в связи с исключением таймырских мигрантов. Результаты работы будут применены для рационального использования ресурсов диких северных оленей и выделения квот для их добычи. Дальнейшее проведение учетных работ даст возможность наблюдать за состоянием популяции в динамике.

Ключевые слова: дикий северный олень, лено-оленинская популяция, половозрастная структура, авиаучет, спутниковые трекер-ошейники

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Популяции и сообщества животных водных и наземных экосистем криолитозоны восточного сектора российской Арктики и Субарктики: разнообразие, структура и устойчивость в условиях естественных и антропогенных воздействий» (тема № 0297-2021-0044, ЕГИСУ НИОКТР № 121020500194-9).

Для цитирования: Кириллин Е.В., Мамаев Н.В., Степанова В.В. Современное состояние лено-оленинской популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):129–142. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-129-142>

Original article

The current status of the Lena-Olenek population of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla)

Egor V. Kirillin, Nicolay V. Mamaev, Valentina V. Stepanova✉

Institute for Biological Problems of Cryolithozone,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉valstep@yandex.ru

Abstract

The rational use of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758) based on reliable data on the number, distribution, age-sex composition, and herd size of the population is a challenging problem for hunting management. The purpose of this study was to characterize the current state of the Lena-Olenek tundra wild reindeer (LOWR) population. The

counting of LOWR was based on the aerial census conducted from July 10 to 12, 2018; coordinate data from the GLONASS/Argos satellite tracker collars; stock materials from previous aerial surveys in the tundra of Yakutia. From the data obtained, the livestock of the LOWR was estimated to be 83,260. We specified that deer are housed in three distinct groups: broodstock, mixed, and male. The main livestock in the LOWR were females (44.2 %), calves (22.4 %), and juvenile animals 1–2 years old (17.5 %). Over 32 years, there was a decrease in 62.2% in the number of adult males and an increase in the number of fingerlings and juvenile animals. Since the middle of the last century, there has been a gradual increase in the number of LOWR from 21,000 to 95,000 deer in 2009 and a slight decrease to 83,200 deer in the last decade due to the exclusion of Taimyr reindeer migrants. The results of this study can be used to rationalize the use of wild reindeer resources and the allocation of quotas for production. Further census work will make it possible to monitor the state of the population over time.

Keywords: reindeer, Lena-Olenok population, reindeer sex and age structure, aerial census, satellite tracker collars
Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation under the project “Populations and communities of animals of aquatic and terrestrial ecosystems of the cryolithozone of the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic: diversity, structure and sustainability under natural and anthropogenic influences” (theme No. 0297-2021-0044, registration No. 121020500194-9).

For citation: Kirillin E.V., Mamaev N.V., Stepanova V.V. The current status of the Lena-Olenok population of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L., 1758, Cervidae, Artiodactyla). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):129–142. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-129-142>

Введение

В настоящее время после резкого сокращения поголовья некогда многочисленной яно-индигирской популяции тундрового дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L., 1758) в начале 2000-х годов самой крупной популяцией диких северных оленей (далее – ДСО) на территории Республики Саха (Якутия) является лено-оленинская популяция (далее – ЛОП).

Промысловое освоение ЛОП с каждым годом увеличивается. Промысел ДСО – практически единственная традиционная хозяйственная деятельность представителей коренных малочисленных народов Севера Якутии. В связи с кризисом домашнего оленеводства заготовки оленьего мяса почти полностью осуществляются за счет промысла диких оленей. От его эффективности в значительной степени зависят объемы производства товарной оленины, продовольственное обеспечение населения Севера.

Однако в организации и ведении промысла ДСО имеется ряд нерешенных проблем, важнейшая из которых – создание системы рациональной эксплуатации запасов диких оленей, основанной на достоверных данных по численности, распространению, половозрастной структуре и стадности популяции. Для определения ежегодных квот добычи оленей необходимо выяснить наиболее приближенную к реальности численность диких оленей. Зимние маршрутные учеты в данном вопросе не дают точной информации. Авиачет северного оленя дает наиболее достоверные результаты на обширных территориях [20].

Показатели численности охотничьих животных, получаемые авиаучетом, в целом оценивались научным сообществом как наиболее точные и достоверные по сравнению с наземными методами учета, на которые в большей степени могла оказывать влияние субъективная составляющая, к которой в первую очередь относятся приписки и преднамеренное искажение учетчиками учетных данных [21]. Авиачеты – наиболее эффективный метод оценки численности диких северных оленей, поскольку он позволяет обследовать обширные пространства их мест обитания за относительно короткий промежуток времени.

В Якутии первые плановые результативные авиаучетные работы по определению численности тундровых ДСО были проведены в 1963 г. [1]. С тех пор авиаучет оленей проводился каждое десятилетие по 2–3 раза по настоящее время [2–12]. Ввиду отсутствия финансирования в последний раз авиаучет ЛОП ДСО был проведен в июле 2018 г.

Цель работы – охарактеризовать современное состояние численности, структуры и ареала лено-оленинской популяции тундрового дикого северного оленя по результатам авиаучетов.

Материал и методы исследования

Авиачет численности ЛОП ДСО был проведен с 10 по 12 июля 2018 г. Полеты выполнялись на вертолете Ми-8-МТВ из пос. Саскылах Анабарского района. За этот период было совершено три полета общей продолжительностью 19 часов 53 минуты. Общая протяженность авиамаршрутов составила 2502,3 км.

Учет проводился по унифицированной методике авиавизуального определения численности тундровых популяций ДСО с применением фотосъемки, основанной на ежегодной концентрации диких оленей в северной полосе тундры во время массового вылета кровососущих насекомых в конце июня и июле [13]. Данная методика применяется при учетах данной ЛОП ДСО с 1988 по 2009 г. [8].

На основе научных публикаций и данных предыдущих учетов 1964–2009 гг. [4–12] были проложены учетные маршруты по территориям наибольшей концентрации пасущихся оленей. При этом также ориентировались на опросные сведения охотников о местах летовок диких северных оленей.

Погода в период проведения работ стояла ясная, солнечная, температура воздуха доходила до +20 °С. Ширина учетной полосы составила 6 км, высота полета – 200 м, скорость полета – 150–170 км/ч. Для определения численности и половозрастного состава крупных стад оленей производилась их фотосъемка. Съемка проводилась с помощью фотокамер Sony SLT-A77V и Canon EOS60D с высоты около 50 м.

В участках разреженного выпаса оленей применялся экстраполяционный метод учета. Площадь выделов для экстраполяции показателей плотности оленей вычислялась с использованием компьютерной ГИС-программы. Название рек и пунктов местности даны по топокартам масштаба 1 : 500 000.

Нами было обработано 466 фотоснимков, выполненных в процессе авиаучета диких северных оленей. Всего на этих снимках зафиксировано 68815 особей ДСО, что составляет 82,7 % от общей численности популяции.

Для определения половозрастного состава использовались цифровые и зеркальные фотоаппараты, с объективами до 400 мм, которые дают качественные детальные снимки. Обработка снимков проводилась по каждой группе оленей отдельно и заняла 2 месяца.

Группировками считаются стада (наибольшее до 1930 особей), которые то собираются, то разединяются, локализующиеся на одной местности, находящиеся на расстоянии примерно до 2 км друг от друга.

Для экстраполяции и пересчета недоучтенной численности нами был выбран наименьший показатель плотности ДСО в данной местности – 24,3 ос./10 км².

Также в работе были использованы данные координат, поступающих от спутниковых трекер-ошейников фирмы GLONASS/Argos. На момент проведения авиаучетных работ функционировали ошейники, установленные в 2016 г. на пяти самках и в 2017 г. на четырех самцах.

Кроме этого, в статье использованы фондовые материалы авиаучетных работ в тундровой части Якутии [9, 11]. Для создания полной картины пространственной структуры лено-оленьской популяции дикого северного оленя использованы учетные работы, проведенные в 2013 г. на зимних местообитаниях и 2018 г. на летних пастбищах, а также наблюдения за миграцией оленей в осенний период посредством радиомаяков.

Результаты и обсуждение

Распространение. Зимнее местообитание. Основной район зимнего обитания ЛОП ДСО – бассейны рек Силигир (правый приток р. Оленек, 67–68° с.ш., 113–114° в.д.), Муна и Моторчуна (левые притоки р. Лена, 66–68° с.ш., 113–123° в.д.) (рис. 1).

В 2013 г. в ходе авиаобследования миграционных путей ЛОП ДСО учетчиками были выявлены четыре относительно компактные крупные территориальные группировки ЛОП ДСО.

Первое крупное мигрирующее стадо оленей было отмечено в среднем течении р. Моркока-Мархарата, на междуречье Моркока (правый приток р. Марха) – Моркока-Мархарата, в окрестностях оз. Бюгюе (62°58' с.ш., 129°14' в.д.) (табл. 1). Общую численность этого мигрирующего потока ДСО можно оценить в 25–26 тыс. особей.

Второе относительно небольшое, но компактное скопление мигрирующих оленей было встречено в приустьевой части р. Делинде (левый приток р. Марха). Численность этой группы ДСО оценено в 5–6 тыс. особей.

Третья крупная миграционная ветка ДСО концентрировалась в период авиаобследования в районе оз. Сюгджер (64°20' с.ш., 114°51' в.д.). Общее количество оленей в ней оценивается в 15–16 тыс. особей.

Четвертая группировка мигрирующих стад оленей отмечена в междуречье Ханья (приток р. Марха, 66° с.ш., 116° в.д.) – Тюкян (левый приток р. Вилюй, 65° с.ш., 118° в.д. Приблизительная численность ее оценивается в 10–11 тыс. особей.

Относительно небольшая миграционная группа ДСО была отмечена в бассейне р. Малый Салакут (приток р. Салакут, 65° с.ш., 119° в.д.). По направлению движения группы оленей можно

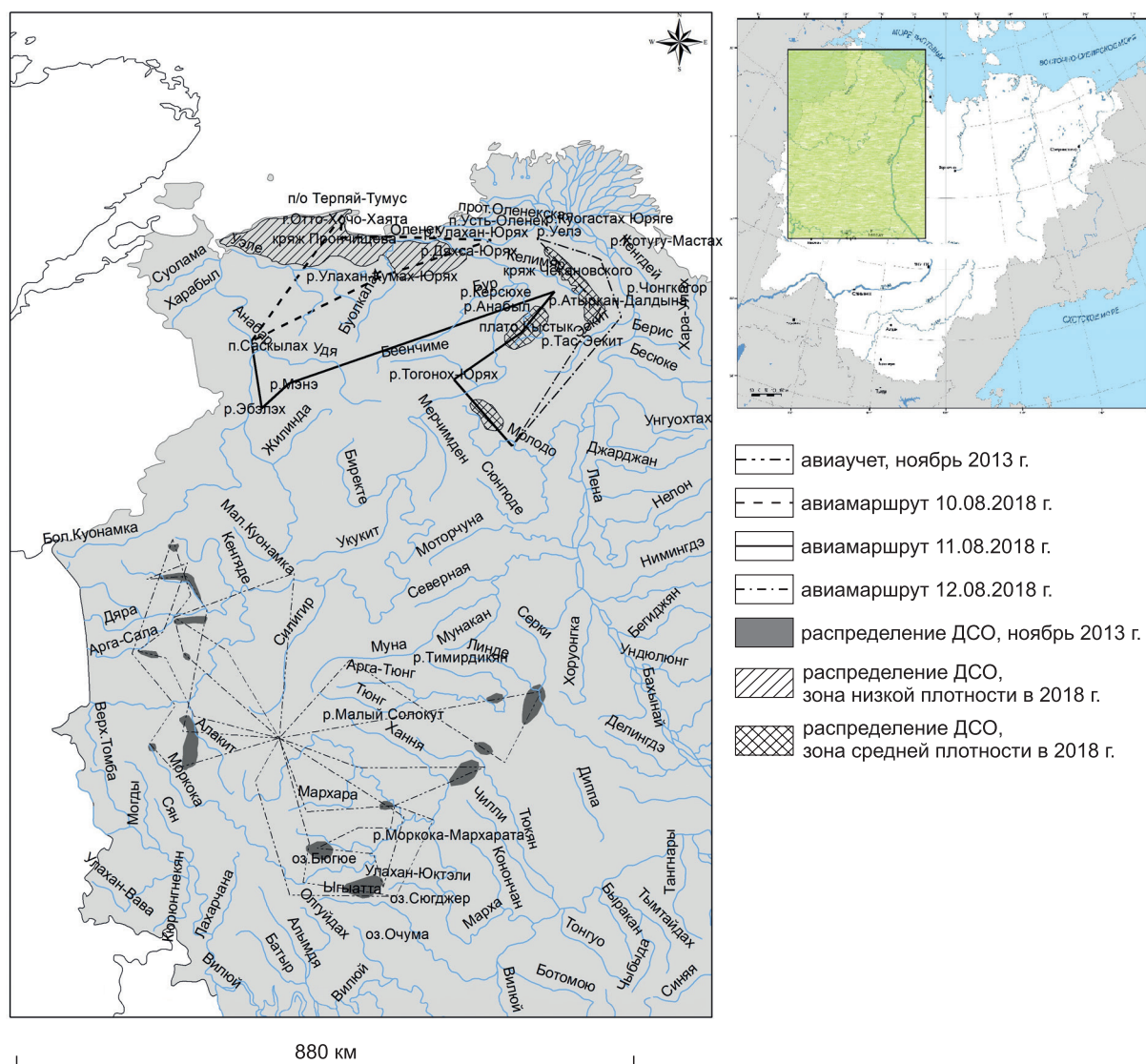


Рис. 1. Места локализации территориальных группировок ЛОП ДСО в местах зимовок и летовок по результатам авиачетов 2013 и 2018 гг.

Fig. 1. Locations of the LOP territorial groups in wintering and summering sites (based on the results of aerial surveys in 2013 and 2018)

предположить, что она немного отстала от четвертой группировки оленей и двигалась вслед за ней. Общая численность стад оценивается в 2 тысячи особей. Также отдельные мелкие стада мигрирующих оленей были встречены в междуречье Тюнг (левый приток р. Виллой, 63–66° с.ш., 114–121° в.д.) – Тимирдилян, здесь, по оценкам экспертов, на момент авиаобследования двигалось около 500 оленей.

На довольно обширной территории, расположенной между реками Ханья и Марха, оз. Сюгджер и устьем р. Ханья (64–66° с.ш., 114–118° в.д.), практически повсеместно встречались небольшие

группы оленей от 2 до 15 особей. По примерной оценке вне основных миграционных путей двигалось около 1,5–2 тыс. оленей лено-оленекской популяции.

Основными путями миграции были западный и восточный.

Западный поток шел от кряжа Чекановского (72°22' с.ш., 123°46' в.д.) по верховьям рек Муна, Тюнг с выходом на р. Марха в районе устья р. Делинде и далее по бассейну р. Моркока-Мархарата в сторону оз. Сюгджер. Позднее основная часть мигрирующих стад направилась еще южнее вдоль р. Ыгыатта (левый приток р. Виллой,

Таблица 1

Численность мигрирующих стад диких северных оленей лено-оленинской популяции [9]

Table 1

Number of migrating herds of the Lena-Olenek wild reindeer population [9]

Местоположение / Location	Площадь размещения стад, км ² / Accommodation area of herds, km ²	Количество зарегистрированных олений / Number of registered deer	Плотность, особей/10 км ² / Density, reindeer/10 km ²	Численность, тыс. особей / Number, thousand reindeer
Низовье р. Делинде (лев. приток р. Марха) The lower reaches of the Delinde River (left tributary of the r. Markha)	300	571	154.3	4–5
Бассейн р. Моркока-Мархарата The basin of the Morkoka- Marharata River	2100	1172	123.3	25–26
оз. Сюгджер Lake Sugjer	2000	619	74.5	15–16
Междуречье Ханья – Тюкян Interfluvium of the Hannya – Tyukyan Rivers	1300	530	74.6	10–11
Междуречье Линде – Тюнг Interfluvium of the Linde – Tung Rivers	1300	181	41.6	5–6
Междуречье Тюнг – Чимидикян Interfluvium of the Tung – Chimidikyan	1000	26	5.0	0.5
Бассейн р. Малый Салакут The basin of the Maly Salakut river	600	126	34.0	2
Количество оленей вне групп Number of deer outside groups	–	205	–	1.5–2
Всего / Total	8600	3430	72,5	65–68

62–64° с.ш., 112–117° в.д.) в сторону оз. Очума (63°44' с.ш., 114°44' в.д.).

Восточный путь миграции проходил по среднему течению р. Муна, далее по междуречью Линде (левый приток р. Лена, 64–66° с.ш., 118–124° в.д.)–Тюнг через междуречье Ханья и Тюкян по направлению к устью р. Делинде.

Летние местообитания. В летний период лено-оленинская популяция размещается в тундрах между реками Анабар и Лена, на краях Прончищева (73° с.ш., 117° в.д.) и Чекановского (72° с.ш., 123° в.д.). Ориентируясь на результаты прошлых

авиаучетных работ по определению численности ЛОП ДСО, в июле 2018 г. был проведен учетный полет для уточнения старых и выявления новых возможных мест выпаса ДСО.

На полуострове Терпей-Тумус (73°30' с.ш., 118°48' в.д.) и на р. Улахан-Кумах-Юрх (72° с.ш., 119° в.д.) было зарегистрировано незначительное количество ДСО (12 особей).

Первые крупные группировки оленей зарегистрированы по маршруту р. Мэнэ – междуречье Керсюхе–Анабыл (левый приток р. Хорбусуонка, 62° с.ш., 120° в.д.), где было встрече-

Таблица 2

Плотность мигрирующих стад диких северных оленей лено-оленинской популяции [12]

Table 2

Density of migrating herds of the Lena-Olenok wild reindeer population [12]

Маршрут / Route	Площадь учета, км ² / Accounting area, km ²	Количество зарегистрированных оленей / Number of registered deer	Плотность, особей/10 км ² / Density, reindeer/10 km ²
пос. Саскылах – р. Эбелях / Saskylakh village – River Ebelyakh	579	–	–
р. Эбелях – р. Мэнэ / River Ebelyakh – River Mene	2718	–	–
р. Мэнэ – междуречье Керсьюхе–Анабыл / River Mene –Rivers Kersyukhe and Anabyl interfluve	456,6	1112	24,3
Междуречье Керсьюхе и Анабыл – Тогонох-Юрях / Rivers Kersyukhe and Anabyl interfluve – River Togonoh-Yuryakh	697,8	8680	124,3
р. Тогонох-Юрях – р. Молодо / River Togonoh-Yuryakh – River Molodo	757,8	4861	64,1
р. Молодо – р. Атыркан-Далдына / River Molodo – River Atyrkan-Daldyna	930,4	12707	136,5
р. Атыркан-Далдына – междуречье Куогастах-Юряге–Уеле / River Atyrkan-Daldyna – Rivers Kuogastah-Yuryage and Uele interfluve	544	41441	761,7
междуречье Куогастах-Юряге и Уеле – Хотугу-Мастах / River Kuogastah-Yuryage and Uele interfluve – River Hotugu-Mastakh	384,8	1	0,02
р. Хотугу-Мастах – р. Чонгкогор / River Hotugu-Mastakh – River Chongkogor	348	1	0,02
р. Чонгкогор – р. Молодо / River Chongkogor – River Molodo	963,6	–	–
Всего / Total	8380	68803	111,1

но 1112 голов на западной части плато Кыстык (72°16' с.ш., 120°54' в.д.) (табл. 2). В основном повстречавшиеся группировки оленей представляли смешанные стада.

В юго-западном направлении по р. Тогонох-Юрях (70°77' с.ш., 120°59' в.д.) нами было встречено 8680 оленей, недалеко от мест регистрации оленей при предыдущих авиаучетных работах. Все встречи оленей фиксировались на правом берегу р. Оленок на западной части плато Кыстык. На левобережье р. Оленок олени отсутствовали.

В юго-восточном направлении по р. Тогонох-Юрях до р. Молодо (левый приток р. Лена, 69–70° с.ш., 121–124° в.д.) олени были встречены также на правом берегу р. Оленок. Следует отметить, что олени этой группы были ранее помечены нами спутниковыми ошейниками. Все повстречавшиеся группировки состояли из самцов общей численностью 4861 голов.

На р. Молодо до р. Тас-Экит (левый приток р. Лена, 70° с.ш., 123–127° в.д.) олени не были зафиксированы. На кряже Чекановского, начиная с р. Тас-Экит до междуречья Куогастах-

Юряге (72° с.ш., 123–125° в.д.)–Уелэ (правый берег р. Анабар), олени встречались примерно по 100, 1000 и более голов. Самая большая мигрирующая ветка состояла приблизительно из 1930 голов. Все встретившиеся стада оленей состояли из маточных групп и держались южного склона кряжа.

В общей сложности на промежутке от р. Молодо до р. Атыркан-Далдына встречено 12707 особей, от р. Атыркан-Далдына до междуречья Куогастах-Юряге–Уелэ – 41441 особей.

От междуречья Куогастах-Юряге–Уеле до р. Чонгкогор встречено всего два оленя. На северном склоне (от р. Чонгкогор до р. Молодо) олени нами не были зарегистрированы.

Наши исследования с 2010 по 2016 г. с использованием спутниковых радиомаяков GLONASS/Argos, прикрепленных к оленям, позволили выявить современную область распространения мигрирующей части популяции численностью примерно в 90 тыс. голов, которая составила примерно 325 тыс. км² (рис. 2).



Рис. 2. Современная область миграционных путей дикого северного оленя лено-оленокской тундровой популяции на северо-западе Якутии (по данным спутниковых радиомаяков Argos/GLONASS)

Fig. 2. Modern migration routes of the Lena-Olenek wild reindeer tundra population in the northwest of Yakutia (according to Argos/GLONASS radio beacons)

По результатам авиаучетных работ, концентрация оленей наблюдалась на участках, где также находились олени с трекер-ошейниками. В будущем использование спутниковых трекер-ошейников позволило бы значительно сократить время полетов для поиска мест скопления диких оленей.

Половозрастная структура. По данным авиаучета в июле 2018 г., олени размещались тремя обособленными группами: маточные стада, смешанные и самцовые. С помощью геоинформационных технологий удалось определить пространственное размещение различных половозрастных групп ЛОП ДСО.

Маточные группы оленей размещались в южных отрогах кряжа Чекановского, и площадь их обитания составила 2573,6 км². Основные маточные группы паслись узкой полосой на южном склоне кряжа Чекановского на территории шириной около 100 км. Плотность оленей здесь составила 136,5 и 761,7 ос./10 км². Численность данной группировки – 60,4 тысяч голов.

На западной части плато Кыстык наблюдались смешанные стада самцов и самок. Площадь мест их летнего пребывания составила 2163,5 км². В северной части плато плотность оленей составляла 24,3 ос./10 км². Наибольшая плотность оленей на плато Кыстык составила 124,3 ос./10 км². Численность данной группы по нашим расчетам составила 15,5 тысяч голов.

Самцовые стада оленей концентрировались на возвышенности Бырая-Тас и занимали уча-

сток площадью 1207,5 км². Плотность населения данной группы составляла 64,1 ос./10 км². Численность оленей на данной территории – 7,8 тысяч голов. Однако, принимая во внимание, что эта территория учета находится уже в лесной зоне, возможно, часть оленей вполне могли отойти еще южнее и не попасть в учет.

Зона низкой плотности населения ДСО – от 0,007 до 0,1 ос./10 км², заняла территорию с запада на восток от устья р. Анабар до устья р. Оленек. С севера ее граница проходит по береговой линии моря Лаптевых, с юга – по р. Уеле. Численность вида на данной территории низкая и, по всей видимости, олени здесь остаются на зимовку.

Анализ фотоматериалов авиаобследования 2018 г. показал, что в лено-оленинской популяции доля телят текущего года рождения составила 22,4 %, взрослых самцов – 15,9, взрослых самок – 44,2, молодняка 1–2 лет – 17,5 %. Половое соотношение популяции – 1 : 2,8. Следует отметить, что в целом структура популяции отличается сравнительно хорошими показателями подрастающего поколения.

Из табл. 3 видно, что в настоящее время половозрастной состав становится схожим с показателями 1970-х годов, когда количество самцов было значительно ниже количества самок и численность телят была относительно высокой. За 32 года с 1986 по 2018 г. отмечено уменьшение доли взрослых самцов на 62,2 % (15,9 % против 42 %) и увеличение сеголетков на 52,7 и молод-

Таблица 3

Динамика процентного соотношения половозрастного состава диких северных оленей лено-оленинской популяции (по 8-15])

Table 3

Dynamics of the percentage ratio of sex and age in the Lena-Olenek wild reindeer population (according to [8-15])

Половозрастной состав / Gender and age	1975	1978	1981	1986	1988	1990	1994	2001	2008	2013	2018
Самцы / Males	11,5	13,7	24,6	42	34	26,6	24,8	27,1	25,7	23,5	15,9
Самки / Females	43	43,5	36,7	39,4	28,2	33,3	33,3	34	37,3	41,4	44,2
Молодняк (1–2 года) / Juvenile animals (1–2 years old)	17,1	18,4	9,6	8	21	17,1	22	17,8	14,6	13,3	17,5
Сеголетки / Fingerlings	28,4	24,4	29,1	10,6	16,8	23	19,9	21,1	22,4	21,8	22,4

няка на 54,3 %. Особенно это заметно в последнее десятилетие.

Обсуждение

По литературным данным, ареал обитания лено-оленокской популяции тундрового северного оленя примерно составляет 350 тыс. км² [4–8].

По данным В.М. Сафронова [6], в начале миграции в конце августа 2001 г. 40 тыс. оленей находились еще в тундровой зоне, в основном самки с телятами (63 %). Примерно столько же оленей было отмечено в южном районе ареала в местах зимовок – в бассейнах рек Силигир, Муна, Моторчуна и в верхнем течении р. Тюнг. Тогда основную часть здесь составляли самцы (80 %). Второй миграционный поток появился здесь в конце сентября. Третья волна миграции, значительно менее интенсивная, чем предыдущие, наблюдалась 20–30 ноября [6]. По данным В.М. Сафронова [6], большинство самок телится на плато Кыстык и кряже Чекановского.

В настоящее время количество самцов ЛОП ДСО значительно ниже количества самок. Возможно, снижение численности взрослых самцов может быть вызвано избирательной добычей самцов из-за большего веса мясной продукции в коммерческих целях в августе и в ноябре, так как основная масса добытой оленины поставляется на продажу. Косвенным подтверждением снижения численности самцов в популяции может стать тот факт, что с 2011 г. самцовая группа (ее еще называют «анабарская») перестала выходить на летовку на кряж Прончищева, где в период учета во второй декаде 2009 г. они находились. Доля взрослых самцов в ней раньше занимала 77 % [8]. Но этот факт также может быть связан с перемещением миграций оленей в восточную часть ареала, о чем свидетельствует, в частности, спутниковая телеметрия. Так что, констатировать большое снижение содержания самцов в популяции пока безосновательно, и эту ситуацию пока можно только предполагать. И данная гипотеза требует дополнительных учетных работ.

Стабильное экологическое состояние лено-оленокской популяции ДСО в последние годы подтверждается материалами по воспроизводству диких оленей. Из 19 взрослых самок, обследованных в апреле 2008 г. в Оленекском улусе, число беременных составляло 90 %, что является очень высоким показателем размножения у диких северных оленей [11].

В целом, данные по половозрастному составу мигрирующей части лено-оленокской популяции свидетельствуют о достаточно сбалансированной структуре популяции с высоким уровнем рождаемости и выживаемости молодняка.

По ранее проведенным авиаучетным работам (1987–2001 гг.), ЛОП ДСО в летний период разделялась на две относительно обособленные группировки, различающиеся по половозрастному составу. Западная (анабарская) группировка выпасается на кряже Прончищева, полуострове Терпий-Тумус и в окружающих тундрах от побережья моря Лаптевых до лесотундры. Основное поголовье этой группировки в то время составляли взрослые самцы (62–71 %), доля важенков (3,5–5 %) и телят текущего года рождения (0,8–2,1 %) в ней невелика. По данным Сафронова В.М. [7], восточная (булунская) группировка размещалась на кряже Чекановского и на всем пространстве тундры между реками Буолкалах (левый приток р. Оленек, 71–72° с.ш., 117–119° в.д.), Оленек и Лена. Эту группу ДСО образовывали маточные стада. Количество взрослых самок в разные годы составляло в ней 40–50 %, взрослых самцов – 0,3–5,3 %, телят текущего года рождения – 30–37 % [11].

При проведении первых авиаучетных работ по учету ЛОП ДСО В.П. Макридиным [1] в 1962 г. численность оценивалась в 21 тыс. голов. По результатам авиаучета, проведенного летом 1975 г. И.И. Мордосовым и В.Г. Сантаевым [3], общая численность ЛОП ДСО была определена в 49,5 тыс. голов. С последующими учетными работами численность популяции постепенно увеличивалась. В марте 1983 г. поголовье оленей лено-оленокской популяции насчитывало 60–65 тыс. голов [16], в июле 1987 и 1989 гг. – в пределах 73 тыс. шт. [4]. В 1990-х гг. численность этой популяции по авиаучетным данным составляла: в 1990 г. – 80,9 тыс. оленей, в 1994 г. – 77,9 тыс. В 2000-х гг. наблюдается тенденция к дальнейшему увеличению численности: в 2001 г. – 90 тыс. особей, в 2009 г. – 95,4 тыс. особей [7, 17]. Подъем численности в течение 40 лет может объясняться возможным естественным приростом. Но следует принять во внимание, что с каждым последующим учетом объем авиаучетных работ увеличивался и, как следствие, увеличивалась достоверность определения реальной численности оленей. Также увеличению численности ЛОП ДСО мог способствовать тот факт, что в

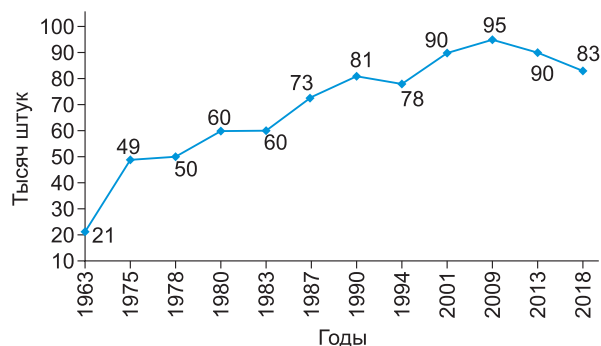


Рис. 3. Динамика численности лено-оленинской популяции дикого северного оленя (по [1–4, 6, 8, 9, 11, 12, 16, 17])

Fig. 3. Dynamics of the number of the Lena-Olenek wild reindeer population (according to [1–4, 6, 8, 9, 11, 12, 16, 17])

семидесятых годах прошлого столетия было выявлено пополнение лено-оленинской популяции мигрантами из таймырской популяции [3].

В начале 2000-х годов В.М. Сафронов [6] считал, что ЛОП ДСО существует в так называемом обеспеченном режиме – рост численности определяется не собственным воспроизводством, а регулярным притоком мигрантов из таймырской популяции. В то время ежегодно в ареале лено-оленинской популяции оставались 7–8 тыс. оленей из соседней попилайской группировки таймырской популяции [6]. Широкое внеареальное расселение таймырских оленей в эти годы объяснялось чрезмерным ростом популяции, достигшей более 1 млн особей [18]. Авиачетные работы, проведенные в 2014 г., показали сокращение численности таймырской популяции оленей до 417 тысяч особей [19, 22]. Последний авиаучет, проведенный в 2021 г., показал дальнейшее сокращение численности дикого северного оленя на Таймыре до 242 тысяч особей [23, 24]. Наблюдения за перемещением оленей посредством радиомаяков показали, что некоторая часть таймырской популяции заходит в пределы Якутии в Мирнинский район по верховьям рек Большая Куонамка, Дяра, Арга-Сала, Верхняя Томба, Маркока и Могды [25].

По данным авиаобследования миграционных путей ЛОП ДСО в октябре 2013 г. было установлено, что на территорию Якутии с Таймыра зашло около 23–25 тыс. таймырских оленей. Значительная их часть осела на довольно продолжительное время в бассейне левых притоков р. Алаakit (правый приток р. Оленек, 65–67° с.ш., 109–110° в.д.) и в верховьях р. Моркока, другая часть продолжила перемещение по территории

северо-западной Якутии. При этом в бассейне р. Большая Куонамка (левый приток р. Анабар, 69–70° с.ш., 106–113° в.д.) мигрирующие дикие олени вошли в соприкосновение со стадами домашних и увели, по сведениям оленеводов, часть домашних [9].

И в настоящее время в Красноярском крае фиксируют посредством спутникового слежения многочисленные переходы оленей с Таймыра в Якутию [26]. Благодаря спутниковому мониторингу становится очевидным переход оленей на зимовку в Якутию.

Оценка численности самой таймырской популяции была подвергнута ревизии и снижена до 354–430 тыс. особей [27]. По опросным сведениям, в течение трех последних лет таймырские олени заходили в южную половину Оленекского улуса – в верховья рек Бол. Куонамка и Арга-Сала (левый приток р. Оленек, 67–68° с.ш., 105–112° в.д.). Однако, факты их оседания здесь отсутствуют. Поэтому при определении лимитов промысла диких оленей следует учитывать, что прекращение пополнения со стороны таймырской популяции может дестабилизировать состояние ЛОП ДСО при чрезмерном прессе промысла.

По данным авиаобследования миграционных путей лено-оленинской популяции общую численность мигрирующих стад ДСО в 2013 г. оценили в 65–68 тыс. особей [9]. Учитывая, что часть популяции, по опросным сведениям, осталась в районе кряжа Чекановского, а другая часть уже вышла из района охвата авиаобследованием, можно предположить, что общая численность лено-оленинской популяции осталась тогда на уровне 2009 г., когда был проведен авиаучет ее численности, т. е. 90–95 тыс. особей.

Итак, динамика численности ЛОП ДСО с середины прошлого столетия до 2009 г. показывает постепенный рост численности популяции с 21 тыс. до 95 тыс. особей (рис. 3).

По последним данным авиаучета 2018 г. с учетом экстраполяции, общая численность лено-оленинской популяции составляет 83 тыс. голов. По сравнению с 2009 г. некоторое снижение численности ЛОП ДСО в 2018 г. может быть связано с тем, что ранее считалось, что лено-оленинская популяция ежегодно пополнялась за счет таймырских оленей в среднем на 7–8 тыс. особей [8] и они постоянно эмпирически добавлялись. С 2013 г. путем оснащения нами диких се-

верных оленей таймырской популяции спутниковыми трекер-ошейниками было установлено, что олени данной популяции заходят только на зимовку в верховья рек Арга-Сала и Оленек и в последующем возвращаются к местам своей летовки в пределах Красноярского края. Тем не менее, не надо исключать, что снижение численности может быть связано и с интенсивным промыслом ЛОП ДСО за последние 10 лет.

На текущий момент стабильное экологическое состояние ЛОП ДСО в последние годы обеспечивается собственным воспроизводством, а не существует, как ранее указывалось, в так называемом обеспеченном режиме.

Заключение

1. Выявлены четыре локальных мигрирующих потока (группировок) диких северных оленей лено-оленьской популяции: одна занимает бассейн крупного левого притока р. Марха – р. Моркока-Мархарата; вторая концентрируется в районе нижнего течения р. Делинде, левого притока р. Марха; третья располагается в районе оз. Сюгджер; четвертая – в междуречье Ханья–Тюкян. Относительно крупная группировка оленей отклонилась от основного миграционного пути и двигалась в междуречье Тюнг–Линде. Относительно небольшие, рассеянные группировки оленей отмечены в бассейне р. Малый Салакут и в междуречье Тюнг–Тимидикян.

2. Определены основные пути миграции ЛОП ДСО: западный – по верховьям рек Муна, Тюнг с выходом на р. Марха в районе устья р. Делинде и далее по бассейну р. Моркока-Мархарата в сторону оз. Сюгджер; восточный – по среднему течению р. Муна, далее по междуречью Линде–Тюнг через междуречье Ханья–Тюкян по направлению к устью р. Делинде.

3. На летовках олени размещаются тремя обособленными группами: маточные стада, смешанные и самцовые. Маточные стада размещались в южных отрогах кряжа Чекановского, смешанные стада на плато Кыстык и самцовые на возвышенности Бырая-Тас.

4. Основное поголовье лено-оленьской популяции составляют самки (46,9 %), телята текущего года рождения (22,4 %) и молодняк 1–2 года (14,8 %). За 32 года с 1986 по 2018 гг. отмечено уменьшение доли взрослых самцов на 62, 2% (15,9 против 42 %) и увеличение сеголетков на 52,7 %, молодняка на 54,3 %. В целом анализ численности и половозрастного состава популя-

ции свидетельствует об относительно стабильном состоянии популяции, высоком уровне рождаемости и выживаемости молодняка, а соотношение самцов и самок близко к оптимальному (1:2,8).

5. Динамика численности лено-оленьской популяции ДСО с середины прошлого столетия до 2009 г. показывает постепенный рост численности популяции с 21 тыс. до 95 тыс. особей. В последнее десятилетие отмечено некоторое снижение до 83,2 тыс. особей в связи с исключением таймырских мигрантов.

6. Полученные результаты работы по численности лено-оленьской популяции дикого северного оленя будут применены для рационального использования ресурсов лено-оленьской популяции диких северных оленей и выделения квот для их добычи. По имеющимся данным о структуре популяции можно предположительно прогнозировать дальнейшее состояние популяции. Выделенные места летовок и зимовок оленей помогут сохранить основные очаги обитания ЛОП ДСО в пределах его ареала. Выявленные миграционные пути также должны быть под охраной и контролем природоохранных органов. Дальнейшее проведение учетных работ даст возможность наблюдать за состоянием популяции в динамике.

Список литературы / References

1. Макридин В.П. О путях и сроках весенней миграции диких северных оленей в Верхоянском и Булунском районах Якутской АССР. *Зоологический журнал*. 1963;42(5):782–785.

Makridin V.P. On the ways and timing of spring migration of wild reindeer in Verkhoyansk and Bulunsky districts of the Yakut ASSR. *Zoologicheskii Zhurnal*. 1963;42(5):782–785. (In Russ.)

2. Егоров О.В., Попов М.В. Учет численности диких северных оленей с самолета. В кн.: Попов М.В. (ред.). *Методы учета численности промысловых животных Якутии*. Якутск: Якуткнигиздат; 1970. С. 25–37.

Egorov O.V., Popov M.V. An aerial census of wild reindeer. In: Popov M.V. (ed.). *Methods for census of game animals in Yakutia*. Yakutsk: Yakutknigizdat; 1970, pp. 25–37. (In Russ.)

3. Мордосов И.И., Сантаев В.Г. Вопросы охраны и рационального использования тундровых популяций дикого северного оленя Якутии. В кн.: Попов М.В. (ред.). *Охрана и рациональное использование животного мира и природной среды Якутии: Материалы VIII республиканского совещания по охране природы Якутии*. Якутск; 1979. С. 24–26.

Mordosov I.I., Sanaev V.G. Issues of protection and rational use of tundra populations of wild reindeer in Yaku-

- tia. In: Popov M.V. (ed.). *Protection and rational use of wildlife and the natural environment in Yakutia: Materials of the 8th Republican meeting on nature protection in Yakutia*. Yakutsk; 1979, pp. 24–26. (In Russ.)
4. Сафронов В.М., Платонов П.Н., Аржаков И.Н. Численность и половозрастная структура северо-якутских популяций дикого северного оленя. В кн.: Лабути Ю.В. (ред.). *История фауны и экология млекопитающих Якутии*. Якутск: Якутский научный центр СО АН СССР; 1990. С. 86–107.
- Safronov V.M., Platonov P.N., Arzhakov I.N. The number and sex and age structure of the North Yakut populations of wild reindeer. In: Labutin Yu.V. (ed.). *On history of fauna and mammal ecology in Yakutia*. Yakutsk: Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990, pp. 86–107. (In Russ.)
5. Сафронов В.М., Решетников И.С., Ахременко А.К. *Северный олень Якутии: экология, морфология, использование*. Новосибирск: Наука; 1999. 222 с.
- Safronov V.M., Reshetnikov I.S., Akhremenko A.K. *Reindeer of Yakutia: ecology, morphology, use*. Novosibirsk: Nauka; 1999. 222 p. (In Russ.)
6. Сафронов В.М. *Экология и использование дикого северного оленя в Якутии*. Якутск: Изд-во СО РАН; 2005. 178 с.
- Safronov V.M. *Ecology and use of wild reindeer in Yakutia*. Yakutsk: Publishing House SB RAS; 2005. 178 p. (In Russ.)
7. Сафронов В.М. Численность, ареал и миграции тундрового дикого северного оленя в Якутии. В кн.: Ширяев В.В. (ред.). *Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства: Материалы научно-практической конференции, посвященной 85-летию ВНИИОЗ, г. Киров, 22–25 мая 2007 г.* Киров; 2007. С. 381–382.
- Safronov V.M., The number, range and migration of tundra wild reindeer in Yakutia. In: Shiryayev V.V. (ed.). *Recent problems of nature use, game biology and fur farming: Proceedings of International Scientific and Practical Conference dedicated to the 85th anniversary of Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, May 22–25, 2007*. Kirov, 2007, pp. 381–382. (In Russ.)
8. Сафронов В. М., Захаров Е.С. Динамика численности лено-оленинской популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus*). *Вестник Северо-восточного научного центра ДВО РАН*. 2014;(3):88–94.
- Safronov V.M., Zakharov E.S. The number dynamics of the Lena-Olenek wild reindeer (*Rangifer tarandus*) population. *Bulletin of the North-East scientific center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2014;(3): 88–94. (In Russ.)
9. Оценка состояния численности и миграционной активности лено-оленинской и таймырской популяций дикого северного оленя на территории северо-западной Якутии. *Отчет Департамента охотничьего хозяйства РС (Я)*. (Отв. исп. к.б.н. Кривошапкин А.А.). Якутск; 2013. 29 с.
- Assessment of the abundance and migration activity of the Lena-Olenek and Taimyr populations of wild reindeer in the territory of northwest Yakutia. *The report of the Department of Hunting Economy of the RS (Ya)*. (Responsible executor Krivoschapkin A.A.). Yakutsk; 2013. 29 p. (In Russ.)
10. *Авиаучет численности диких северных оленей лено-оленинской популяции в 2001 г.* Отчет Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. (Отв. исп. д.б.н. Сафронов В.М.). Якутск; 2001. 14 с.
- Air census of wild reindeer of the Lena-Olenek population in 2001*. Report of the Institute for Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS. (Responsible executor Safronov V.M.). Yakutsk; 2001. 14 p. (In Russ.)
11. *Авиаобследование лено-оленинской популяции дикого северного оленя в 2008 г.* Отчет Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (Отв. исп. к.б.н. Кривошапкин А.А.). Якутск; 2008. 12 с.
- Aerial survey of the Lena-Olenek wild reindeer population in 2008*. Report of the Institute for Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS (Responsible executor Krivoschapkin A.A.). Yakutsk; 2008. 12 p. (In Russ.)
12. *Авиавизуальный учет численности дикого северного оленя лено-оленинской популяции в 2018 г.* Отчет Института биологических проблем криолитозоны СО РАН. (Отв. исп. к.б.н. Кириллин Е.В.). Якутск; 2018. 30 с.
- Aerial visual census of wild reindeer of the Lena-Olenek population in 2018*. Report of the Institute of Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS. (Responsible executor Kirillin E.V.). Yakutsk; 2018. 30 p. (In Russ.)
13. Павлов Б., Зырянов В., Колпашников Л. и др. Сколько оленей в тундрах Якутии? *Охота и охотничье хозяйство*. 1976;(10):12–14.
- Pavlov B., Zyryanov V., Kolpashchikov L., et al. How many deer are there in the tundra of Yakutia? *Okhota i okhotnich'e khozyaistvo*. 1976;(10):12–14. (In Russ.)
14. Вшивцев В.П., Павлов Б.М., Колпашников Л.А. и др. Численность, структура популяций, использование и охрана диких северных оленей в тундрах Якутии. В кн.: Соколов В.Е. (ред.). *Копытные фауны СССР: Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по копытным СССР, г. Москва, 24–26 декабря 1979 г.* М.: Наука; 1980. С. 78–79.
- Vshivtsev V.P., Pavlov B.M., Kolpashchikov L.A., et al. In: Sokolov V.E. (ed.) *The number, population structure, use and protection of wild reindeer in the tundra of Yakutia. Hoofed fauna of the USSR: Abstracts of the 2nd All-Union Conference on Hoofed animals in the USSR, Moscow, December 24–26, 1979*. Moscow: Nauka; 1980, pp. 78–79. (In Russ.)
15. Сыроечковский Е.Е. *Северный олень*. М.: Агропромиздат; 1986. 255 с.
- Syroechkovsky E.E. *Reindeer*. Moscow: Agropromizdat; 1986. 255 p. (In Russ.)

16. Ревин Ю.В., Вольперт Я.Л. Териофаунистические исследования в долине р. Адычи. В кн.: Соломонов Н.Г. (ред.). *Фауна и экология млекопитающих Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1985. С. 55–73.
- Revin Yu.V., Volpert Ya.L. Theriofaunistic studies in the valley of the River Adycha. In: Solomonov N.G. (ed.). *Fauna and ecology of mammals of Yakutia*. Yakutsk: YaF Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1985, pp. 55–73. (In Russ.)
17. Охлопков И.М., Кривошапкин А.А., Кириллин Е.В. и др. Современное состояние тундровых популяций диких северных оленей Якутии. *Млекопитающие Северной Евразии: жизнь в северных широтах: материалы международной научной конференции, г. Сургут, 6–10 апреля 2014 г.* Сургут: Сургутский гос. ун-т; 2014. С. 209.
- Okhlopov I.M., Krivoshapkin A.A., Kirillin E.V., et al. The current state of the tundra populations of wild reindeer in Yakutia. *Mammals of Northern Eurasia: life in the Northern Latitudes: Proceedings of the international scientific conference*, Surgut, April 6–10, 2014. Surgut: Surgut State University; 2014, p. 209. (In Russ.)
18. Колпашиков Л.А. *Таймырская популяция дикого северного оленя (биологические основы управления и устойчивого использования ресурсов)*: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Норильск; 2000. 48 с.
- Kolpashchikov L.A. *Taimyr wild reindeer population (biological foundations of management and sustainable use of resources)*: Abstr. ... Diss. Dr. Sci., Norilsk; 2000. 48 p. (In Russ.)
19. Малыгина Н.В. Дикий северный олень (*Rangifer tarandus* L.) на Таймыре: исследовательский опыт и судьба популяции в новую эпоху. *Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения*. 2022;2(10): 46–57. https://doi.org/10.51823/74670_2022_2_46
- Malygina N.V. Wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) in Taimyr: reflection of research experience and ideas of methodological approach in the era of the “New normality”. *Arctic 2035: current issues, problems, solutions*. 2022; 2(10):46–57. https://doi.org/10.51823/74670_2022_2_46 (In Russ.)
20. Машкин В.И. *Методы изучения охотничьих и охраняемых животных в полевых условиях*. М.: Лань; 2013. 431 с.
- Mashkin V.I. *Methods of studying hunting and protected animals in the field*. Moscow: Lan'; 2013. 431 p. (In Russ.)
21. Моргунов Н.А., Ломанова Н.В. Авиачет как метод объективного учета численности охотничьих животных. *Русский охотничий портал*. <https://huntportal.ru/journal-online/rhm-2024-01/tema-nomera/aviauchyot-kak-metod-obektivnogo-uchyota>
- Morgunov N.A., Lomanova N.V. Aerial census as a method of objective counting the number of hunting animals. *Russian hunting portal*. <https://huntportal.ru/journal-online/rhm-2024-01/tema-nomera/aviauchyot-kak-metod-obektivnogo-uchyota>
22. Перевалова Е.В. Дикий северный олень: этнические традиции и современная ситуация на Таймыре. *Этнография*. 2022;3(17):93–120. [https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-3\(17\)-93-120](https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-3(17)-93-120)
- Perevalova E.V. Wild reindeer: Ethnic Traditions and the Current Situation in Taymyr. *Etnografia*. 2022;3(17): 93–120. (In Russ.). [https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-3\(17\)-93-120](https://doi.org/10.31250/2618-8600-2022-3(17)-93-120)
23. Шапкин А.М., Иванова Р.Г. О критической численности таймырской популяции дикого северного оленя. *Генетика и разведение животных*. 2023;(4):45–52. <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-45-52>
- Shapkin A., Ivanova R. On the critical abundance of the taimyr population of wild reindeer. *Genetics and breeding of animals*. 2023;(4):45–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-4-45-52>
24. Авиачет подтвердил резкое снижение численности диких северных оленей в Красноярском крае. 2021 [Электронный ресурс]. *Режим доступа*: <https://tass.ru/obschestvo/13245323>. Дата обновления: 27.11.2023.
- The air survey confirmed a sharp decline in the number of wild reindeer in the Krasnoyarsk Territory. 2021 [Electronic resource]. *Access mode*: <https://tass.ru/obschestvo/13245323>. Update date: 11/27/2023. (In Russ.)
25. Бондарь М.Г. Результаты мониторинга состояния и территориального размещения таймырской популяции дикого северного оленя: 1 этап — экспедиция «Хета-Хатанга-2020» [Электронный ресурс]. *Режим доступа*: <https://заповедный.рф/uchyonye-vesti/2020/07/rezultaty-monitoringa-sostoyaniya-i-territorialnogo-razmeshheniya-tajmyrskoj-populyaczii-dikogo-severnogo-olenya-1-etap-ekspedicziya-heta-hatanga-2020/>. Дата обновления: 27.11.2023.
- Bondar M.G. Results of monitoring the condition and territorial location of the Taimyr wild reindeer population: Stage 1 — the Kheta-Khatanga-2020 expedition [Electronic resource]. *Access mode*: <https://заповедный.рф/uchyonye-vesti/2020/07/rezultaty-monitoringa-sostoyaniya-i-territorialnogo-razmeshheniya-tajmyrskoj-populyaczii-dikogo-severnogo-olenya-1-etap-ekspedicziya-heta-hatanga-2020/>. Update date: 11/27/2023. (In Russ.)
26. Колпашиков Л.А., Лавриненко И.А., Зеленцов В.А. и др. Система интегрированного мониторинга популяции диких северных оленей Таймыра с применением аэрокосмических технологий. *Труды СПИИРАН*. 2013;29(6):111–131.
- Kolpashchikov L.A., Lavrinenko I.A., Zelentsov V.A., et al. System of integrated monitoring of wild reindeer Taimyr using aerospace technology. *Proceedings of SPIIRAS*. 2013;29(6):111–131. (In Russ.)
27. *Состояние ресурсов охотничьих животных в Российской Федерации в 2003–2007 гг.* М.: Изд-во ФГУ Центр охотконтроль; 2007. 164 с.
- The state of hunting animal resources in the Russian Federation in 2003–2007*. Moscow: Tsentrokhokontrol; 2007. 164 p. (In Russ.)

Об авторах

КИРИЛЛИН Егор Владимирович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7810-3032>, ResearcherID: ADO-7753-2022, Scopus Author ID: 42161719500, SPIN: 6744-6836, e-mail: egor.kirillin@mail.ru

МАМАЕВ Николай Викторович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, Scopus Author ID: 57191052875, SPIN:1253-2053, e-mail: mamaev_88@bk.ru

СТЕПАНОВА Валентина Валериановна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-3630-0091>, ResearcherID: K-3068-2018, Scopus Author ID: 57197334628, SPIN: 9052-7549, e-mail: valstep@yandex.ru

About the authors

KIRILLIN, Egor Vladimirovich, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7810-3032>, ResearcherID: ADO-7753-2022, Scopus Author ID: 42161719500, SPIN: 6744-6836, e-mail: egor.kirillin@mail.ru

MAMAEV, Nikolay Viktorovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5168-4113>, ResearcherID: R-7952-2018, Scopus Author ID: 57191052875, SPIN:1253-2053, e-mail: mamaev_88@bk.ru

STEPANOVA, Valentina Valerianovna, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-3630-0091>, ResearcherID: K-3068-2018, Scopus Author ID: 57197334628, SPIN: 9052-7549, e-mail: valstep@yandex.ru

Поступила в редакцию / Submitted 18.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 30.01.2024

Принята к публикации / Accepted 27.02.2024

УДК 569(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-143-151>

Оригинальная статья

Морфологическое своеобразие ископаемого бизона (*Bison priscus*) Якутии

С. Д. Колесов^{✉,1}, Г. Г. Боескоров², А. И. Климовский¹

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]kolesov.stanislav@mail.ru

Аннотация

Степной бизон (*Bison priscus*) был одним из наиболее широкораспространенных и многочисленных представителей мамонтовой фауны. Несмотря на многочисленность костных остатков этого вида и давнюю историю исследования, до конца не изучены особенности вымирания степных бизонов в конце плейстоцена и замены их современными формами американского бизона (*Bison bison*) и европейского зубра (*Bison bonasus*). Систематика ископаемых бизонов до сих пор спорна и не разработана окончательно. В данной статье приведены результаты исследования редкого по сохранности черепа ископаемого бизона, найденного в Верхоянском районе (Якутия). Этот череп сравнивался по морфологическим и остеометрическим признакам с другими черепами бизонов из коллекций отдела изучения мамонтовой фауны АН РС (Я) и Музея мамонта СВФУ, найденными в разное время и на разных местонахождениях в верхнеплейстоценовых отложениях, а также с черепами современных американских бизонов *Bison bison* из коллекции Зоологического музея Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Даны описания и стандартные морфометрические показатели черепов и рогов бизонов, снятые с использованием методик промеров Скиннера и Кайзена. Анализ имеющихся данных показал, что черепа *Bison priscus* из позднеплейстоценовых отложений Якутии по большинству параметров соответствуют максимальным размерам современного американского бизона *Bison bison* или крупнее последнего. Рога же бизонов из позднего плейстоцена превышают по размерам рога современных бизонов в 1,5–2 раза и сопоставимы с таковыми среднеплейстоценового длиннорогого бизона *B. p. crassicornis* Richardson (=longicornis). Подобная диспропорция в размерах черепа и рогов у позднеплейстоценового бизона, по-видимому, обусловлена обитанием их в открытых ландшафтах арктической степи. Морфологическое своеобразие степного бизона позднего плейстоцена Якутии представляет интерес для дальнейших исследований, так как он может быть выделен в самостоятельный таксон (подвид), что имеет принципиальное значение для региональной палеонтологии и стратиграфии.

Ключевые слова: степной бизон, мамонтовая фауна, морфологические особенности, плейстоцен, арктическая степь

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00569, <https://rscf.ru/project/23-24-00569>.

Для цитирования: Колесов С.Д., Боескоров Г.Г., Климовский А.И. Морфологическое своеобразие ископаемого бизона (*Bison priscus*) Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):143–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-143-151>

Original article

Morphological peculiarity of the fossil bison (*Bison priscus*) from Yakutia

Stanislav D. Kolesov^{✉,1}, Gennady G. Boeskorov², Aysen I. Klimovsky¹

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

²Institute of Geology of Diamond and Precious Metals, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]kolesov.stanislav@mail.ru

Abstract

The steppe bison (*Bison priscus*) is one of the most widespread and numerous representatives of the mammoth fauna. However, the features of the extinction of steppe bison at the end of the Pleistocene and their replacement by modern

forms of the American bison (*Bison bison*) and European bison (*Bison bonasus*) have not yet been fully studied. Thus, complete skulls of fossil steppe bison are of great interest for studies on taxonomy and kinship relations in the genus *Bison*. This article presents the results of a study of the finely preserved skull of a fossil bison found in the Verkhoyansk district (Yakutia). This skull was compared by its morphological and osteometric features with other bison skulls, which were found at different times and locations in Upper Pleistocene deposits, as well as with the skulls of modern American bison *Bison bison* from the collection of the Zoological Museum of the Lomonosov Moscow State University. Standard morphometric indicators of bison skulls and horns were obtained using the Skinner and Kaisen measurement methods. Analysis showed that skulls of *Bison priscus* from Late Pleistocene sediments of Yakutia, according to most parameters, correspond to the maximum size of modern American bison *Bison bison* or even larger than the latter. The horns of bison from the Late Pleistocene are 1.5–2 times larger in size than the horns of modern bison and are comparable to those of the Middle Pleistocene long-horned bison *B. p. crassicornis* Richardson (= *longicornis*). The disproportion in the size of the skull and horns of the Late Pleistocene bison is due to their habitat in the open landscapes of the Arctic steppe. The morphological uniqueness of the steppe bison of the Late Pleistocene in Yakutia has prospects for further research, because it deserves to be identified as an independent taxon (subspecies), which is relevant for regional paleontology and stratigraphy.

Keywords: steppe bison, Mammoth fauna, morphological features, Pleistocene, Arctic steppe

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-24-00569, <https://rscf.ru/project/23-24-00569>).

For citation: Kolesov S.D., Boeskorov G.G., Klimovsky A.I. Morphological peculiarity of the fossil bison (*Bison priscus*) from Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):143–151. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-143-151>

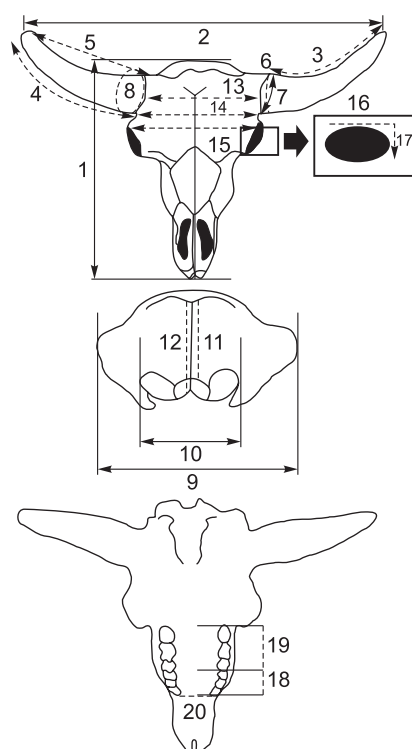
Введение

Находки остатков ископаемых бизонов на территории Якутии многочисленны, отмечены на большей части местонахождений мамонтовой фауны и палеолитических стоянках. В основном они представлены костями конечностей, позвонками или роговыми стержнями. Встречаются черепа с обломанными носовыми костями или без зубного ряда, роговых чехлов и т. п. Однако черепа с полной сохранностью крайне редки.

Степной бизон (*Bison priscus* Воj.) был характерным видом среднего и позднего плейстоцена, который вымер в начале голоцена [1, 2]. Географический ареал вида простирался от северной Испании через Центральную и Восточную Европу в Сибирь и через Берингию в Северную Америку [3, 4, 5]. В течение многих тысячелетий степной бизон эволюционировал в различные подвиды, которые были приспособлены к различным экологическим и биогеографическим условиям.

Подрод *Bison* впервые появляется в позднем плиоцене Азии под названиями *Bison paleosinensis* Chardin et Piveteau и *Bison sivalensis* Lydekker. Первое расселение в Европу зафиксировано у *Bison tamanensis* N. Verestchagin, с двумя последующими эволюционными линиями: с одной стороны – *Bison schoetensacki* Freudentberg с относительно некрупными размерами и роговыми стержнями – короткими и толстыми, с другой стороны – степной бизон (*Bison priscus*) с длинными роговыми стержнями и крупными размерами [6].

Внутри вида *Bison priscus* описан ряд подвигов в Евразии [7]. *Bison priscus gigas* Flerow из первой половины среднего плейстоцена – самый крупный евразийский бизон. Размах роговых стержней между концами достигал 2 м. Его географический ареал простирался от Южной Сибири и Восточной Европы до Волги [4]. *Bison priscus priscus*, относящийся ко второй половине среднего плейстоцена, имел размах роговых стержней от 900 до 1360 см. Его ареал простирался от Западной Европы до реки Енисей на востоке и Казахстана на юге. Из среднего плейстоцена Канады был описан длиннорогий («толсторогий») бизон *B. priscus crassicornis* Richardson (= *longicornis*). Впоследствии К.К. Флеров установил, что данный подвид степного бизона в среднем–начале позднего плейстоцена (конец миндель-рисса–начало вюрма) населял не только территории Канады и Аляски, но и северную часть Восточной Азии на запад до Енисея [3]. Более поздний по времени подвид – *B. priscus mediator* Hilzheimer, относящийся к позднему плейстоцену, меньше номинативного подвида, с более изогнутыми роговыми стержнями, с размахом менее 900 см, практически с тем же географическим распространением, что и *B. priscus priscus* [8, 4]. Некоторые авторы не согласны с хронологическими границами двух последних подвигов. Наименьшие размеры *B. priscus mediator* могут быть обусловлены началом эволюционных изменений, приведших к появлению европейского зубра. К.К. Флеров [4] относил бизонов позднего плейстоцена из Восточной Сибири (на



1	Кондилобазальная длина
2	Размах роговых стержней, от кончика до кончика
3	Длина рогового стержня, верхняя кривая, от кончика до основания
4	Длина стержня по нижней кривой, от кончика до основания
5	Расстояние по хорде, от кончика до основания
6	Вертикальный диаметр основания рогового стержня
7	Поперечный диаметр основания рогового стержня
8	Минимальная окружность, основание рогового стержня
9	Ширина затылочной части у слуховых отверстий
10	Ширина затылочных мыщелков
11	Глубина от затылочной линии до дорсального края верхней границы foramen magnum (DEP)
12	Глубина, от затылочной линии до дорсального края нижней границы foramen magnum (DEP)
13	Ширина между основаниями роговых стержней
14	Наименьшая ширина лобного отдела между роговыми стержнями и орбитами глазниц
15	Наибольшая ширина лобного отдела у орбит глазниц
16	Передне-задний внутренний диаметр орбиты глазниц
17	Дорсо-вентральный внутренний диаметр орбиты глазниц
18	Расстояние P2-M3
19	Расстояние M1-M3
20	Ширина между P2

Рис. 1. Методика промеров черепа бизона, с пояснениями

Fig. 1. Method of bison skull measuring with explanations

запад до Енисея) к подвиду *Bison priscus occidentalis* Lucas, описанному с Аляски, отмечая большое сходство бизонов из данных регионов. Кроме того, он отмечал, что позднеплейстоценовый бизон из Северо-Восточной Сибири (р. Индигирка) по многим особенностям внешней морфологии практически идентичен современному канадскому лесному бизону *B. bison athabasca*, считая последнего подвидом *Bison priscus*. К.К. Флеров указывал расстояние между концами роговых стержней для *B. priscus occidentalis* – 670–800 см.

Закономерности вымирания степного бизона в конце плейстоцена и замены современными формами американского бизона (*Bison bison*) и европейского зубра (*Bison bonasus* (Linnaeus)) до сих пор в деталях неизвестны. В связи с этим немалый интерес для исследований по систематике и родственным связям в роде *Bison* представляют целые черепа ископаемого степного бизона, несущие в себе много информации по морфологическим особенностям их обладателей.

Материал и методика

Материал представлен редким по сохранности черепом ископаемого бизона, найденным в 2022 г. в Верхоянском улусе (№ В-3-22). Для сравнительного анализа были изучены черепа современного американского бизона (*Bison bison*) из коллекции Зоологического музея МГУ им. М.В. Ломоносова, без роговых чехлов (S-134608; S-102022; S-102017; S-192592), и черепа ископаемых бизонов из коллекции отдела изучения мамонтовой фауны Академии наук РС(Я), происходящих из верхнеплейстоценовых отложений: № БдМэ-21-24 из Абыйского района, № В-1-22 и В-2-22 из Верхоянского района, различной степени сохранности.

Все измерения черепов были выполнены в соответствии с методиками промеров Скиннера (Skinner) и Кайзена (Kaisen) [9] и Макдональда (McDonald) [10] (рис. 1) и приведены в миллиметрах. Кроме того, дополнительно проведены следующие измерения рогов, нередко используемые различными исследователями: расстояние

между вершинами чехлов (промер 21), наибольшее расстояние между большими кривизнами роговых чехлов (промер 22), длина рогового чехла вдоль большой кривизны (промер 23) (табл. 1).

Результаты и обсуждение

Череп № В-3-22 (рис. 2). Кости черепа практически не минерализованы, преимущественно желтого цвета, что характерно для костей животных, происходящих из многолетнемерзлых льдистых отложений верхнего плейстоцена. Лобный шов частично сросшийся. Череп с нижней челюстью, обломанной в районе резцов пополам. Скуловые дуги, верхняя челюсть, глазницы, носовые кости сохранены. Затылок с затылочны-



Рис. 2. Фронтальный вид черепа ископаемого бизона № В-3-22.

Fig. 2. Frontal view of the skull of fossil bison No. B-3-22.

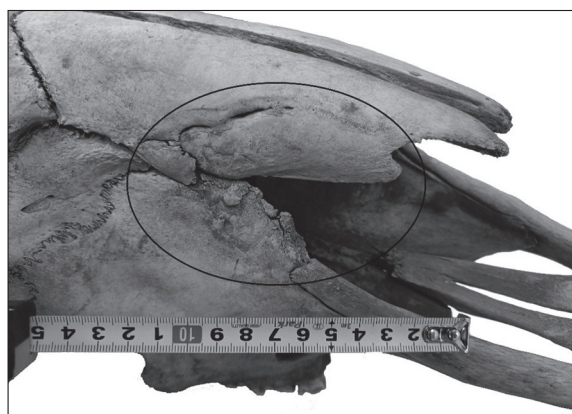


Рис. 3. Характер повреждения носовой и верхнечелюстной костей на черепе № В-3-22

Fig. 3. Features of damage to the nasal and maxillary bones on the skull No. B-3-22

ми мышцелками, в хорошем состоянии. Имеются все коренные и предкоренные зубы как верхней, так и нижней челюстей, отсутствуют резцы. Роговые чехлы минимально повреждены, прочно соединены с роговыми стержнями, в связи с чем измерить последние не представилось возможным.

В среднем роговые стержни у бизонов составляют приблизительно 70 % от длины чехла по кривизне, с учетом этого, реконструированный размах роговых стержней № В-3-22 составляет не менее 1150 мм, что соответствует значениям других черепов ископаемого бизона, исследованных нами.

Достаточно большие размеры и основные морфометрические показатели позволяют отнести череп № В-3-22 ко взрослому самцу, а частично сросшийся лобный шов и степень стертости зубов приблизительно соответствуют 4–6 годам индивидуального возраста современного зубра или бизона. В этом возрасте молодые быки чрезвычайно активны и агрессивны [9], однако при этом уступают по массе более старым особям и обычно проигрывают им в схватках.

В правой носовой кости описываемого черепа имеется след от раны, полученной при жизни (рис. 3). Вероятно, от сильного удара часть кости была отломана, но впоследствии, видимо, рана зажила, а отломанный фрагмент стал прирастать к носовой кости, на что указывают следы частичного зарастания, и при этом смещение обломка было небольшим. В верхней части верхнечелюстной кости, рядом с нижним краем носовой кости, имеются следы костной мозоли, видимо, этот участок также был деформирован в результате травмы (см. рис. 3). Следы зарастания поврежденных костей свидетельствуют о том, что бизон выжил после полученной травмы. Тем не менее, он умер или погиб в молодом возрасте, скорее всего, от другой причины.

У современных беловежских лесных (европейских) зубров (*Bison bonasus*) схватки между быками во время гона происходят довольно редко, таким образом, гон у них проходит относительно спокойно [11]. В течение многолетних наблюдений за зубрами [11] авторы заметили лишь несколько эпизодов настоящих поединков. В основном, схватки заканчивались, не успев начаться. Перед самым поединком самцы демонстрируют свою силу, выкорчевывая небольшие деревья, вытаптывая землю, мочась. В подавляющем большинстве случаев этим все и заканчи-

валось. По крайней мере, у европейских зубров схватки происходили лишь в тех случаях, когда самцы были равны и размерами, и силой, которую они демонстрировали. Непосредственно во время реальной схватки бой шел по типу «лоб в лоб», таким образом в завершении схватки животные лишь уставали. Однако при этом быки редко, но все же погибали от ранений, полученных во время поединка. Скорее всего это обусловлено тем, что быки ранили друг друга не только в часть головы, но и в части туловища, пара таких случаев наблюдались авторами [11]. Зубры, по сравнению с ископаемыми бизонами, имеют гораздо меньшие размеры рогов, тем не менее летальные исходы во время турнирных боев у них все же встречаются. Все вышеописанное относится к зубрам, которые живут под непосредственным наблюдением человека, выводятся в заповедниках, прикармливаются в зимний период и во времена сильного стресса.

В позднем плейстоцене, когда численность бизонов, по-видимому, была очень велика (о чем косвенно свидетельствуют многочисленные их остатки на большинстве известных местонахождений мамонтовой фауны в Якутии), по-видимому, и схватки между быками во время гона происходили намного чаще и были очень ожесточенными. Учитывая крупные размеры и большой размах рогов, летальных исходов во время тур-

нирных поединков скорее всего было очень много. Не исключено, что молодой бык, которому принадлежал череп № В-3-22, получил тяжелую травму во время такого поединка.

Череп № В-1-22. Кости коричневого цвета. Роговые стержни без чехлов, сохранились без существенных повреждений. Отсутствуют носовые кости, межчелюстные кости и передняя часть верхней челюсти. Зубы полностью отсутствуют.

Череп № В-2-22. Кости светло-коричневого цвета. Сохранность черепа практически идентична черепу № В-1-22. С левой стороны лобной кости между основанием рогового стержня и глазницей имеется небольшой костяной нарост неправильной формы, предположительно, зажившая рана.

Череп № БдМэ-21-24. Кости палевого цвета. Роговые стержни с чехлами, которые без особых усилий извлекаются. Носовых, как и межчелюстных костей не имеется, обломана передняя часть верхней челюсти. Из зубов сохранились М2 и М3 с обеих сторон. Примерный индивидуальный возраст 7–8 лет.

Из данных, приведенных в таблице, и рис. 4 видно, что ископаемые бизоны крупнее, чем современные, особенно это заметно по развитию рогов. Роговые стержни у *B. priscus* из позднего плейстоцена Якутии очень длинные, гораздо длиннее, чем у современных бизонов Север-

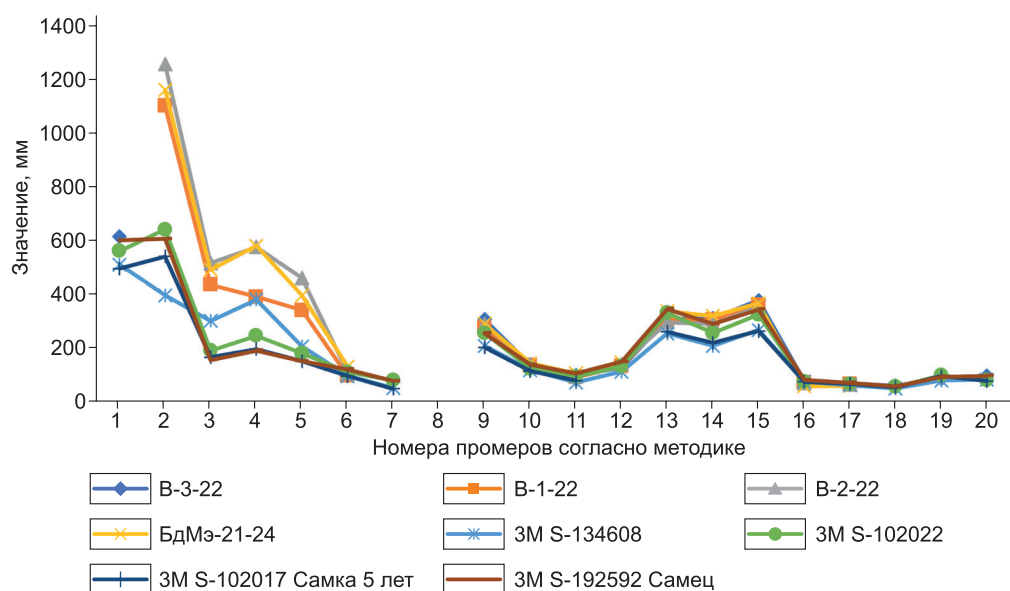


Рис. 4. Сравнительная диаграмма остеометрических данных некоторых черепов *B. priscus* и *B. bison*, приведенных в таблице

Fig. 4. Comparative diagram of the osteometric data of some skulls of *B. priscus* and *B. bison* given in Table

Морфометрические особенности черепов бизонов, измеренных по методикам Скиннера и Кайзена [3] и Макдональда [4] (рис. 1) с добавлениями (промеры 21–23)

Morphometric features of bison skulls measured according to the methods of Skinner and Kaisen [3] and McDonald [4] (Fig. 1) with additions (measurements 21–23)

Номер промера	<i>Bison priscus</i>										<i>Bison bison bison</i>				<i>Bison bison athabascae</i>			
	Поздний плейстоцен										Современность							
	Якутия										США				Канада			
	Верхоянский район	Абыйский район	Р. Вилюй	Р. Колыма	Р. Алазея	Северная Якутия (<i>B. p. occidentalis</i>)												
	Самцы					Самцы и самки					Самцы				Самцы			
	B-3-22	B-1-22	B-2-22	БдМэ-21-24	№ 101 [12]	ИГАБМ №4475 [13]	MM 7183 [14]	MM без номера [14]	[13] n = 12		3M S-192592	3M S-102022	3M S-102017	3M S-134608	[10]			
									limit	X					limit	X	limit	X
1	615					1040					600	560	495	510				
2		1100	1255	1160							605	640	540	395	510–778	603,9	542–848	681,2
3		435	515	490							155	190	165	300	124–270	190,7	165–323	
4		390	575	580	625	480			160–380	269,5	190	245	195	380				
5		340	460	395	471	373			131–250	205,2	150	180	150	205	120–243	172,4	154–277	207
6	96	96	108	130	115	102	112		51–107	75,2	120	110	95	95				
7					117	103	106,2		55–106	73,1	76	79	48	51	69–99	81,9	81–106	91,5
8					363	360	397		177–360	262,8					199–324	255,4	254–322	289,1
9	306	274	288	289	280	312	279	294			254	255	202	207	220–270	243,9	243–298	273,6
10	136	135	139	143							137	123	113	117	111–140	126,6	118–139	130,1
11	98	90	94	105							105	93	78	71	81–115	98,7	92–114	99,6
12	126	132	139	146							148	131		111				

13	307	305	295	336	322	390	325	340	210–340	276	345	330	260	253					
14	310	304	289	319							289	255	218	207	237–318	271,1	273–313	293,4	
15	377	359	351	366							343	323	263	266	289–356	324,6	326–384	354	
16	75	70	68	57							80	74	74	75					
17	67	65	63	59							70	65	66	61					
18	59										56	55	53	49					
19	85										92	98	95	78	81,8–97,9	90,6			
20	97										96	79	76	82					
21	970				776	720	866	634	400–810	622,1					460–740*	630*			
22	1240				1215	1160	1134	1150	522–900	701,2					660–740*	709*			
23	890				978	870	820	890	500–560	530									

Примечание. * по: Halloran, 1960 [15].

ной Америки (см. таблицу). В 2011 г. на о. Улахан Ары в среднем течении р. Лена найден фрагмент черепа степного бизона с роговым стержнем исключительно крупных размеров (длина по большой кривизне 655 мм, окружность основания 420 мм) – один из наибольших, найденных на территории Якутии к настоящему времени. По размерам рогового стержня этот экземпляр ближе к крупному бизону среднего плейстоцена *B. priscus crassicornis*, чем к бизону позднего плейстоцена (*B. priscus occidentalis*). Вместе с тем радиоуглеродная датировка этой находки (31560 ± 240 лет назад (ГИН-14696) указывает на то, что ее возраст соответствует концу каргинского интерстадиала позднего плейстоцена [16].

Размах рогов у ископаемых бизонов может в полтора–два раза превосходить размах рогов у современных бизонов (см. таблицу). Ранее было отмечено, что размеры рогов у представителей рода *Bison* коррелируют с характером их местообитаний: в открытых ландшафтах (прерия, степь) размеры рогов у них больше, чем в закрытых местообитаниях (смешанный лес, тайга) [4]. Очевидно, у бизонов, аналогично оленям, рога служат не только для защиты, но и для демонстрации в случаях определения иерархического статуса [17, 18], и их форма и размеры связаны со средой обитания: наибольшей величиной рогов, очевидно, отличались бизоны, обитавшие в открытых ландшафтах арктической степи позднего плейстоцена. В то же время, современный прерийный бизон *B. b. bison* уступает по размерам рогов лесному бизону *B. b. athabasca* [10]. Однако исконный прерийный бизон был почти истреблен в конце 19 в., это инбредный подвид, который претерпел значительную утерю генетического разнообразия и примесь генов крупного рогатого скота, что привело его к определенному вырождению [19–21] и, очевидно, сказалось на уменьшении размеров тела и рогов.

По многим промерам черепа ископаемые бизоны соответствуют максимальным размерам современных бизонов, нередко превосходя последних (см. таблицу).

Флеров [4] считал, что позднеплейстоценовый короткорогий бизон *B.p. occidentalis* Северной Америки и Восточной Сибири имел роговые стержни массивные, но более короткие (с расстоянием 670–800 мм между концами), чем длиннорогий бизон *B. p. crassicornis* Richardson (=longicornis) из Северной Америки и Восточной Азии

(с расстоянием 800–1360 мм между концами). Тем не менее, исследованные нами черепа бизонов из позднего плейстоцена Якутии имеют большие рога, чем *B.p. occidentalis*, исследованные К.К. Флеровым, и схожи по размерам с более крупными среднеплейстоценовыми бизонами. Указанное обстоятельство свидетельствует о том, что внутривидовая систематика ископаемых бизонов, особенно на территории Якутии, нуждается в доработке, на что указывал еще А.В. Шер [22].

Заключение

Проведенное исследование и анализ имеющихся литературных данных показал, что черепа *Bison priscus* из позднеплейстоценовых отложений Якутии по большинству параметров соответствуют максимальным размерам современного американского бизона *Bison bison* или крупнее последних. Рога же бизонов из позднего плейстоцена превышают по размерам рога современных бизонов в 1,5–2 раза и сопоставимы с таковыми среднеплейстоценового длиннорогого бизона *B. p. crassicornis* Richardson (=longicornis). Подобная диспропорция в размерах черепа и рогов у позднеплейстоценового бизона, по-видимому, обусловлена обитанием их в открытых ландшафтах арктической степи. Возможно, морфологическое своеобразие степного бизона позднего плейстоцена Якутии заслуживает выделения его в самостоятельный подвид.

Список литературы / References

1. Benecke N. The Holocene distribution of European bison – the archaeozoological record. *Munibe (Antropologia-Arkeologia)*. 2005;(57):421–428.
2. Boeskorov G.G., Potapova O.R., Protopopov A.V., et al. The Yukagir Bison: analysis of a complete frozen mummy of the bison, *Bison priscus* from the early Holocene of Northern Eurasia. *Quaternary International*. 2016; 406. Part B:94–110. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.11.084>
3. Флеров К.К. Бизоны северо-восточной Сибири. В кн.: Световидов А.Н. (ред.). *Мамонтовая фауна и среда ее обитания в антропогене СССР. Труды Зоологического института АН СССР*. Л.; 1977. С. 39–56.
4. Флеров К.К. Bisons of northeastern Siberia. In: Svetovidov A.N. (ed.). *Mammoth fauna and its habitat in the anthropogene of the USSR. Proceedings of the Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences*. Leningrad; 1977, pp. 39–56. (In Russ.)
5. Флеров К.К. Род *Bison* Hamilton Smith, 1827. В кн.: Соколов В.Е. (ред.). *Зубр=European bison. Морфология, систематика, эволюция, экология*. М.: Наука; 1979. С. 14–48.

6. Flerov K.K. Genus *Bison* Hamilton Smith, 1827. In: Sokolov V.E. (ed.). *European bison. Morphology, systematics, evolution, ecology*. Moscow: Nauka; 1979, pp. 14–48. (In Russ.)
7. Kahlke R.D. *Die Entstehungs-, Entwicklungs- und Verbreitungsgeschichte des oberpleistozänen Mammuthus-Coelodonta-Faunenkomplexes in Eurasien (Grob-saiger)*. Frankfurt-am-Main; 1994. 164 p.
8. Flerow K.K. Die fossilen Bisonreste von Taubach und ihre Stellung in der Entwicklungsgeschichte der Gattung *Bison* in Europa. *Quartärpaläontologie*. 1976;(2):179–208.
9. Flerow C.C. Gigantic Bisons of Asia. *Journal of the Palaeontological society of India*. 1977;20:77–80.
10. Vercoutère C., Guérin C. Les Bovidae (Mammalia, Artiodactyla) du Pléistocène moyen final de l'aven de Romain-laRoche (Doubs, France). *Revue de Paléobiologie*. 2010;(9):655–696.
11. Skinner M.F., Kaise C. The fossil Bison of Alaska and preliminary revision of the Genus. *Bulletin of the American Museum of Natural History*. 1947;89:123–256.
12. McDonald J.N. *North American Bison: Their Classification and Evolution*. Berkeley: University of California Press; 1981. 350 p.
13. Krasinska M., Krasinski Z. *European bison – the nature monograph*. Białowieża, Poland: Mammal Research Institute; 2007. 317 p.
14. Русанов Б.С. *Биостратиграфия кайнозойских отложений Южной Якутии*. М.: Наука; 1968. 458 с.
15. Rusanov B.S. *Biostratigraphy of Cenozoic deposits of Southern Yakutia*. Moscow: Nauka; 1968. 458 p. (In Russ.)
16. Лазарев П.А., Томская А.И. *Млекопитающие и биостратиграфия позднего кайнозоя Северной Якутии*. Якутск: Издательство ЯФ СО АН СССР; 1987. 169 с.
17. Lazarev P.A., Tomskaya A.I. *Mammals and biostratigraphy of the Late Cenozoic of Northern Yakutia*. Yakutsk: YaF SB AS USSR Publishing House; 1987. 169 p. (In Russ.)
18. Боесков Г.Г. *Формирование современной териофауны Якутии (поздний плейстоцен – голоцен)*: Дис. ... докт. биол. наук. Якутск; Владивосток; 2005. 351 с.
19. Boeskorov G.G. *Formation of the modern theriofauna of Yakutia (late Pleistocene – Holocene)*: Diss. ... Doct. Sci. Yakutsk; Vladivostok; 2005. 351 p. (In Russ.)
20. Halloran A.F. American bison weights and measurements from the Wichita Mountains Wildlife Refuge. *Proceedings of the Oklahoma Academy of Sciences*. 1960;(41):212–218.
21. Боесков Г.Г., Ноговицын П.Р., Машченко Е.Н. и др. Новые данные о млекопитающих мамонтовой фауны бассейна Средней Лены (Якутия; природный парк “Ленские столбы” и прилегающие территории). *Докл. Акад. наук. Науки о Земле*. 2016;469(2):190–194. <https://doi.org/10.7868/S0869565216200147>
22. Boeskorov G.G., Nogovitsyn P.R., Mashchenko E.N., et al. New data on mammoth fauna mammals in the

Central Lena River basin (Yakutia; Lenskie Stolby Natural park and adjacent territories). *Doklady Earth Sciences*. 2016;469(1):647–651. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16070102>

17. Bubenik A.B. *Das Geweih*. Hamburg: Paul Parey Verlag; 1966. 214 p.

18. Боескоров Г.Г. Систематика и происхождение современных лосей. Новосибирск: Наука; 2001. 119 с.

Boeskorov G.G. The systematics and origin of the modern moose. Novosibirsk: Nauka; 2001. 119 p. (In Russ.)

19. Gates C.C., Freese C.H., Gogan P.J.P., Kotzman M. *American Bison: Status Survey and Conservation Guidelines*. Gland, Switzerland: IUCN, 2010. 134 p.

20. Halbert N., Gogan P., Hiebert R., Derr J. Where the buffalo roam: The role of history and genetics in the conservation of bison on U.S. federal lands. *Park Science*. 2007;24(2):22–29.

21. Polziehn R., Strobeck C., Sheraton J., Beech R. Bovine mtDNA discovered in North American Bison Populations. *Conservation Biology*. 1995;9(6):1638–1643.

22. Шер А.В. Млекопитающие и стратиграфия плейстоцена крайнего Северо-Востока СССР и Северной Америки. М.: Наука; 1971. 310 с.

Sher A.V. *Mammals and Pleistocene stratigraphy of the Far Northeast of the USSR and North America*. Moscow: Nauka; 1971. 310 p. (In Russ.)

Об авторах

КОЛЕСОВ Станислав Дмитриевич, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-4632-8813>, SPIN: 4270-5435, e-mail: kolesov.stanislav@mail.ru

БОЕСКОРОВ Геннадий Гаврилович, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2360-7740>, ResearcherID: J-7780-2018, Scopus Author ID: 6602163346, SPIN: 9863-5999, e-mail: gboeskorov@mail.ru

КЛИМОВСКИЙ Айсен Иванович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2258-9173>, SPIN: 4805-2226, e-mail: aissen87@mail.ru

About the authors

KOLESOV Stanislav Dmitrievich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-4632-8813>, SPIN: 4270-5435, e-mail: kolesov.stanislav@mail.ru

BOESKOROV Gennady Gavrilovich, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2360-7740>, <https://orcid.org/0000-0002-2360-7740>, ResearcherID: J-7780-2018, Scopus Author ID: 6602163346, SPIN: 9863-5999, e-mail: gboeskorov@mail.ru

KLIMOVSKY Aysen Ivanovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2258-9173>, SPIN: 4805-2226, e-mail: aissen87@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 21.09.2023

Поступила после рецензирования / Revised 07.02.2024

Принята к публикации / Accepted 20.02.2024

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.958, 539.234

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-152-161>

Оригинальная статья

Графеновые пленки, выращенные методом химического осаждения из газовой фазы, и их приложения

П. В. Винокуров^{✉,1}, В. И. Попов², Д. В. Николаев¹, С. А. Смагулова¹

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация

✉pv.vinokurov@s-vfu.ru

Аннотация

В статье приведены результаты по синтезу графеновых пленок и показаны возможности их приложения для создания электронных структур и приборов. Графеновые пленки были синтезированы на медных подложках методом химического осаждения из газовой фазы при высоких температурах ~ 1050 °C в результате разложения метана. Показано, что на начальном этапе синтеза формируются графеновые домены с гексагональными формами со средними размерами ~10 мкм. С увеличением времени синтеза происходит сшивка доменов, в результате которой формируются поликристаллические сплошные графеновые пленки. На основе выращенных графеновых пленок были созданы гибкие прозрачные проводящие сенсорные панели. Для их создания использовался метод ламинирования, позволяющий переносить графеновые пленки с медной фольги на полимерные подложки. Был изготовлен лабораторный сенсорный экран, где графеновая пленка выступала в качестве емкостного сенсора касания. Также на основе перенесенных графеновых пленок были созданы проводящие прозрачные электроды для фоточувствительного элемента и резистивные сенсоры влажности. Графеновый сенсор влажности является малоинерционным, имеет высокую температурную стабильность и высокую надежность использования.

Ключевые слова: графеновые домены, CVD-метод, прозрачные электроды, емкостной сенсор касания, сенсор влажности

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках научных проектов (№ FSRG-2023-0026).

Для цитирования: Винокуров П.В., Попов В.И., Николаев Д.В., Смагулова С.А. Графеновые пленки, выращенные методом химического осаждения из газовой фазы, и их приложения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(1):152–161. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-152-161>

Original article

Graphene films grown by chemical vapor deposition and their applications

Pavel V. Vinokurov^{✉,1}, Vasily I. Popov², Danil V. Nikolaev¹, Svetlana A. Smagulova¹

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

✉pv.vinokurov@s-vfu.ru

Abstract

In this article we provide the results of the synthesis of graphene films and discuss their potential applications in electronic structures. Graphene films were synthesized on copper foil using the CVD method at 1050 °C. During the initial stage of synthesis, graphene domains with hexagonal shapes and an average size of 10 μm were formed. The orientation

and size of the graphene domains are based on the synthesis parameters and the copper foil. As the synthesis time increases, domain cross-linking occurs, resulting in polycrystalline continuous graphene film formation. Graphene films have areas up to 100 cm² and thicknesses ~ 1 nm to 5 nm. To measure the Raman spectra, graphene films were transferred to SiO₂/Si substrates. Graphene films exhibit an intense 2D peak that significantly exceeds the G peak of crystalline graphite. Flexible transparent conductive touch panels were created on the basis of the grown graphene films. A lamination method has been used to create graphene films that can be transferred from copper foil to polymer substrates. A laboratory touch screen with a graphene film acting as a capacitive touch sensor was constructed on the basis of the transferred film, and transparent electrodes for molybdenum disulfide-based photosensitive elements were also created. Resistive humidity sensors based on graphene films were developed and transferred to SiO₂/Si and epoxy/Si substrates. The graphene humidity sensor has a low response, high temperature stability, and is highly reliable.

Keywords: graphene domains, CVD method, transparent electrodes, capacitive touch sensor, humidity sensor

Funding. This study was conducted within the framework of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation (No. FSRG-2023-0026).

For citation: Vinokurov P.V., Popov V.I., Nikolaev D.V., Smagulova S.A. Graphene films grown by chemical vapor deposition and their applications. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):152–161. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-152-161>

Введение

Уникальные свойства графена, такие как высокая подвижность носителей заряда, большая электропроводность, прозрачность, гибкость, механическая прочность, открывают перспективы их использования в различных приложениях. Высокая подвижность носителей заряда позволяет детектировать терагерцевое излучение с помощью графеновых приборных устройств [1]. Благодаря своим механическим свойствам прозрачные графеновые пленки применимы для создания гибких проводящих сенсорных панелей и электродов [2]. Гибкие графеновые сенсорные экраны востребованы в качестве замены оксида индия-олова, который применяется в настоящее время. Электропроводность графеновых пленок чувствительна к различным молекулам, адсорбированным на их поверхностях [3], что позволяет создавать на их основе различные сенсорные устройства [4].

Для синтеза графеновых пленок наиболее перспективен метод химического осаждения из газовой фазы (CVD). В этом методе в качестве газообразных источников углерода используются метан (CH₄), ацетилен (C₂H₂), этилен (C₂H₄) и др. [5]. Сильные связи C–H делают метан малореакционным и невосприимчивым к химическим реакциям, но при соприкосновении метана с катализаторами, такими как медь, никель, кобальт, платина, золото, происходит разложение метана при более низких температурах с выделением свободных атомов углерода на поверхностях катализаторов [6]. В настоящее время для роста графеновых пленок наиболее успешно используются медная или никелевая фольга. Растворимость углерода в меди крайне мала (менее 0,001 %), меньше чем на никеле и других ма-

териалах, поэтому на поверхности медной фольги легче синтезировать однородную графеновую пленку [7]. Рост графеновых пленок на медной подложке происходит в основном за счет следующих процессов: при температурах, близких к температуре плавления меди, метан начинает разлагаться на поверхности меди; адсорбированные молекулы углерода прикрепляются к различным дефектам на поверхности медной подложки, являющимся зародышами для формирования графеновых доменов. На размеры и формы графеновых доменов, выращенных методом CVD, влияют условия синтеза и обработка подложки [8]. Отжиг поверхности медной фольги в течение 7 ч при температуре ~1077 °C в потоке водорода позволил получить графеновые домены размерами от 15 мкм до 2,3 мм [9]. В работе [10] авторы синтезировали графеновые домены разных форм (гексагональной, звездообразной, квадратной и круглой) путем изменения времени синтеза, соотношения метан:водород и давления, при котором происходил синтез. Авторы [11] продемонстрировали, что форма, ориентация, геометрия краев и толщина графеновых доменов сильно зависят от кристаллографической ориентации поликристаллических зерен медной фольги. Высококачественный однослойный графен был получен на медной подложке с ориентацией (111), а двухслойный графен – на Cu с ориентацией (001). Гексагональные графеновые домены были синтезированы на подложках Cu (101). В [12] было исследовано влияние ориентации поверхности меди, давлений в камере синтеза, соотношений потоков CH₄/H₂ на рост графеновых доменов. Показано, что на медных подложках с ориентацией Cu (111) края доменов имеют более четкие границы, чем на поверхностях Cu (100) и Cu (110),

на которых края начинают сливаться и это приводит к образованию круглых доменов с неровностями по периметру. По настоящее время остается актуальным исследование методов синтеза доменов с большими размерами и монослойных однородных графеновых пленок [13].

Для исследования свойств выращенных графеновых пленок требуется их перенос на диэлектрические подложки. Существует множество методов переноса графеновых пленок [14], из которых наиболее используем перенос с помощью полиметилметакрилата (ПММА) [15]. Также для переноса пленок хорошо зарекомендовал себя метод ламинирования [16], который позволяет переносить графеновые пленки большой площади на прозрачные и гибкие полимерные подложки. Графеновые пленки прозрачны и могут быть согнуты и растянуты без потери электрических свойств. Ожидается, что прозрачные электроды станут первой областью применения графена, где он заменит оксиды индия и олова, которые часто используются для создания прозрачных электродов в плоских дисплеях, сенсорных экранов и солнечных батарей [17]. При этом оксид индия-олова отличается хрупкостью, а графен является более гибким материалом, и он позволяет получить большую степень прозрачности.

Высокая проводимость и прозрачность делают графен идеальным материалом для создания электродов, который можно применять в нано- и оптоэлектронике. В [18] показана возможность использования трехслойного модифицированного графена в качестве электродов для органических светодиодов, которые не уступали по свойствам оксиду индия-олова (ITO). В [19] был изготовлен солнечный элемент на основе барьера Шоттки из графена и кремния и была продемонстрирована его эффективность преобразования энергии до 15,8 %. Атомарная толщина графена может использоваться для создания ван-дер-ваальсовых гетероструктур [20], где графен выступает в качестве электрода для двумерных материалов. Комбинируя различные двумерные материалы для формирования ван-дер-ваальсовых гетероструктур, можно преодолеть недостатки отдельных материалов. Такие структуры обладают беспрецедентными и захватывающими свойствами, возникающими в результате взаимодействия между атомарными слоями различных двумерных материалов, которые могут обеспечить превосходную чувствительность, более вы-

сокую селективность и стабильность при использовании.

Проводимость графеновых пленок, которая чувствительна к молекулам воды, адсорбированным на их поверхностях [3], может использоваться при изготовлении малоинерционных сенсоров влажности с высокой температурной стабильностью. В [21] была продемонстрирована чувствительность электропроводности графеновых CVD-пленок к влажности окружающей среды. Сенсоры влажности на основе графена обладают высокой чувствительностью с пределом обнаружения всего 1 ppm (миллионная доля) и быстрым откликом [22]. Графен демонстрирует большой потенциал для применения в качестве сенсоров влажности на жестких и гибких подложках [23].

В данной работе методом CVD синтезированы графеновые пленки на медной фольге. Проведены переносы графеновых пленок на разные диэлектрические подложки. На основе синтезированных графеновых пленок созданы емкостной сенсор касания, прозрачный проводящий сенсорный экран для простейшего калькулятора, прозрачный электрод для гетероструктуры MoS_2/Si , графеновый сенсор влажности.

Материалы и методы исследования

Синтез графеновых пленок методом CVD.

В данной работе графеновые пленки были синтезированы методом химического газофазного осаждения в трубчатой печи Nabertherm 80/750/11 при температуре синтеза $\sim 1050^\circ\text{C}$. В качестве катализирующей металлической подложки использована медная фольга особой чистоты фирмы Alfa Aesar (толщина 25 мкм, содержание меди 99,999 %). В качестве источника углерода использовался газообразный метан с чистотой 99,99 %. Для выравнивания рельефа поверхности медной фольги использована электрохимическая полировка. Медная фольга погружалась в раствор составом 200 мл воды и 0,5 г персульфата натрия и подавалось постоянное напряжение 12 В. Фольга была катодом, проволока Pt-Ir – анодом, время обработки составляло 2–10 мин в зависимости от размера медной фольги. После полировки фольга сушилась в потоке азота. На рис. 1 показан вид поверхности медной фольги до и после электрохимической полировки. Подготовленная медная фольга помещалась на кварцевой лодочке в центральную часть кварцевой трубы печи Nabertherm 80/750/11.

Процесс осаждения графена включал в себя следующие стадии: откачка камеры печи форвакуумным насосом минут 20, заполнение трубы смесью газов $\text{Ar}+\text{H}_2$ (90,37:9,63 %) до атмосферного давления, нагрев печи до 1050 °С за 3 ч 30 мин, отжиг медной фольги 30 мин в потоке $\text{Ar}+\text{H}_2$ 100 см³/мин, подача метана и осаждение углерода на медной фольге 10–20 мин, охлаждение до комнатной температуры в течение 16–18 ч.

Методы переноса выращенных графеновых пленок. Для создания сенсорной панели использован способ переноса графеновых пленок с помощью ламинатора. Суть метода заключается в том, что на входе ламинатора между бумагой и полимерной пленкой помещается медная фольга с выращенной графеновой пленкой. Давление между валиками и температура валиков ламинатора способствуют приклеиванию полимерной пленки к медной фольге с графеновой пленкой. Из полученной структуры «полимер–графеновая пленка–медная фольга» вырезается образец нужной формы и размеров, медь вытравливается, затем графеновая пленка, лежащая на полимере, промывается и сушится.

Для создания прозрачных графеновых электродов использован перенос с использованием ПММА. Перенос включал в себя создание тонкой пленки ПММА с помощью центрифугирования, с последующей сушкой при температуре 150 °С в течение 5 мин. Процесс травления меди произведен с применением раствора 1М раствора персульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ на протяжении нескольких часов при комнатной температуре. После переноса пленка ПММА растворялась в ацетоне.

Создание сенсора влажности на основе графеновых пленок. Структуры сенсоров влажности были созданы следующими способами. Для графеновых пленок использовались два типа подложек: первая – SiO_2/Si , а вторая – эпоксидная пленка на Si-подложке. Расстояние между контактами составляло ~3 мм. Образцы медной фольги с графеновой пленкой были механически пресованы на желаемые подложки. Противоположные края медной фольги были защищены полимерными пленками, эти медные области использовались в сенсорной структуре в качестве электродов для графеновых пленок. Затем центральную часть медной фольги травили в водном растворе FeCl_3 или $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}_2$.

Методы исследования. Для исследования структурных свойств и числа слоев выращенных

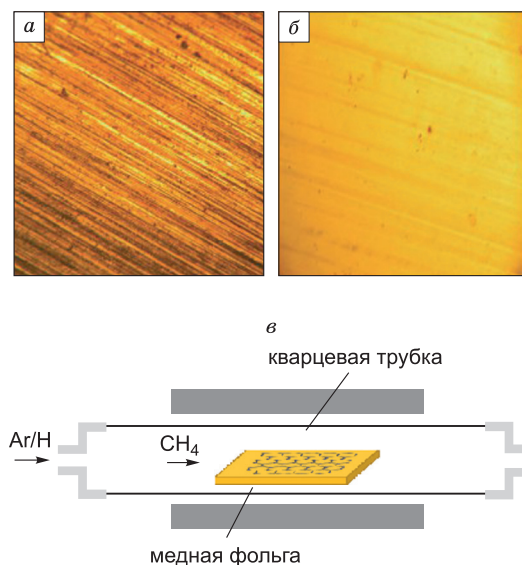


Рис. 1. Медная фольга без полировки (а) и после электрохимической полировки (б) с 50-кратным увеличением. Схематичный вид синтеза графена методом химического осаждения из газовой фазы (в)

Fig. 1. Copper foil without polishing (a) and after electrochemical polishing (b) with 50x magnification. Schematic view of the synthesis of graphene by chemical vapor deposition (c)

графеновых доменов и пленок были сняты спектры комбинационного рассеяния света на установке Интегра Спектра (NT-MDT). Для измерений использовались твердотельный лазер с длиной возбуждающего излучения 532 нм, диаметром пучка менее 1 мм и мощностью около 3,5 мВт и режим с временем накопления сигнала 50 с в каждой точке спектра. С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) на установке JEOL JSM-7800F с энергией первичных электронов 2 кэВ были получены изображения поверхности выращенных пленок при разных увеличениях. Вольт-амперные характеристики образцов были сняты на установке автоматической системы электрофизических измерений (ASEC-03).

Результаты и обсуждение

Для исследования роста графеновых пленок был проведен ряд экспериментов при разных условиях синтеза. Варьировались температура синтеза от 998 до 1050 °С, время осаждения – от 2 до 20 мин, скорость потока метана – от 1–5 см³/мин. При скорости потока метана 2 см³/мин и времени осаждения 10 мин получены гексагональные домены графена на медной фольге размером 5–10 мкм, хорошо различимые с помощью оптического микроскопа (рис. 2, а, б). Осаждение

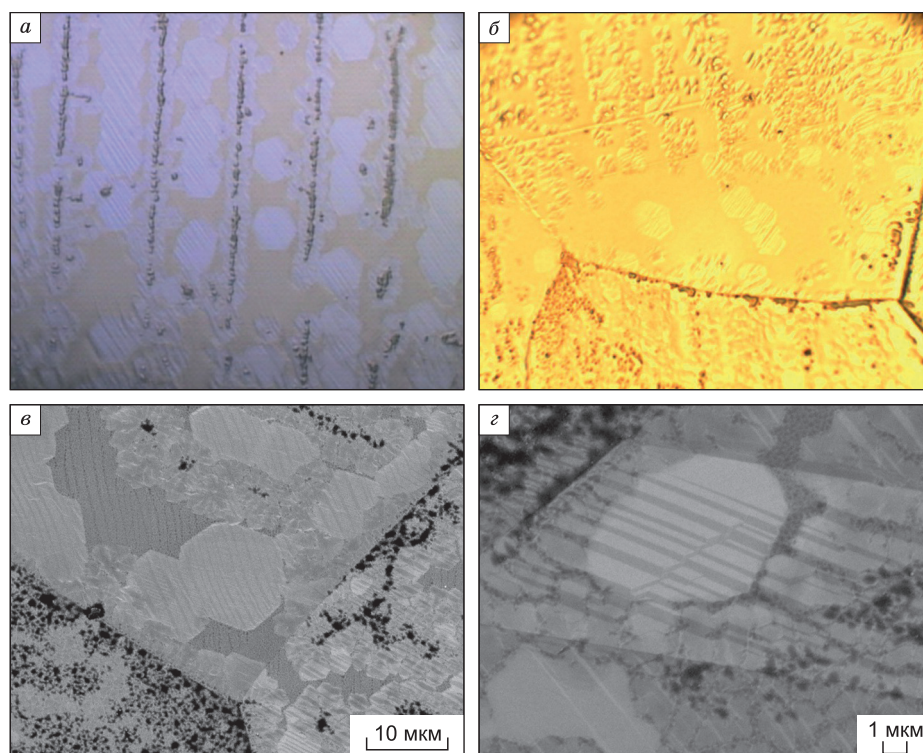


Рис. 2. Отдельные домены графена на поверхности медной фольги, снятые оптическим микроскопом установки «ИнтеграСпектра» (а); домены графена на медной фольге, снятые через оптический микроскоп NikonEclipseLV100D (увеличение 500 раз) (б); домены графена на медной фольге, снятые с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOLJSM-7800F при разных увеличениях (в, з)

Fig. 2. (a) Individual graphene domains on the surface of copper foil, photographed by optical microscopy of the IntegraSpectra installation; (б) Graphene domains on copper foil, photographed through a NikonEclipseLV100D optical microscope (500x magnification); (в, з) Graphene domains on copper foil scanned by JEOLJSM-7800F scanning electron microscope at different magnifications

углерода с концентрацией метана 10 см^3 (поток $1 \text{ см}^3/\text{мин}$ в течение 10 мин) не дало ожидаемого результата в виде одиночных доменов графена.

Из рис. 2, а видно, что домены малых размеров до 5 мкм растут вдоль прокатных полос медной фольги. Рост графеновых доменов начинается на зародышах, в качестве которых выступают разные дефекты и примеси на поверхности медной фольги. В данном случае при недостаточной полировке остаются борозды на поверхности медной фольги, которые становятся центрами роста доменов графена [9]. Между этими полосками четко можно различить отдельно лежащие графеновые гексагональные домены размерами до 10 мкм. На рис 2, б показан рост графеновых доменов на медной фольге, подвергнутой электрополировке. На снимках СЭМ (рис. 2, в, з) при разных увеличениях видны гексагональные домены, которые, в зависимости от ориентации зерен медной фольги, вырастают в крупные домены графена, тогда как в других растут мелкие.

Концентрация метана при синтезе 50 см^3 (поток $5 \text{ см}^3/\text{мин}$ в течение 10 мин) позволила получить сплошную пленку. Как показали результаты экспериментов, достаточно однородные графеновые пленки получаются при температурах, близких к температуре плавления меди $\sim 1050^\circ\text{C}$. На рис. 3 показаны поверхности медной фольги со сплошными графеновыми пленками. Прозрачная тонкая графеновая пленка, лежащая сплошным слоем на меди, в оптическом микроскопе не видна (см. рис 3, а, б). При температурах синтеза $\sim 1050^\circ\text{C}$ на медной подложке появилась сетчатая структура, состоящая из разных зерен с размерами $\sim 100 \text{ мкм}$ (см. рис. 3, а, б). Появление этих зерен показывает поликристалличность медной фольги, состоящей из разных областей с различной ориентацией.

С помощью сканирующего электронного микроскопа получены изображения поверхности медной фольги, на котором была выращена графеновая пленка (см. рис. 3, в, з). На этих рисун-

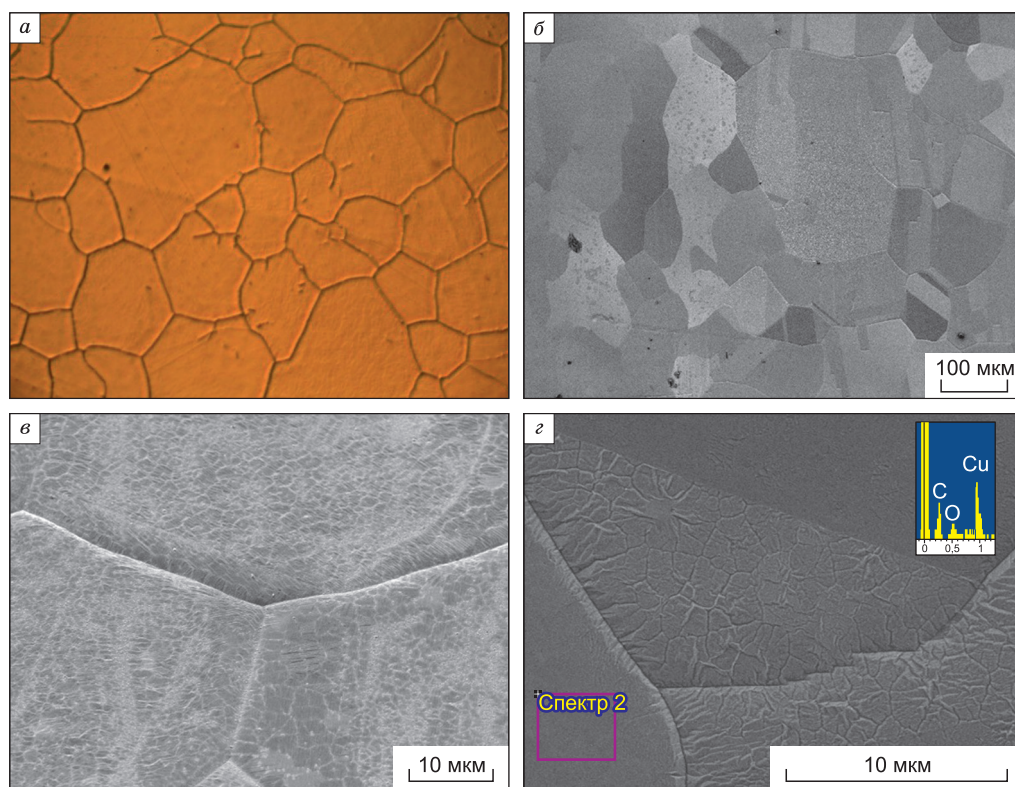


Рис. 3. Прозрачные графеновые пленки, лежащие на зернистой поверхности медной фольги, полученные на оптическом (а) и сканирующем электронном (б–г) микроскопах

Fig. 3. Transparent graphene films lying on the granular surface of copper foil, obtained using optical (a) and scanning electron (б–г) microscopes

ках видны морфология поверхности медной подложки и границы раздела зерен меди. На врезке рис. 3, г представлены результаты элементного анализа области пленки, обозначенной розовым прямоугольником. Морщины на поверхности меди, вероятно, относятся к графеновой пленке.

Были сняты спектры комбинационного рассеяния света (КРС) для графеновой пленки, лежащей на медной подложке (черная кривая) и перенесенной на поверхность SiO_2/Si (красная кривая) (рис. 4). Обнаружены два пика: пик G (1580 см^{-1}), соответствующий режиму первого порядка комбинационного рассеяния в точке Г зоны Бриллюэна, пик 2D (2703 см^{-1}), принадлежащий режиму второго порядка комбинационного рассеяния вблизи точки К зоны Бриллюэна.

Количество слоев в выращенных графеновых пленках было оценено с помощью соотношения интенсивностей пиков G и 2D на спектрах КРС. Как показали измерения КРС, графеновые пленки, синтезированные CVD, получают сплошными и с разными толщинами. Имеются участки с однослойным, двухслойным графеном, а также

имеются многослойные участки пленок графена, достигающие до пяти слоев.

Графеновый емкостной сенсор касания. Были синтезированы сплошные графеновые пленки с большими площадями $50\text{--}100\text{ см}^2$, пригодные для изготовления прозрачных проводящих сенсорных экранов. При создании гибкой прозрачной проводящей сенсорной панели для переноса графеновой пленки от медной фольги на гибкую подложку был использован метод ламинирования.

На основе перенесенной пленки был создан трехкнопочный лабораторный экспонат (рис. 5, слева), демонстрирующий электропроводность графеновой пленки путем загорания светодиода. В этом устройстве графеновая пленка выступала в качестве емкостного сенсора касания. Сделан демонстрационный образец графенового сенсорного экрана (рис. 5, справа) для простейшего калькулятора.

Прозрачный графеновый электрод для гетероструктуры MoS_2/Si . Высокая электропроводность графеновых пленок в сочетании с малой толщиной и прозрачностью делает их идеальным

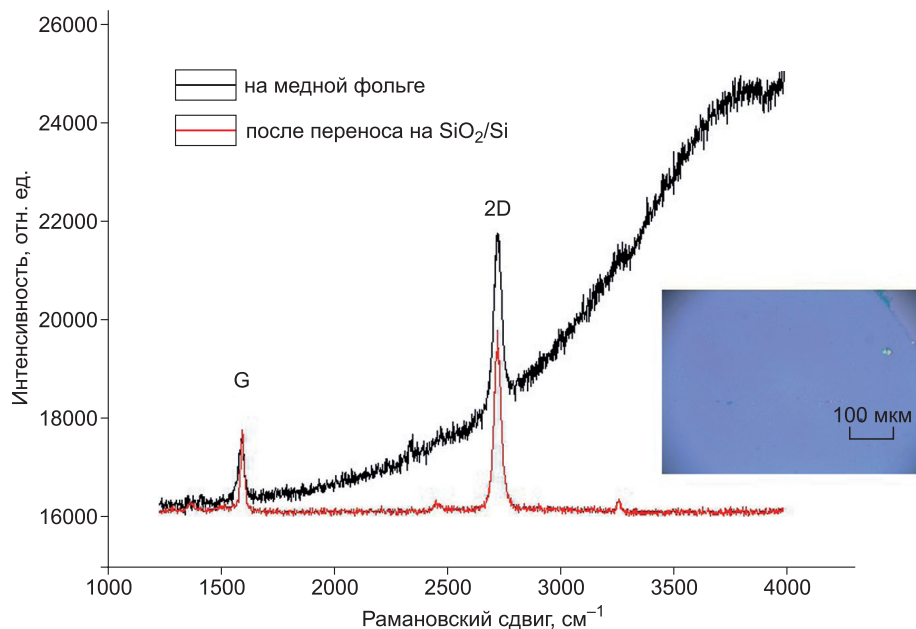


Рис. 4. Спектры КРС графеновых пленок до и после переноса

Fig. 4. Raman spectra of graphene films before and after transfer on substrate

двухмерным электродом для нанoeлектронных приборов. Вертикальная поэтапная укладка разных двухмерных материалов друг на друга дает возможность создания ван-дер-ваальсовых гетероструктур, которые могут обеспечивать новые электронные свойства в таких структурах. В последнее время большой интерес представляет создание гетероструктур графен/дисульфид молибдена. В этой работе создана гетероструктура, где графеновая пленка выполняла роль прозрачного электрода для фоточувствительной пленки дисульфида молибдена. На структуру MoS_2/Si с использованием полиметил метакрилата была перенесена графеновая пленка. Схематический вид такой структуры представлен на рис. 6, а. Для снятия электрических характеристик на графен

были посажены контакты из серебряной пасты, а для создания омического нижнего контакта к кремниевой подложке была нанесена InGa паста. На рис. 6, б представлены вольт-амперные характеристики данной структуры, снятые в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого азота.

Как видно из рис. 6, б, вольт-амперные характеристики практически линейны до 7 В. В интервале приложенных напряжений 7–10 В наблюдается нелинейная характеристика, которая может быть вызвана процессами, происходящими на границах раздела структуры. Полученная структура графен/ MoS_2/Si является солнечным элементом, генерирующим напряжение 0,48 В при площади 40 мм^2 .

Резистивный сенсор влажности на основе графеновой пленки. Графеновые пленки чувствительны к влажности окружающей среды и применимы для создания резистивных сенсоров влажности. В данной работе структуры датчиков были созданы следующими способами. Для графеновых пленок использовались два типа подложек: первая – 300 нм SiO_2/Si , а вторая – эпоксидная пленка на Si-подложке. Образцы медной фольги с графеновой пленкой механически прессуют на желаемую подложку. Противоположные края медной фольги были защищены полимерными пленками, эти медные области использовались в сенсорной структуре в качестве электродов для

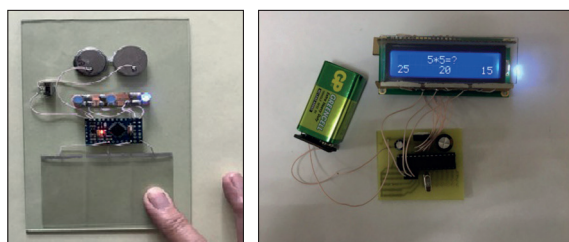


Рис. 5. Трехкнопочный лабораторный экспонат (слева) и графеновый сенсорный экран для простейшего калькулятора (справа).

Fig. 5. Three-button laboratory touch sensor (left) and graphene touch screen for a simple calculator (right).

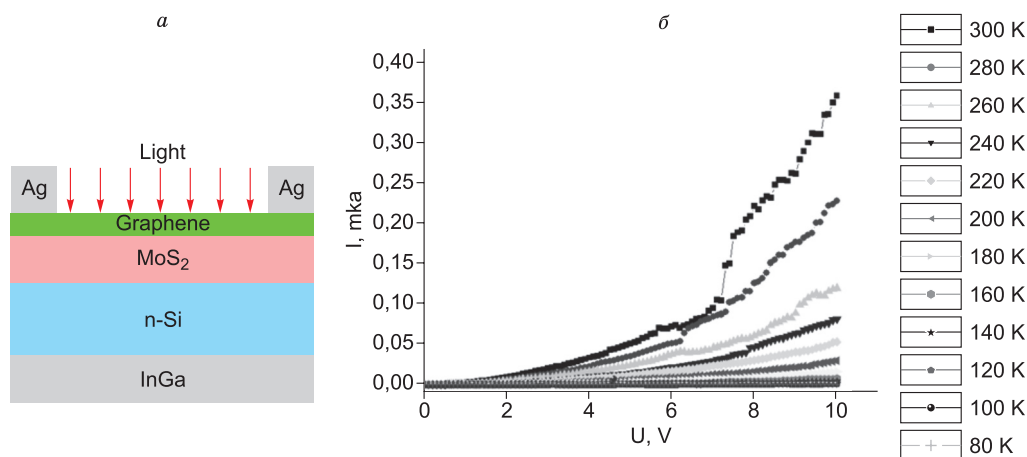


Рис. 6. Схематическое изображение структуры на основе MoS₂ и графена (а) и вольт-амперная характеристика структуры MoS₂/Графен, снятая при разных температурах (б)

Fig. 6. а) Schematic illustration of the structure based on MoS₂ and graphene. б) Current-voltage characteristics of the MoS₂/Graphene structure taken at different temperatures

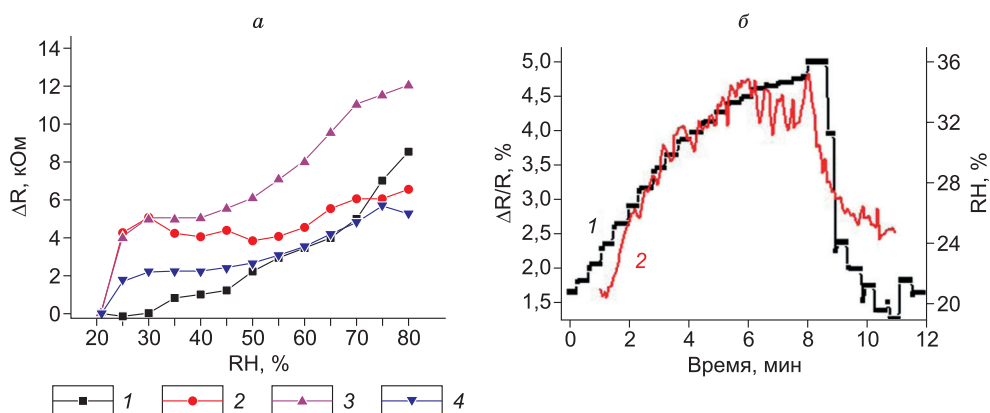


Рис. 7. Отклики ($\Delta R = R - R_0$) нескольких сенсоров с различными значениями R_0 : 1 – 86 кОм / □, 2 – 71 кОм / □, 3 – 47 кОм / □, 4 – 34 кОм / □. Приложенное напряжение – 5 В (а). Относительный отклик испытуемого сенсора на подложке SiO₂ / Si (линия 1) и промышленного датчика HIN4000 (линия 2) (б). Начальное сопротивление R_0 для графенового сенсора при относительной влажности 15 % составляло около 1,3 кОм

Fig. 7. а) Responses ($\Delta R = R - R_0$) of several sensors with different R_0 values: 1 – 86 kOhm / □, 2 – 71 kOhm / □, 3 – 47 kOhm / □, 4 – 34 kOhm / □. Applied voltage – 5 V. б) Relative response of the tested sensor on the SiO₂ / Si substrate (line 1) and the industrial sensor HIN4000 (line 2). The initial resistance R_0 for the graphene sensor at 15% relative humidity was about 1.3 kOhm

графеновых пленок. Затем центральную часть медной фольги травили в водном растворе FeCl₃ или HCl + H₂O₂. Влияние раствора (FeCl₃ или HCl + H₂O₂), используемого для травления, не обнаружено.

Испытания сенсорных структур проводились при температуре + 25 °С в камере (объем 2 дм³) с испарителем дистиллированной воды. В этой камере промышленный датчик HIN4000 размещался параллельно тестируемому датчику МСГ, и сигналы от обоих датчиков регистрировались

каждые 10 с. Результаты измерений для набора сенсоров влажности показаны на рис. 7. Отклик датчика $\Delta R = R - R_0$ положителен и увеличивается с увеличением влажности для структур графеновых пленок на эпоксидной смоле с начальным сопротивлением от нескольких десятков до нескольких сотен Ом (см. рис. 7). Увеличение влажности также приводит к увеличению сопротивления промышленного датчика HIN4000, и этот отклик похож на отклик графенового сенсора. Этот результат был получен для сенсора с со-

противлением 1,3 кОм при относительной влажности 25 %.

Чувствительность графенового сенсора влажности не зависит от исходного сопротивления пленки непосредственно, но определяется структурой пленки (набором дефектов, их плотностью и распределением).

Изучение и сравнение откликов сенсоров влажности на основе графена в зависимости от структуры пленки позволило предложить качественную модель изменения проводимости при адсорбции воды. Найдено, что увеличение, уменьшение и немонотонное поведение сопротивления возможны в зависимости от графеновых структур. Обнаружено, что уменьшение концентрации носителей в областях границы зерен из-за адсорбции молекулы воды приводит к увеличению удельного сопротивления пленки. Другой тип проводящих центров с более высоким сечением захвата реализуется в случае адсорбции молекул воды на краевых дефектах в графеновых пленках (образование проводящих цепей с ионной проводимостью на H_3O^+). Если эти цепи образуют перколяционную сеть, удельное сопротивление пленки уменьшается. Предполагается, что сечение захвата краевых дефектов для воды выше, чем у дефектов на границах домена. Результат конкуренции между противоположными эффектами воды зависит от структуры пленки и определяет отклик датчика влажности. Обнаружено, что чувствительность датчика увеличивается с увеличением плотности краевых дефектов. Поэтому, создавая слои с преобладанием определенного типа дефектов, можно контролировать знак чувствительности датчика и величину.

Заключение

Проведен синтез графеновых пленок методом CVD путем разложения метана при 1050 °C на медных подложках. Получены сплошные графеновые пленки с размерами до 100 см² и с толщинами, варьирующими от 1 до 5 нм. На основе полученных графеновых пленок созданы емкостной сенсор касания и сенсорный экран для простейшего калькулятора. Показана возможность создания прозрачных электродов для вертикальных гетероструктур. Созданы графеновые сенсоры влажности, которые имеют высокую чувствительность к молекулам воды. Обнаружено, что характер изменения сопротивления пленки при изменении влажности зависит от структуры пленки.

Список литературы / References

1. Gayduchenko I., Xu S.G., Alymov G., et al. Tunnel field-effect transistors for sensitive terahertz detection. *Nature communications*. 2021;12(1):543. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20721-z>
2. Xu Y., Liu J. Graphene as transparent electrodes: fabrication and new emerging applications. *Small*. 2016; 12(11):1400–1419. <https://doi.org/10.1002/sml.201502988>
3. Melios C., Giusca C.E., Panchal V., et al. Water on graphene: review of recent progress. *2D Materials*. 2018; 5(2):022001. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/aa9ea9>
4. Zhuo C., Wang J., Wang Y. Strategies for the performance enhancement of graphene-based gas sensors: A review. *Talanta*. 2021;235:122745. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2021.122745>
5. Kairi M.I., Khavarian M., Bakar S.A., et al. Recent trends in graphene materials synthesized by CVD with various carbon precursors. *Journal of Materials Science*. 2018;53(2):851–879. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1694-1>
6. Edwards R.S., Coleman K.S. Graphene film growth on polycrystalline metals. *Accounts of chemical research*. 2013;46(1):23–30. <https://doi.org/10.1021/ar3001266>
7. Arkhipov V.E., Gusel'nikov A.V., Popov K.M., et al. Optimization of parameters of graphene synthesis on copper foil at low methan pressure. *Journal of Structural Chemistry*. 2018;59:759–765. <https://doi.org/10.1134/S0022476618040029>
8. Liu F., Li P., An H., et al. Achievements and challenges of graphene chemical vapor deposition growth. *Advanced Functional Materials*. 2022;32(42):2203191. <https://doi.org/10.1002/adfm.202203191>
9. Yan Z., Lin J., Peng Z., et al. Toward the synthesis of wafer-scale single-crystal graphene on copper foils. *ACS nano*. 2012;6(10):9110–9117. <https://doi.org/10.1021/nn303352k>
10. Jiang B., Pan M., Wang C., et al. Morphology engineering and etching of graphene domain by low-pressure chemical vapor deposition. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2019;23(2):162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2018.06.001>
11. Murdock A.T., Koos A., Britton T.B., et al. Controlling the orientation, edge geometry, and thickness of chemical vapor deposition graphene. *Acs Nano*. 2013;7(2):1351–1359. <https://doi.org/10.1021/nn3049297>
12. Jacobberger R.M., Arnold M.S. Graphene growth dynamics on epitaxial copper thin films. *Chemistry of Materials*. 2013;25(6):871–877. <https://doi.org/10.1021/cm303445s>
13. Deng B., Liu Z., Peng H. Toward mass production of CVD graphene films. *Advanced Materials*. 2019;31(9):1800996. <https://doi.org/10.1002/adma.201800996>
14. Ullah S., Yang X., Ta H.Q., et al. Graphene transfer methods: A review. *Nano Research*. 2021;14:3756–3772. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3345-8>

15. Song Y., Zou W., Lu Q., et al. Graphene transfer: Paving the road for applications of chemical vapor deposition graphene. *Small*. 2021;17(48):e2007600. <https://doi.org/10.1002/sml.202007600>
16. Hong N., Kireev D., Zhao Q., et al. Roll-to-Roll Dry Transfer of Large-Scale Graphene. *Advanced Materials*. 2022;34(3):e2106615. <https://doi.org/10.1002/adma.202106615>
17. Suriani A.B., et al. Synthesis, transfer and application of graphene as a transparent conductive film: a review. *Bulletin of Materials Science*. 2020;43:310. <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02270-9>
18. Xu Y., Yu H., Wang C., et al. Multilayer graphene with chemical modification as transparent conducting electrodes in organic light-emitting diode. *Nanoscale research letters*. 2017;12(1):254. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2009-9>
19. Kong X., Zhang L., Liu B., et al. Graphene/Si Schottky solar cells: a review of recent advances and prospects. *Royal Society of Chemistry Advances*. 2019; 9(2):863–877. <https://doi.org/10.1039/C8RA08035F>
20. Das S., Pandey D., Thomas J., Roy T. The role of graphene and other 2D materials in solar photovoltaics. *Advanced Materials*. 2019;31(1):e1802722. <https://doi.org/10.1002/adma.201802722>
21. Smith A.D., Elgammal K., Niklaus F., et al. Resistive graphene humidity sensors with rapid and direct electrical readout. *Nanoscale*. 2015;7(45):19099–19109. <https://doi.org/10.1039/C5NR06038A>
22. Lv C., Hu C., Luo J., et al. Recent advances in graphene-based humidity sensors. *Nanomaterials (Basel)*. 2019;9(3):422. <https://doi.org/10.3390/nano9030422>
23. Liang R., Luo A., Zhang Z., et al. Research progress of graphene-based flexible humidity sensor. *Sensors (Basel)*. 2020;20(19):5601. <https://doi.org/10.3390/s20195601>
24. Cui N., Wang F., Ding H. Acetic acid and ammonium persulfate pre-treated copper foil for the improvement of graphene quality, sensitivity and specificity of hall effect label-free DNA hybridization detection. *Materials (Basel)*. 2020;13(7):1784. <https://doi.org/10.3390/ma13071784>

Об авторах

ВИНОКУРОВ Павел Васильевич, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2004-6631>, ResearcherID: A-3178-2014, Scopus Author ID: 54882166900, SPIN: 5693-0523, e-mail: vinokurov@s-vfu.ru

ПОПОВ Василий Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ResearcherID: A-3952-2014/I-8394-2018, Scopus Author ID: 7404534475, SPIN: 7394-6560, e-mail: volts@mail.ru

НИКОЛАЕВ Данил Валериевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5741-8836>, ResearcherID: A-3208-2014, Scopus Author ID: 7004854124, SPIN: 9761-2897, e-mail: dv.nikolaev@s-vfu.ru

СМАГУЛОВА Светлана Афанасьевна, кандидат физико-математических наук, заведующая лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-3640-5566>, ResearcherID: A-3124-2014, Scopus Author ID: 6603018993, SPIN: 1622-1656, e-mail: smagulova@mail.ru

About the authors

VINOKUROV, Pavel Vasilyevich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2004-6631>, ResearcherID: A-3178-2014, Scopus Author ID: 54882166900, SPIN: 5693-0523, e-mail: vinokurov@s-vfu.ru

POPOV, Vasily Ivanovich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, ResearcherID: A-3952-2014/I-8394-2018, Scopus Author ID: 7404534475, SPIN: 7394-6560, e-mail: volts@mail.ru

NIKOLAEV, Danil Valerievich, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5741-8836>, ResearcherID: A-3208-2014, Scopus Author ID: 7004854124, SPIN: 9761-2897, e-mail: dv.nikolaev@s-vfu.ru

SMAGULOVA, Svetlana Afanasyevna, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Head of laboratory, <https://orcid.org/0000-0002-3640-5566>, ResearcherID: A-3124-2014, Scopus Author ID: 6603018993, SPIN: 1622-1656, e-mail: smagulova@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 11.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 20.02.2024

Принята к публикации / Accepted 05.03.2024

УДК 678.073

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171>

Оригинальная статья

Исследование влияния технологий получения на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ

П. Н. Петрова, М. А. Маркова[✉], А. Л. Федоров

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

[✉]markovamusya@mail.ru

Аннотация

При разработке полимерных композиционных материалов для значительного повышения механических, триботехнических и других свойств, кроме подбора природы и количества наполнителя, важны технологические способы введения наполнителей в структуру базового полимера. В работе методом растровой электронной микроскопии изучены процессы структурообразования полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и дискретных гидратцеллюлозных углеродных волокон в зависимости от технологии получения. Рассмотрены такие технологические приемы, как совместная механоактивация компонентов и пропускание порошковой смеси через лабораторные вальцы. Для понимания процессов, протекающих при трении разработанных ПКМ, проведены исследования поверхности до и после трения методом инфракрасной спектроскопии. Установлено, что в процессе трения в зависимости от режима последнего происходит изменение спиральной конформации макромолекул ПТФЭ. Показано, что повышение скорости скольжения и нагрузки при трении ПКМ приводит к изменению спиральной конформации макромолекул с переходом с 13_6 к более стабильной конформации 15_7 . На основании проведенных исследований установлено, что комбинации технологий совместной механоактивации компонентов и вальцевания порошковой смеси являются технологическими приемами, которые позволяют повысить структурную активность дискретных УВ и интенсифицировать адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз полимер–наполнитель, что приводит к повышению износостойкости и сопротивляемости композитов к ползучести. Разработанные технологические подходы можно использовать при получении фторкомпозитов, содержащих не только углеродное, но и другие виды волокон.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные волокна, растровая электронная микроскопия, инфракрасная микроскопия, триботехнические характеристики

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ «ЯНЦ СО РАН».

Для цитирования: Петрова П.Н., Маркова М.А., Федоров А.Л. Исследование влияния технологий получения на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024; 29(1):162–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171>

Original article

Effect of production technologies on the properties and structure of PTFE-based composites

Pavlina N. Petrova, Marfa A. Markova[✉], Andrey L. Fedorov

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

[✉]markovamusya@mail.ru

Abstract

In the development of polymer composite materials, it is crucial to use various technological methods for introducing fillers into the structure of the base polymer, by different activation technologies of energy exposure. In this study, the processes of structure formation of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and discrete hy-

drate cellulose carbon fibers, depending on the production technology, were investigated by scanning electron microscopy. We considered joint mechanical activation of components and passing the powder mixture through laboratory rollers. To understand the processes occurring in the friction process of the developed PCM, surface studies before and after friction by infrared spectroscopy were carried out. We found that during the friction process, depending on the friction mode, the spiral conformation of the PTFE macromolecules changes. An increase in the sliding velocity and the load during PCM friction leads to a change in the spiral conformation of macromolecules with a transition from 13_6 to a more stable conformation 15_7 . We also found that the combination of technologies for joint mechanical activation of components and rolling of a powder mixture are technological techniques that can increase the structural activity of discrete hydrocarbons and intensify the adhesive interaction at the polymer-filler phase interface, which leads to an increase in the resistance of composites to creep and wear. The developed technological approaches can be used in the production of fluorocomposites containing not only carbon but also other types of fibers.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fibers, scanning electron microscopy, infrared microscopy, tribotechnical characteristics

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No. 122011100162-9), using the equipment provided by Core Shared Research Facilities (SCRF) of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre SB RAS”.

For citation: Petrova P.N., Markova M.A., Fedorov A.L. Effect of production technologies on the properties and structure of PTFE-based composites. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(1):162–171. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-162-171>

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко используют в машиностроении в качестве уплотнительных деталей в герметичных системах и в качестве подшипников из-за возможности их применения в парах трения, работающих без смазки. К числу таких полимеров относится политетрафторэтилен (ПТФЭ), он обладает рядом таких преимуществ, как химическая стойкость, широкий рабочий температурный интервал и низкий коэффициент трения. Однако ПТФЭ в ненаполненном виде при низком коэффициенте трения демонстрирует сверхнизкую износостойкость, также характеризуется высокой ползучестью (хладотекучестью) под воздействием нагрузки при невысоких температурах. Высокая ползучесть связана с развитием необратимой пластической деформации при малых нагрузках, существенно меньше разрывных, и при температурах ниже температуры перехода в стеклообразное состояние. Так, при комнатной температуре и нагрузке в 10 МПа, что в 2–3 раза ниже разрывной прочности ПТФЭ, за 100 ч развивается его необратимая деформация (более 200 %) [1]. Эти существенные недостатки приводят к необходимости частого ремонта узлов трения и уплотнений, где применяют ПТФЭ.

В настоящее время существует множество способов модифицирования полимерных материалов на основе ПТФЭ, позволяющих повысить сопротивление к ползучести, прочность и

износостойкость. В работах [2–4] используют высокопрочные волокнистые материалы в качестве наполнителя при создании высокопрочных и износостойких композиций на основе ПТФЭ. Из всех волокнистых материалов наиболее широко в качестве модификаторов полимеров, особенно ПТФЭ, используются углеродные волокна, так как они занимают особое положение среди термостойких волокон сочетанием высокой термостойкости, прочности и модуля упругости с низкой плотностью [5]. Однако использование наполнителей в качестве модификаторов не гарантирует получения высокопрочных, износостойких, а также обладающих высокой сопротивляемостью к различным деформациям композитов. В связи с этим во многих исследованиях применяют различные технологические приемы, повышающие качество распределения наполнителя в полимерной матрице и адгезионное взаимодействие в системе полимер – наполнитель. Особое внимание уделяют применению механической активации компонентов ПКМ. Несмотря на большое количество работ по исследованию влияния механической активации компонентов на триботехнические свойства ПТФЭ, изучению влияния комбинированных технологических приемов, которые включают в себя два вида активации, уделено недостаточно внимания.

Целью данной работы является исследование влияния технологии получения ПКМ на формирование структуры и сопротивление материалов к деформациям растяжения под нагрузкой.

Объекты исследования

В качестве полимерной матрицы выбран политетрафторэтилен марки ПН (ГОСТ 10007-80). В качестве наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки УВИС-АК-П на основе гидратцеллюлозных углеродных волокон производства ООО НПЦ «УВИКОМ» (Россия).

На данном этапе выполнения работы продолжены исследования влияния двух технологий получения полимерных композитов на основе ПТФЭ на формирование структуры, физико-механические и триботехнические характеристики при различных режимах трения. Используемые технологии получения ПКМ:

1. Смешение наполнителя с $\frac{1}{2}$ частью полимера с использованием технологии совместной механической активации в планетарной мельнице с последующим смешением активированной композиции с остальной частью полимера (технология № 1).

2. Первая стадия по технологии 1 с последующим пропусканием композиции через вальцы (технология № 2).

Обсуждение результатов

На диаграмме (рис. 1) приведены зависимости скорости массового изнашивания и прочности при сжатии в зависимости от технологии получения и состава композитов. Показано, что

использование активированной композиции с последующим пропусканием композиции через вальцы (технология 2) приводит к получению более износостойких композитов по сравнению с композитами, полученными с использованием только механической активации компонентов (технология 1), что, видимо, связано с повышением прочности при сжатии, приводящей к повышению сопротивляемости композитов к деформациям.

В связи с этим проведены триботехнические исследования ПКМ при повышении нагрузки и скорости скольжения стального вала на машине трения ИИ-5018, имитирующей работу подшипников скольжения по схеме трения «диск–диск» в режиме сухого трения, в зависимости от состава композитов, полученных по технологии 2 (см. таблицу).

В таблице показано, что при малых нагрузках износостойкость композита изменяется неоднозначно в зависимости от концентрации наполнителя. Однако при повышении нагрузки трения до 550 Н и скорости скольжения стального вала установлено, что более износостойкими являются ПКМ с содержанием УВ 7 мас. %, полученные с использованием технологии вальцевания порошковой композиции до стадии термообработки. Показано, что при таком содержании УВ при использовании технологии 2 повышается структурная активность частиц УВ в процессе

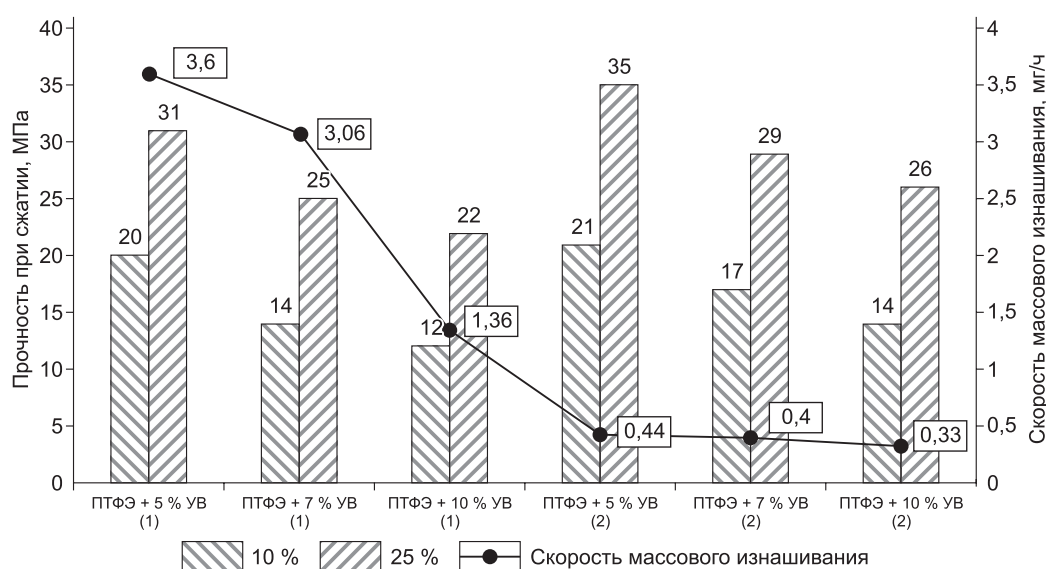


Рис. 1. Зависимость скорости массового изнашивания и прочности при сжатии ПКМ от содержания УВ и технологии получения. Условия трения: 260 Н, скорость скольжения 0,2 м/с

Fig. 1. Dependence of the mass wear rate and compressive strength of the PCM on the content of HC and the production technology. Friction conditions: 260 N, sliding speed 0.2 m/s

**Зависимость триботехнических показателей ПКМ ПТФЭ-УВ
от технологии получения и режима трения**

**Dependence of tribotechnical indicators of PTFE-UV PCM
on the technology of production and friction mode**

№	Фактор		I, мг/ч	f	I, мг/ч	f	I, мг/ч	f	I, мг/ч	f
	F, Н	V, м/с	+5 мас. % УВ		+5 мас. % УВ		+7 мас. % УВ		+10 мас. % УВ	
			Технология 1		Технология 2		Технология 2		Технология 2	
1	160	0,2	0,44	0,21	0,40	0,19	0,10	0,20	0,52	0,21
2	550	0,2	5,20	0,14	3,60	0,15	2,23	0,11	4,66	0,14
3	160	0,5	1,20	0,22	1,83	0,20	6,30	0,18	4,30	0,19
4	550	0,5	9,30	0,17	12,16	0,16	4,83	0,17	11,16	0,18

Примечание. I – скорость массового изнашивания, мг/ч.

Note. I – mass wear rate, mg/h.

взаимодействия с матричным ПТФЭ и формируется армированная структура, которая в процессе нагружения обеспечивает больше препятствий для развития трещин, нарушающих монолитность и целостность полимерного композита.

Ранее [6] установлено, что композит ПТФЭ + + 5 мас. % УВ, полученный по технологии 2, характеризуется повышенной сопротивляемостью к ползучести по сравнению с композитами того же состава, полученными с использованием технологии совместной механоактивации компонентов (технология 1). В связи с этим проведены исследования изменения сопротивления к деформациям под нагрузкой и модуля ползучести ПКМ, полученных с использованием технологии 2, в зависимости от напряжения и концентрации УВ (рис. 2), так как важнейшая особенность всех без исключения полимерных материалов заключается в том, что под воздействием любой нагрузки в них развиваются упругая и пластическая деформации. Полимерные материалы в процессе трения находятся в условиях длительного дина-

мического напряжения, при этом дополнительно накладывается еще тепловое воздействие, которые интенсифицируют процесс пластической деформации полимерных композитов, приводящей к выходу деталей узлов трения из строя.

Из рис. 2 видно, что повышение содержания углеродных волокон в полимерной матрице до 7–10 мас. % приводит к снижению относительного удлинения при ползучести в 3–22 раза в зависимости от напряжения по сравнению с композитом, содержащим 5 мас. % УВ. Наибольшей сопротивляемостью к деформациям ползучести характеризуется композит с содержанием УВ в количестве 7 мас. % (технология 2). Этот же композит характеризуется оптимальными триботехническими показателями при повышении скорости скольжения и нагрузки при трении. При этом показано (см. рис. 2, б), что модуль ползучести повышается у этого композита до 30 раз по сравнению с ПКМ с 5 мас. % УВ и в 3–4 раза по сравнению с композитом, содержащим 10 мас. % УВ. Композит с содержанием

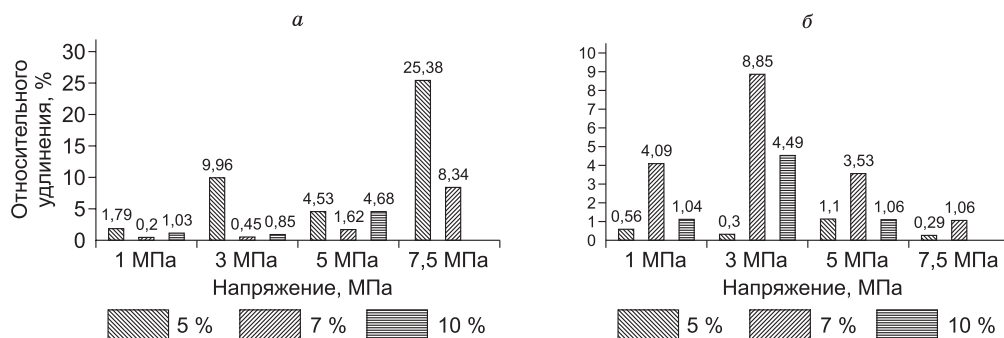


Рис. 2. Зависимость относительного удлинения при ползучести (а), модуля ползучести (б) от напряжения и состава ПКМ

Fig. 2. Dependence of the relative elongation at creep (a), the creep modulus (б) on the voltage and composition of the PCM

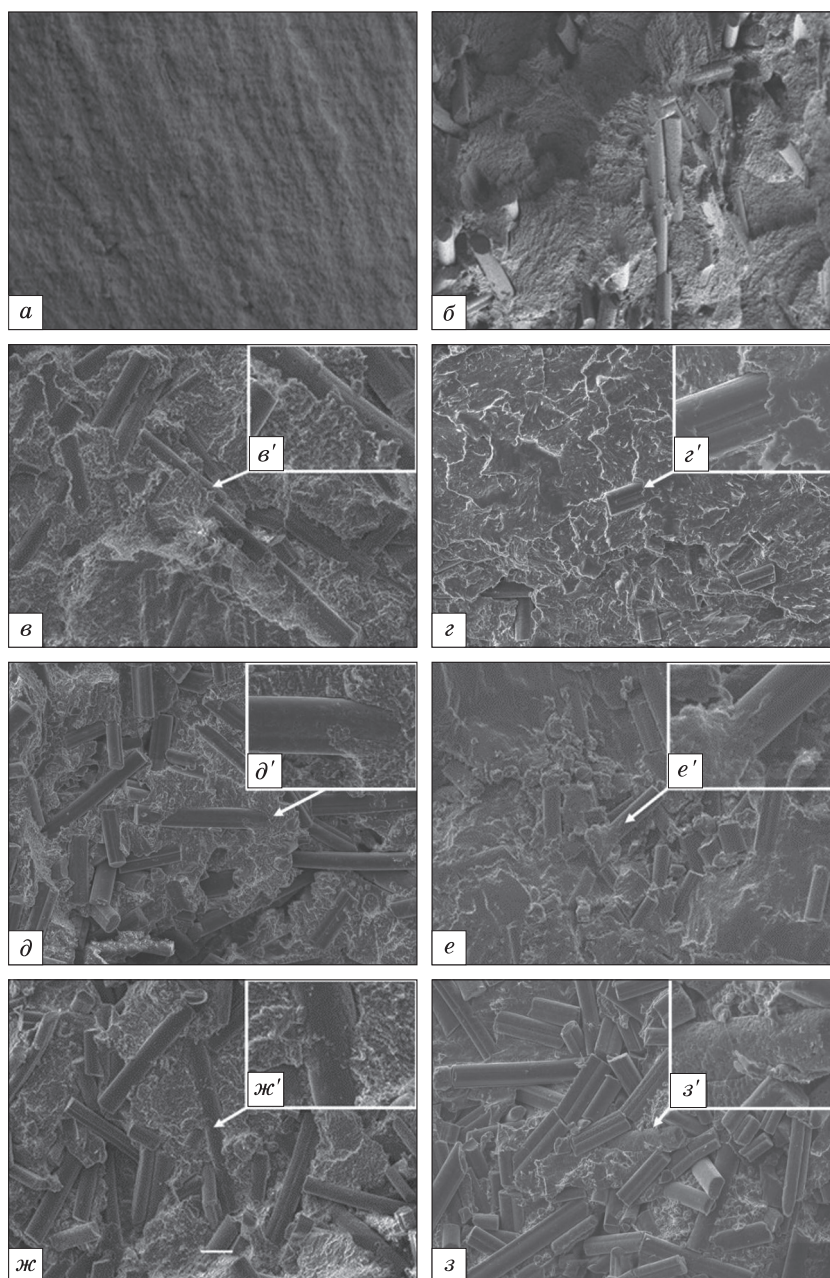


Рис. 3. Надмолекулярная структура ПКМ в зависимости от технологии получения ($\times 1000$ и $\times 7000$): а – ПТФЭ; б – ПТФЭ + 5 мас. % УВ (простое смешение); в – ПТФЭ + 5 мас. % УВ (технология 1); г – ПТФЭ + 5 мас. % УВ (технология 2); д – ПТФЭ + 7 мас. % УВ (технология 1); е – ПТФЭ + 7 мас. % УВ (технология 2); ж – ПТФЭ + 10 мас. % УВ (технология 1); з – ПТФЭ + 10 мас. % УВ (технология 2)

Fig. 3. Supramolecular structure of PCM depending on the production technology ($\times 1000$ and $\times 7000$): а – PTFE; б – PTFE + 5 wt. % HC (simple mixing); в – PTFE + 5 wt. % UV (technology No. 1); г – PTFE + 5 wt. % UV (technology No. 2); д – PTFE + 7 wt. % UV (technology No. 1); е – PTFE + 7 wt. % UV (technology No. 2); ж – PTFE + 10 wt. % UV (technology No. 1); з – PTFE + 10 wt. % UV (technology No. 2)

10 мас.% УВ разрушился преждевременно при повышении напряжения до 7,5 МПа.

С целью выяснения подобного изменения свойств и изучения особенностей процессов структурной модификации ПТФЭ в зависимости от

технологии получения проведено исследование структуры методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) (рис. 3), что позволяет визуально оценить степень плотности, дефектность упаковки в надмолекулярных структурах мате-

риала, а также характер разрушения наполненных полимеров.

При использовании технологии активации компонентов (технология 1) и вальцевания порошковой смеси ПКМ (технология 2) показано, что активированные частицы УВ оказывают значительное влияние на структуру полимерной матрицы и приводят к измельчению структурных элементов матрицы. Исходная структура полимера с протяженными ламеллярными образованиями дробится частицами УВ на более мелкие участки (см. рис. 3, в–з) за счет ее разбиения наполнителем, внедряющимся в полимерную матрицу.

Наблюдается изменение надмолекулярной структуры полимера с образованием дефектных сферолитоподобных структур с центрами кристаллизации на фрагментах поверхности частиц УВ. Наиболее ярко такая картина наблюдается при использовании технологии совместной активации компонентов ПКМ (рис. 3, в–ж). Образование таких структур связано с торможением сегментальной подвижности макроцепей молекул формирующегося межфазного слоя композита за счет усиления адгезионного взаимодействия полимер–УВ. Образование сферолитоподобных структур вблизи и вдоль УВ обусловлено кинетической и структурной активностью активированного наполнителя. Установлено, что отдельные частицы и пучки УВ не только являются центрами структурообразования, но и могут внедряться в кристаллические области матрицы.

Известно, что при низкотемпературном изломе, сколе полимерного образца хрупкая трещина распространяется по границам надмолекулярных образований. При сравнении разных технологий получения композитов ПТФЭ–УВ зарегистрировано, что характер разрушения композитов при получении скола различается. На поверхности скола ПКМ (см. рис. 3, в), полученного по технологии 1, количество УВ в открытом виде намного больше, по сравнению с ПКМ, полученным по технологии 2 (см. рис. 3, з). Большое количество волокон на поверхности скола свидетельствует о разрушении материала в основном по межфазным границам полимер–наполнитель. Однако при этом не наблюдается существенных зазоров между волокнами и матрицей, почти отсутствуют свободные от полимера поверхности большинства волокон, как это зарегистрировано при получении ПКМ простым

смешением (см. рис. 3, б). Это свидетельствует о формировании достаточно прочной связи на границе раздела фаз полимер–УВ при использовании технологии совместной активации компонентов в планетарной мельнице.

При использовании технологии вальцевания разрушение материала с 5 и 7 мас. % УВ идет не только по межфазным границам полимер–наполнитель, но и по полимерной матрице вблизи частицы наполнителя (см. рис. 3, з, е), что свидетельствует о еще большем повышении адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер–наполнитель: частица УВ находится внутри плотно обволакивающей ее полимерной матрицы, структура менее дефектная, пустоты на границе полимер–УВ не наблюдаются. При больших увеличениях видно (см. рис. 3, з', е'), что полимер в контакте с волокном при термообработке частично обволакивает волокна и адсорбируется на его поверхности. При достаточном уровне адгезионного взаимодействия при термообработке материала реализуются условия для проявления структурной активности наполнителя и формируется структура с большей степенью упорядоченности [7–9].

Увеличение концентрации УВ до 10 мас. % приводит к повышению неоднородности элементов структуры (см. рис. 3, ж, з): количество частиц УВ на поверхности скола повышается, свободная поверхность, занятая только частицами УВ, без полимера растет. При большом увеличении можно заметить, что поверхность волокна становится дефектной, в отличие от композитов состава 5 и 7 мас. %. В этом случае можно предположить, что прочность самого УВ снижается, в итоге эти межфазные границы полимер–дефектное волокно и скопления агломератов из УВ являются концентраторами напряжений при деформировании материала, что и приводит к преждевременному разрушению при повышении напряжения до 7,5 МПа при испытаниях на ползучесть.

Для понимания процессов, протекающих в процессе трения разработанных ПКМ, проведены исследования поверхности до и после трения методом инфракрасной спектроскопии на спектрометре Nicolet protege 460 (США). На рис. 4 приведены ИК-спектры поверхностей трения композита, полученного по технологии 2, с содержанием 7 мас. % УВ, в зависимости от нагрузки трения и скорости скольжения стального

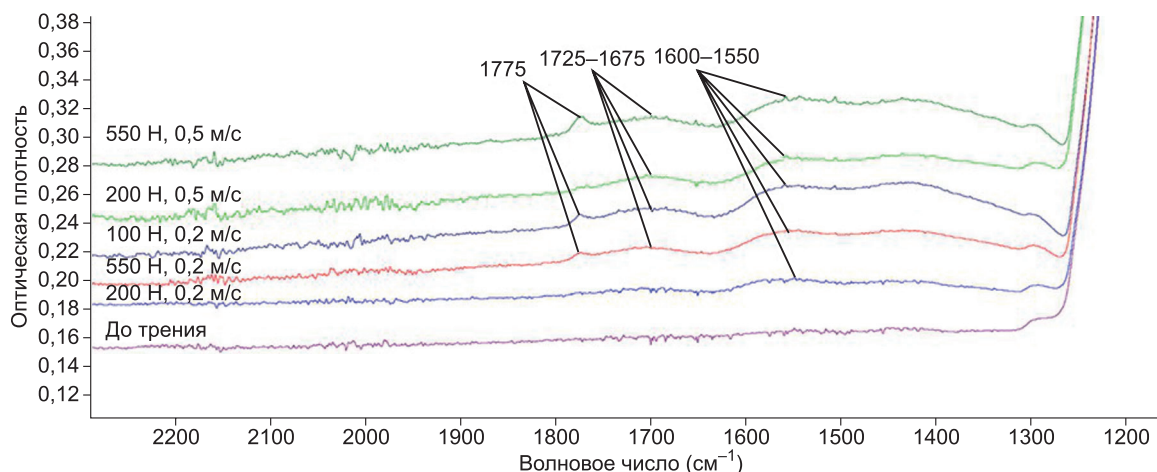


Рис. 4. ИК-спектры ПКМ в зависимости от условий трения

Fig. 4. IR spectra of PCM depending on friction conditions

вала. Видно, что при повышении подаваемой нагрузки и скорости скольжения на композит на ИК-спектрах поверхности трения появляются пики в областях 1600–1550, 1725–1675 и 1775 см^{-1} . Пики в области 1725–1675 и 1775 см^{-1} на ИК-спектрах относятся к концевым группам карбоновых кислот и альдегидным группам. Пики поглощения 1600–1550 см^{-1} характерны для валентных колебаний связи $\text{C}=\text{C}$, сопряженной с карбонильной группой [10, 11], а также соответствуют асимметричным валентным колебаниям карбоксилат-аниона [12], что свидетельствует о наличии на поверхности трения соединений с карбонильной группой и солей карбоновых кислот.

Наличие этих групп указывает на протекание окислительных процессов на поверхности полимерных образцов при трении. В работах авторов [13] описан механизм, который объясняет образование окисленных групп на поверхности трения ПТФЭ-композитов. Согласно этому механизму, на первом этапе процесса происходит механохимическое разрушение связи $\text{C}-\text{C}$ с образованием перфторалкильных радикалов. Далее перфторалкильные радикалы вступают в реакцию с атмосферным кислородом с образованием пероксирадикалов, которые далее разлагаются на более стабильную концевую группу ацилфторида. Концевая группа ацилфторида нестабильна и поэтому гидролизруется с образованием карбоновой кислоты. Карбоновые кислоты способны хелатироваться со стальной поверхностью контртела, что способствует прочному закреплению пленки переноса к стальному контртелу.

Эти процессы способствуют снижению коэффициента трения ПКМ.

Кроме вышеперечисленных изменений на ИК-спектрах ПТФЭ и композита ПТФЭ–7 мас. % УВ (технология 2) наблюдается выраженный дублет при ~640 и 625 см^{-1} (рис. 5), при этом зарегистрировано, что соотношение интенсивностей этих полос различается в зависимости от режимов трения.

Как показано в работе [14], интенсивность полосы 625 см^{-1} увеличивается при нагревании образца, а полосы 640 см^{-1} ослабевает, т. е. зависит от температуры. Наблюдаемый эффект связывают с изменением спиральной конформации макромолекул ПТФЭ. Считается, что полоса при 625 см^{-1} характеризует дефектность структуры, а полоса при 640 см^{-1} отражает наличие регулярной спирали в структуре ПТФЭ. В работе [15] показано, что изменение соотношения интенсивностей в дублете 638–625 см^{-1} не ограничивается температурными диапазонами, характерными для фазовых превращений. Повышение интенсивности поглощения при 625 см^{-1} связывают с переходом от конформации 13_6 , в которой доминируют межмолекулярные взаимодействия, к 15_7 спиральной конформации в ПТФЭ, в которой преобладают внутримолекулярные взаимодействия. Конформация 13_6 стабилизирована межмолекулярными взаимодействиями, в то время как конформация 15_7 является истинно стабильной с точки зрения конформации. На основании вышеизложенного можно предположить, что в процессе трения в зависимости от режима

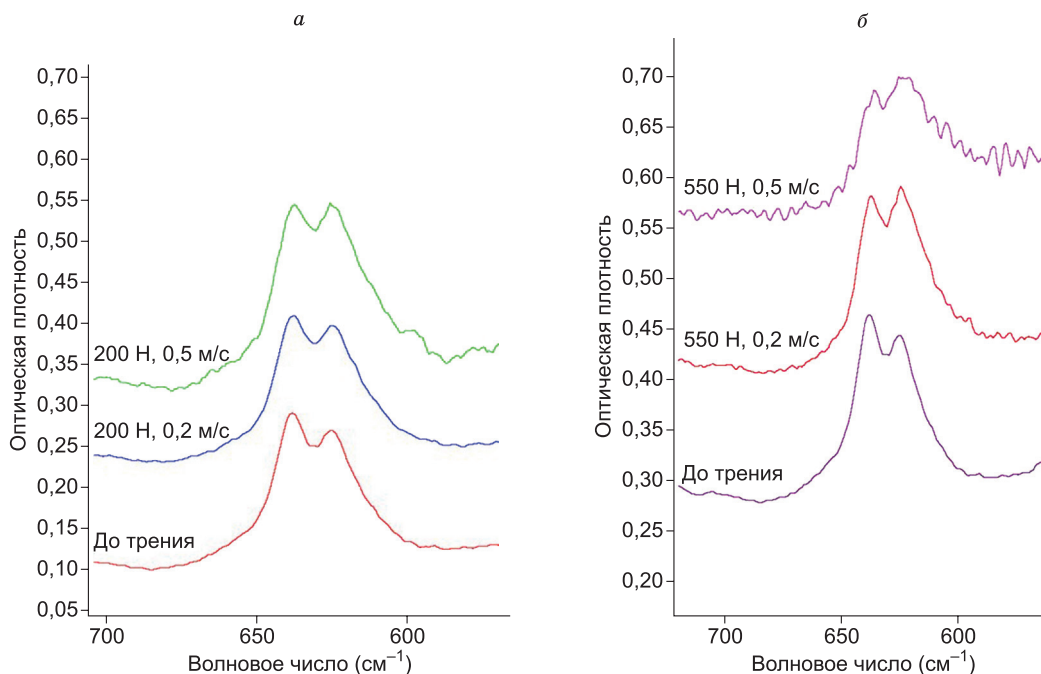


Рис. 5. Изменение конформации ПКМ в зависимости от условий трения: *а* – при нагрузке 200 Н; *б* – при нагрузке 500 Н

Fig. 5. Change in the conformation of the PCM depending on the friction conditions: *a* – at a load of 200 N; *б* – at a load of 500 N

трения происходит изменение спиральной конформации макромолекул ПТФЭ. Показано, что повышение скорости скольжения и нагрузки при трении ПКМ приводит к изменению спиральной конформации макромолекул с переходом с 13_6 к более стабильной конформации 15_7 . При этом зарегистрировано, что повышение подаваемой нагрузки до 550 Н независимо от скорости скольжения контртела приводит к повышению интенсивности пика при 625 см^{-1} (см. рис. 5, б), которое связано с дефектом разворота спирали и свидетельствует о протекании процессов аморфизации и рекристаллизации полимерного композита.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований выявлены закономерности структурообразования композитов на основе ПТФЭ в зависимости от технологии их получения и содержания УВ марки УВИС-АК-П. Установлено, что комбинация технологий совместной механоактивации компонентов и вальцевания порошковой смеси при разработке полимерных композитов является технологическим приемом, который позволяет повысить структурную активность дискретных УВ и интенсифицировать адгезионное взаимодействие на границе раздела фаз по-

лимер-наполнитель, что приводит к повышению сопротивляемости композитов к ползучести и износостойкости.

Список литературы / References

1. Хатипов С.А., Артамонов Н.А. Создание нового антифрикционного и уплотнительного материала на основе радиационно-модифицированного политетрафторэтилена. *Российский химический журнал*. 2008;52(3):89–97.
2. Hatipov S.A., Artamonov N.A. Creation of a new antifriction and sealing material based on radiation-modified polytetrafluoroethylene. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal (Russian Chemistry Journal)*. 2008;52(3):89–97. (In Russ.)
3. Li Z., Liu J., Yuan Y., et al. Effects of surface fluoride-functionalizing of glass fiber on the properties of PTFE/glass fiber microwave composites. *The Royal Society of Chemistry Advances*. 2017;(7):22810–22817.
3. Охлопкова А.А., Васильев С.В., Петрова П.Н. и др. Базальтофторопластовые композиты антифрикционного назначения. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2013; 10(5):30–36.
- Ohlopko A.A., Vasilev S.V., Petrova P.N., et al. Basalt-fluoroplastic composites of antifrictional assignment. *Vestnik of the North-Eastern Federal University*. 2013;10(5):30–36. (In Russ.)

4. Bolvari A., Glenn S., Janssen R., Ellis C. Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composites. *Wear*. 1997;(203-204):697–702.

5. Будник О.А. Физико-химические и технологические аспекты подготовки углеволокнистого наполнителя для композита на основе политетрафторэтилена. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2014;(2): 116–122.

Budnik O.A. Physico-chemical and technological aspects of the preparation of a carbon fiber filler for a composite based on polytetrafluoroethylene. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014;(2):116–122. (In Russ.)

6. Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*. 2022;15(5): 569–582. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0418>

Markova M.A., Petrova P.N., Fedorov A.L. Investigation of tribological properties of polymer composites based on PTFE in the dry friction mode and in the medium of liquid lubricants. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & technologies*. 2022;15(5):569–582. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0418>. (In Russ.)

7. Охлопкова А.А., Стручкова Т.С., Васильев А.П. и др. Влияние термической обработки на надмолекулярную структуру порошка политетрафторэтилена. *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2016;54(4):48–57.

Ohlopokova A.A., Struchkova T.S., Vasil'ev A.P., et al. The effect of heat treatment on the supramolecular structure of polytetrafluoroethylene powder. *Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2016;54(4):48–57. (In Russ.)

8. Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А., Кургузова О.А. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокомпозитов на основе политетрафторэтилена. *Журнал технической физики*. 2014;5(84):66–70.

Kropotin O.V., Mashkov Yu.K., Egorova V.A., Kurguzova O.A. The effect of carbon modifiers on the struc-

ture and wear resistance of polymer nanocomposites based on polytetrafluoroethylene. *Journal of Applied Physics*. 2014;5(84):66–70. (In Russ.)

9. Будник А.Ф., Руденко П.В., Берладир К.В., Будник О.А. Структурированные нанообъекты политетрафторэтиленовых композитов. *Журнал нано- и электронной физики*. 2015;7(2):1–9.

Budnik A.F., Rudenko P.V., Berladir K.V., Budnik O.A. Structured nanoobjects of polytetrafluoroethylene composites. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2015; 7(2):1–9. (In Russ.)

10. Казицына Л.А., Куплетская Н.Б. *Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии: Учеб. пособие для вузов*. М.: Высш. школа; 1971. 264 с.

Kazicyna L.A., Kupletskaya N.B. *Application of UV, IR and NMR spectroscopy in organic chemistry: Textbook for universities*. Moscow: Vysshaya Shkola; 1971. 264 p. (In Russ.)

11. Rasberger M., Mortier R.M., Orszulik S.T. Oxidative degradation and stabilisation of mineral oil based lubricants. In: *Chemistry and Technology of Lubricants*. 2009, pp. 107–152.

12. Coates J. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: Meyers R.D. (ed.). *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. 2000, pp. 1–23.

13. Harris K.L., Pitenis A.A., Sawyer W.G., et al. PTFE Tribology and the Role of Mechanochemistry in the Development of Protective Surface Films. *Macromolecules*. 2015;48(11):3739–3745.

14. Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм. *Российский химический журнал*. 2008;52(3):139–146.

Ignat'eva L.N., Buznik V.M. IK-spektroskopicheskie issledovaniya politetraforetilena i ego modifitsirovannyh form. *Russian Journal of General Chemistry*. 2008;52(3): 139–146. (In Russ)

15. Quarti C., Milani A., Castiglioni Ch. Ab Initio Calculation of the IR Spectrum of PTFE: Helical Symmetry and Defects. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2013;117(2):706–718.

Об авторах

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6425-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

МАРКОВА Марфа Алексеевна, аспирант, инженер, <https://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, ResearcherID: F-3227-2017, Scopus Author ID: 57207729946, SPIN: 1249-7726, e-mail: markovamusa@mail.ru

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

About the authors

PETROVA, Pavlina Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6425-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

MARKOVA, Marfa Alekseevna, Postgraduate Student, Engineer, <https://orcid.org/0000-0002-3000-1560>, ResearcherID: F-3227-2017, Scopus Author ID: 57207729946, SPIN: 1249-7726, e-mail: markovamusya@mail.ru

FEDOROV, Andrey Leonidovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 09.06.2023

Поступила после рецензирования / Revised 05.02.2024

Принята к публикации / Accepted 04.03.2024

ПАМЯТЬ

Слово о Никите Гавриловиче Соломонове (27 сентября 1929 г. – 10 февраля 2024 г.)



*«Моя жизнь — это маленькая частица
моего северного народа».*

Н.Г. Соломонов

10 февраля 2024 г. ушел из жизни выдающийся ученый с мировым именем, специалист в области биологии и экологии животных, заслуженный деятель науки РСФСР и Якутской АССР, член-корреспондент РАН, Советник РАН, академик Академии наук Республики Саха (Якутия), академик Международной Академии по экологии и безопасности жизнедеятельности, доктор биологических наук, профессор Соломонов Никита Гаврилович.

Н.Г. Соломонов родился в небольшой деревушке Батамайы Кытыла Западно-Кангаласского района Якутской АССР, расположенной напротив изумительных по красоте и величию знаменитых ныне Ленских Столбов. Затем были годы переселения родителей на рыбзавод в дельте р. Лена для заготовки рыбы для фронта, цинга, интернат, когда приходилось, как вспоминал Никита Гаврилович, практически беспризорничать. Эти невзгоды сформировали стойкий, стальной характер, активнейшую жизненную позицию.

В 1954 г. Н. Г. Соломонов закончил Якутский педагогический институт, где приобщился к научно-исследовательской работе и были начаты работы по экологии животных. Значимый период жизни Никиты Гавриловича был посвящен научной и педагогической деятельности в Якутском госуниверситете (ныне СВФУ). В 1962–1964 гг. он был деканом биолого-географического факультета, многие годы заведовал кафедрой зоологии, около 50 был профессором кафедры зоологии ЯГУ (СВФУ).

В 1961 г. в Томском государственном университете Н.Г. Соломонов защитил кандидатскую диссертацию «Экология водяной полевки в Центральной Якутии». С 1960 г. Никита Гаврилович одним из первых в стране начал чтение в ЯГУ курсов по экологии животных и по охране природы. С середины 1960-х годов начинает формироваться научная школа Н.Г. Соломонова по популяционной экологии и экологической физиологии диких животных, включающая к 2023 г. 17 докторов и 30 кандидатов наук. В 1972 г. он защитил докторскую диссертацию на тему «Опыт изучения популяционной экологии грызунов и зайца беляка в Якутии».

Новый этап научных исследований Н.Г. Соломонова начался в 1973 г., когда в Институте биологии ЯФ СО АН СССР им была организована лаборатория экологической физиологии животных. Вместе с командой первого вице-президента АН СССР Ю.А. Овчинникова было начато изучение экологических и молекулярных основ феномена зимней спячки.

В эти же годы Н.Г. Соломонов выступает и как крупный организатор академической науки. В 1976 г. он назначен заместителем директора по науке Института биологии ЯФ СО АН СССР, с 1980 по 1986 г. занимал должность заместителя председателя Президиума ЯФ СО АН СССР, в 1986–1997 гг. – директора Института биологии (ныне ИБПК СО РАН).

Никита Гаврилович внес огромный вклад в изучение проблем аутоэкологии, популяционной экологии и эколого-физиологической адаптации животных, структуры и функционирования се-

верных экосистем, охраны окружающей среды Крайнего Севера. При его непосредственном участии разработаны научные основы системы особо охраняемых территорий на Севере, проведены совместные с зарубежными партнерами работы по изучению экологии и миграций уникальных птиц Севера, положено начало исследованиям роли растений и животных мерзлотных регионов в глобальных изменениях климата.

Н.Г. Соломоновым разработаны концепция охраны окружающей среды Якутии и Генеральная схема размещения особо охраняемых природных территорий и охраняемых объектов республики. В 1995 г. по инициативе Н.Г. Соломонова создан первый в республике природный парк «Ленские Столбы», несколько позже – ресурсный резерват «Кыталык» по охране белого журавля – стерха. Никита Гаврилович инициировал и разработал проект включения природного парка «Ленские Столбы» в Список Всемирного природного наследия ЮНЕСКО, которое состоялось в 2012 г. В 2018 г. «Ленские столбы» приобрели статус Национального природного парка.

Н.Г. Соломонов – автор и соавтор более 600 научных работ, в том числе 13 монографий и учебных пособий по актуальным вопросам биологической науки и охране окружающей среды, включая первую «Красную Книгу ЯАССР».

В конце 70-х годов XX века Никита Гаврилович вместе с учениками инициировали первый в мире проект длительного хранения семян растений в толще многолетнемерзлых пород, который вот уже 45 лет показывает свою высочайшую эффективность.

По инициативе Никиты Гавриловича с конца 80-х годов XX века в Якутии, в одном из самых первых регионов России, в содружестве с японскими и европейскими учеными начаты работы по мониторингу парниковых газов в атмосфере на примере экосистем центральной и северной Якутии.

Н.Г. Соломонов избирался депутатом Верховного Совета ЯАССР, возглавлял Комиссию по охране природы. В 1986–1990 гг. – заместитель председателя Президиума Верховного Совета ЯАССР.

С 1990 г. Н. Г. Соломонов – член-корреспондент АН СССР, в 1993 г. избран академиком АН РС (Я), с 1997 г. – Советник РАН. Н.Г. Соломонов как член АН РС (Я), член уставной комиссии исполнял ведущую роль в ее создании, становлении и развитии. Он многие годы являлся главным редактором первого в Якутии периоди-

ческого научного журнала «Наука и образование» (ныне «Природные ресурсы Арктики и Субарктики»).

С 10-х годов XXI века Никита Гаврилович на всех уровнях научного сообщества и государственной власти в Якутии и России поднимал проблемы обеспечения биологической безопасности в условиях глобальных изменений климата и в связи с повышением рисков применения биологического оружия, особой роли именно Арктических экосистем в усилении рисков новых мировых пандемий.

Никита Гаврилович стоит у истоков экологического образования школьников Якутии. В 2019 г. на базе СВФУ начал работу дом научной коллаборации Н.Г. Соломонова, целью которого является реализация дополнительных образовательных программ для детей и молодежи с использованием методов и технологий развития современных компетенций.

Научная и общественная деятельность Н.Г. Соломонова получила высокую оценку. Он удостоен многих почетных званий, награжден многими орденами и медалями, среди которых Орден Трудового Красного Знамени, медаль Н.В. Черского «За выдающийся вклад в развитие науки республики», «Золотая сигма СО РАН», «Золотая медаль» Академии наук РС (Я). Соломонов Никита Гаврилович – Почетный гражданин Республики Саха (Якутия), Почетный гражданин родного Хангаласского улуса, Почетный гражданин города Якутска.

Несмотря на преклонный возраст у Никиты Гавриловича было много интересных творческих замыслов. Его научный и моральный авторитет исключительно высок не только среди научной общественности, но и всего нашего народа.

Н.Г. Соломонов по праву принадлежит плеяде выдающихся ученых страны, чей профессиональный и человеческий вклад в социально-экономическое развитие страны и республики вписан в историческую летопись.

Никита Гаврилович Соломонов навсегда останется в благодарной памяти своих учеников и соратников мудрым Учителем, настоящим профессором и Наставником, принципиальным Ученым, дела и проекты которого будут продолжены.

*Б.М. Кершенгольц,
гл. научный сотрудник ИБПК СО РАН,
академик АН РС (Я)*

***Вклад Геннадия Николаевича Гамянина
в изучение процессов рудообразования***

9 декабря 2023 г. на 88-м году ушел из жизни выдающийся исследователь рудных месторождений Северо-Востока России, заслуженный деятель науки РФ, почетный член Минералогического общества, профессор, доктор геолого-минералогических наук Гамянин Геннадий Николаевич. Он был одним из лучших знатоков минералогии рудных месторождений, авторитетных и компетентных ученых-геологов, работающих на Северо-Востоке России – в крае, которому он посвятил более 65 лет своей жизни.

Г.Н. Гамянин родился 14 марта 1936 г. в с. Желтиково Пролетарского района Тверской области. Он представитель поколения научной советской интеллигенции, вышедшей из трудовой пролетарской среды. В 1958 г. после окончания МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности геолог-геохимик он был направлен в Якутский филиал АН СССР (ныне ИГАБМ СО РАН).

Область исследований – минералогия золото- и сереборудных месторождений, рудообразова-

ние, минералогические основы рудно-формационного и металлогенического анализа. В 1966 г. защитил кандидатскую диссертацию «Минеральные ассоциации и условия образования золоторудных месторождений Верхне-Индибирского района», в 1992 г. – докторскую «Минералогические аспекты формационно-генетического анализа золоторудных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области».

Геннадий Николаевич вместе с коллегами охватил полевыми исследованиями восточные и северо-восточные районы Якутии, бассейны рек Колыма и Омогон, прибрежные районы Охотского моря на севере Хабаровского края и в Магаданской области. Проведя детальные исследования многих рудных месторождений золота, серебра, вольфрама, сурьмы, полиметаллов и олова, он создал надежный фундамент для своих научных выводов и практических рекомендаций.

Гамянин Г.Н. внес существенный вклад в разработку теории рудообразования, в изучение ми-



Полевые работы Г.Н. Гамянина в Восточной Якутии

нералогии, зональности, эволюции рудно-магматических систем и генезиса золото- и сереборудных месторождений Северо-Востока России, в том числе таких крупных как Нежданинское (Au), Сентачан (Au-Sb), Прогноз (Ag-Pb-Zn). Он обосновал тезис о полихронности и полиформационности крупных и уникальных золотых и серебряных месторождений, создал геолого-генетические модели золотых и серебро-оловянных месторождений. Им впервые в регионе разработаны количественные минералогические критерии и показана роль изучения типоморфизма минералов для металлогенического анализа и оценки перспектив золотого оруденения Северо-Востока России; охарактеризованы минералогические признаки крупномасштабных месторождений. Эти результаты внедрены в практику геолого-поисковых работ и служат укреплению минерально-сырьевой базы Востока России. Автор и соавтор более 300 научных публикаций, в том числе 13 монографий. Г.Н. Гамянин – автор открытия новых минералов: мангазеита (2005), фторокронита (2010), арангасита (2012).

Профессор Г.Н. Гамянин на протяжении многих лет читал курсы лекций на геологическом

факультете Якутского госуниверситета (СВФУ), им подготовлены три методических пособия. Он был председателем диссертационного совета при ИГАБМ СО РАН (2002–2007 гг.), членом диссертационного совета при СВКНИИ ДВО РАН. Под его руководством защищено пять кандидатских диссертаций и одна докторская. С 2007 г. работал в головном академическом институте по геологии и минералогии рудных месторождений – ИГЕМ РАН.

Г.Н. Гамянин был многогранным, талантливым ученым и чрезвычайно энергичным и жизнерадостным человеком, щедро передавал свои знания и мудрое отношение к жизни, у него было много друзей. Нам посчастливилось работать с ним, таким он останется в наших сердцах!

*Горячев Н.А. академик РАН,
г.н.с. СВКНИИ ДВО РАН*

*Фридовский В.Ю., чл.-к. РАН,
директор ИГАБМ СО РАН*

*Никифорова З.С., д.г.-м.н.,
г.н.с. ИГАБМ СО РАН*

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 29.03.2024. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 17,16. Тираж 100 экз. Заказ № 811. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8 (4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.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 типографии:

ООО «Издательство Сфера»
677013, г. Якутск, ул. Сергеляхская, д. 12, корп. 2, оф. 25,
тел. 8 (4412) 73-46-29, e-mail: izd_sfera@mail.ru