Цена свободная

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

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

ISSN 2618-9712 (print)
ISSN 2686-9683 (online)
Природные ресурсы Арктики и Субарктики,
2021, т. 26, № 3
http://nras.asrsya.ru

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ 2021 Т. 26 № 3

12+

2021

т. 26 № 3

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректура *Н.В. Счастнева*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 05.10.2021. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,4. Тираж 100 экз. Заказ № 48. Цена свободная.

Адрес редакции:
677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 39-06-64, http://nras.asrsya.ru

Адрес издателя:
677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес издательства:
Сибирское отделение РАН
630090, г. Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 17
Отпечатано в Сибирском отделении РАН
630090, г. Новосибирск, Морской просп. 2
Тел. (383) 330-84-66
E-mail: e.lyannaya@sb-ras.ru

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

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ

(до 2018 г. «Наука и образование»)

Научный журнал

2021, Том 26, № 3

Основан в 1996 г.
Выходит 4 раза в год

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

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

Главный редактор
В.В. Филиппов
Член-корреспондент РАН

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

Ответственный секретарь
З.А. Корнилова

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

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

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

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

ARCTIC AND SUBARCTIC NATURAL RESOURCES

(until 2018 «Nauka i Obrazovanie»)

Scientific journal

2021, Vol. 26, No. 3

Founded in 1996
4 issues per year

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

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

Editor-in-Chief
V.V. Filippov
Corresponding Member of RAS

Deputy Editors-in-Chief:
N.G. Solomonov
Corresponding Member of RAS
Yu.M. Grigoriev
Dr.Sci. (Phys.-Math.)

Executive Editor
Z.A. Kornilova

Editorial Office Address:
33 Lenina pr., Yakutsk, 677000, Russia
nras2018@mail.ru

http://nras.asrsya.ru
The certificate of registration of PI No. TU14-00503
of February 15, 2018, issued by the Department
of Federal Service for Supervision in the Sphere
of Communication, Information Technologies
and Mass Communications in the Republic of Sakha (Yakutia)

Subscription Index in the Russian Post Cataloque – ПР046
Enlisted in the Catalogue of Leading Scientific Journals
of the Higher Attestation Commission, RF (22.12.2020)
Included in the Russian Science Citation Index database (RSCI)

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

Редакционный совет:

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

Редакционная коллегия:

Науки о Земле

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

Общая биология

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

Материаловедение

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

Editorial Council:

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

Editorial Board:

Earth Sciences

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

General Biology

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

Materials Science

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

СОДЕРЖАНИЕ

Науки о Земле

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н., Мустафин С.К. Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России) 5

Суставов О.А. Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия)..... 31

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Скрябин П.Н. Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики 43

Черепанова А.М., Спектор В.В., Шепелев А.Г. Поверхностный органический и неорганический углерод в ландшафтах Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)..... 52

Куть А.А., Мельников А.Е. Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений и его применение для реконструкции палеогеографической обстановки в криолитозоне 64

Общая биология

Экология

Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А. Особенности биозаражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях 75

Тананаев Н.И., Находкин Н.А., Голованов А.О. Генезис, сценарии и особенности прогнозирования наводнений в среднем течении р. Амга (Центральная Якутия)..... 86

Василевская Н.В. Поливариантность репродуктивного развития *Betula czerepanovii* Orlova в условиях техногенного стресса 100

Филиппова Г.В., Дарханова В.Г., Строева Н.С. Рост микрочеренков картофеля *in vitro* при действии мультиконверсионного биопрепарата «Эмбиота» 112

Биологические ресурсы

Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М., Слепцова С.С., Винокурова М.К., Колосова О.Н. Биопрепарат из природного северного биосырья и возможности его использования при профилактике, лечении и на этапе ремиссии после перенесенных бактериальных и вирусных инфекций, включая COVID-19..... 120

Васильева А.Г., Чирикова Н.К. Фенольные соединения хвои *Pinus Pumila* (Pall.) Regel, произрастающей в Якутии 136

Вильк Е.Ф. Флора мхов заповедника «Магаданский» и его окрестностей..... 144

Материаловедение

Брянский А.А., Башков О.В., Малышева Д.П. Исследование термоокислительного старения полимерного композиционного материала с использованием метода акустической эмиссии..... 155

CONTENTS

Earth sciences

General and regional geology, petrology and volcanology

Anisimova1 G.S., Kondratieva L.A., Kardashevskaia V.N.,Mustafin S.K. Features of the gold-silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone (North-East of Russia)..... 5

Sustavov O.A. Cleavage microstructures and stretching indicators in black-slate rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia) 31

Engineering geology, permafrost and soil science

Skryabin P.N. Thermal state of soils in the Yenisei Arctic..... 43

Cherepanova A.M., Spektor V.V., Shepelev A.G. Surface organic and inorganic carbon in the landscapes of the Lena-Amga interfluve (Central Yakutia)..... 52

Kut' A.A., Melnikov A.E. The method of micromorphological analysis of loose sediments and its application for the reconstruction of paleogeographic settings in the cryolithozone..... 64

General biology

Ecology

Isakova T.A., Petukhova E.S., Pavlova V.V., Erofeevskaya L.A. Features of biological contamination of mammoth tusks during long-term storage in various conditions 75

Tananaev N.I., Nakhodkin N.A., Golovanov A.O. Genesis, scenarios and features of flood prediction in the middle reach of the Amga River (Central Yakutia) 86

Vasilevskaya N.V. Polyvariance of the reproductive development of *Betula czerepanovii* Orlova under the conditions of technogenic stress 100

Filippova G.V., Darkhanova V.G., Stroeva N.S. The growth of potato micro-stalks *in vitro* under the action of multiconversion biopreparation Embiota..... 112

Biological resources

Kershengolts B.M., Shashurin M.M., Sleptcova S.S., Vinokurova M.K., Kolosova O.N. Biological product from natural northern biological raw materials with possible use in the prevention, treatment and remission stages after bacterial and viral infections, including COVID-19..... 120

Vasilyeva A.G., Chirikova N.K. Phenolic compounds of the needles of *Pinus Pumila* (Pall.) Regel growing in Yakutia..... 136

Vilk E.F. Moss flora of the Magadansky Reserve and its vicinities 144

Materials science

Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P. Investigation on thermooxidative aging of the polymer composite material by acoustic emission 155

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 553.4 (571.56)
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-5–30

Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России)

Г.С. Анисимова[1,*], Л.А. Кондратьева[1], В.Н. Кардашевская[1], С.К. Мустафин[2]

[1]*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*
[2]*Башкирский государственный университет, Уфа, Россия*

**gsanisimova1952@mail.ru*

Аннотация. *В статье приводятся особенности вещественного состава, физико-химические параметры и условия образования золотого оруденения месторождений и рудопроявлений с серебро-висмут-теллуровой минерализацией Аллах-Юньской металлогенической зоны. В рудах установлено 20 минералов теллура: 10 теллуридов, 6 сульфотеллуридов и 4 теллурата, из которых 2 являются не идентифицированными. Обычно они образуют микро- и нановключения размером 1–20 мкм, исключением являются руды месторождений Одержимый и Тенистый, где размеры теллуровисмутита и/или тетрадимита достигают 3 мм. Преобладают минералы Te двух систем: Au–Bi–Te и Au–Ag–Te. Золото находится в ассоциации с минералами теллура и в составе теллуридов: калаверита ($AuTe_2$), сильванита $(AuAg)_2Te_4$ и петцита (Ag_3AuTe_2). В золоторудных месторождениях Аллах-Юньской металлогенической зоны выделено три минеральных типа золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, а также смешанный, в котором сочетается минерализация обеих систем. Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низкотемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °С. Ыныкчанское рудное поле, судя по температуре образования 200–150 °С, обладает чертами эпитермального оруденения. Смешанный Au–Ag–Bi–Te (Задержнинское месторождение) минеральный тип образован из гетерогенных растворов. Понижение пробности самородного золота согласуется с последовательностью и температурами образования минералов Te и ассоциирующих минеральных парагенезисов от мезотермального Au–Ag–Te (830–999 ‰) к эпитермальному Au–Ag–Te (<600 ‰) типу. Составы изотопов Pb в галенитах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское на диаграммах в координатах $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ показали соответствие с таковой Нежданинского золоторудного месторождения, а данные золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла. Предполагается генетическая и парагенетическая связь Au–Bi–Te-оруденения с гранитоидным магматизмом, а Au–Ag–Te – с щелочным магматизмом. Формирование золотополисульфидного минерального типа Леводыбинского узла и Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.*

По минеральному составу золоторудные месторождения и проявления Аллах-Юньской металлогенической зоны имеют схожие черты с Au–Ag-объектами Куларского и Верхнеиндигирского районов Верхояно-Колымской складчатой области и Охотско-Чукотского вулканического пояса, Приморья и близки к Au–Ag–Bi–Te-месторождениям Алданского щита и Центральной Азии. В качестве примера приводится описание компактного высокопродуктивного Au–Ag–Bi–Te-месторождения Джеруй в Кыргызстане, которое начинает интенсивно отрабатываться. Проведенные исследования выявили распространение Au–Te-минерализации в пределах Аллах-Юньской металлогенической

© Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н., Мустафин С.К., 2021

зоны. Au–Ag–Bi-теллуриды являются важными вспомогательными минералами, показывающими физико-химические условия рудообразования месторождений. При этом из некоторых объектов могут попутно извлекаться серебро, теллур и висмут.

Ключевые слова: золото-теллур-висмутовая минерализация, теллуриды, золото, Au–Bi–Te, Au–Ag–Te и смешанный Au–Ag–Bi–Te минеральные типы, гранитоидный и щелочной магматизм, самородный висмут, тетрадимит, петцит, флюидные включения, изотопы свинца в сульфидах, Задержнинское месторождение, рудопроявление Мугун, Ыныкчанское поле, Широкинский узел, Аллах-Юньская металлогеническая зона.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект №18-45-140045 р_а и частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН.*

Введение

Аллах-Юньская металлогеническая зона является одним из старейших крупных золотоносных районов Якутии. Несмотря на длительную с 30-х годов прошлого века историю изучения золотоносности, проблема коренных источников золота остается актуальной. До сих пор в Аллах-Юньской зоне приоритетным в добыче является россыпное золото, основные запасы которого истощаются. Месторождение Нежданинское, в котором сосредоточено 55,8 % промышленных запасов рудного золота в Якутии, только начинает эксплуатироваться АО «Полиметалл». В настоящее время добыча рудного золота ведется лишь на месторождении Дуэт.

В данной статье обсуждается теллуровая минерализация в золоторудных объектах Аллах-Юньской металлогенической зоны (рис. 1). Актуальность изучения теллуридов обусловлена их важной ролью как минералов-индикаторов физико-химических условий формирования золотого оруденения и минералов-концентраторов золота. В то же время теллур, висмут и серебро также попутно могут извлекаться при промышленной отработке месторождений.

Следует отметить, что направленная для испытания в лабораторию г. Иркутск валовая проба рудопроявления Одержимое показала средние содержания Au 7,8 г/т, Bi 500 и Te 200 г/т [1]. В результате технологического испытания пробы установлено, что свободное и в срастаниях с сульфидами, кварцем золото извлекается до 90–96 %. При этом затраты на переработку руды полностью окупаются извлекаемым теллуром [1].

Золото-серебро-висмут-теллуровая (Au–Ag–Bi–Te) минерализация в Аллах-Юньской металлогенической зоне развита в рудопроявлениях золото-редкометаллного типа Леводыбинское (Одержимое), Курумское, Тарбаганнах (Мугун), Эсэлогдинское и др., расположенных преимущественно в экзоконтактах гранитоидных массивов ранне-позднемелового возраста среди пермских, реже триасовых отложений верхоянского терригенного комплекса, Центральной зоны Южно-Верхоянского синклинория (ЮВС). Предполагается генетическая [3, 4] и парагенетическая [5, 6] связь оруденения с гранитоидным магматизмом и подчеркивается независимость от его состава и возраста. Основными рудными минералами являются арсенопирит, леллингит, самородный висмут, тетрадимит, висмутин, галеновисмутит, вольфрамит, шеелит, теллуриды золота (калаверит, сильванит, петцит), самородное золото.

В последнее время авторами получены новые данные по распространению Au(Ag)–Bi–Te-оруденения в регионе, как в экзоконтактах гранитоидных массивов, так и вне видимой связи, о чем будет написано ниже. В частности, это – месторождение Задержнинское, рудопроявление Мугун, Широкинский рудно-россыпной узел и Ыныкчанское рудное поле. Цель исследований: систематизировать и обобщить сведения по Te-минерализации региона, уточнить типоморфные свойства и условия образования минералов, провести типизацию и определить закономерности их пространственного распространения в пределах Аллах-Юньской металлогенической зоны.

Методы и материалы исследования

Минералогические исследования. Все полировки изучены под рудным микроскопом фирмы Jenavert в отраженном свете. С целью определения химического состава минералов (рудных, жильных и гипергенных), а также диагностики неизвестных минералов был использован микрозондовый анализ. Препараты были проанализированы на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax-micro фирмы «Cameca» (аналитик Христофорова Н.В.). Основной объем образцов был проанализирован на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD (аналитики С.К. Попова, С.А. Карпова), на котором проводились фотосъемки. Количественный ана-

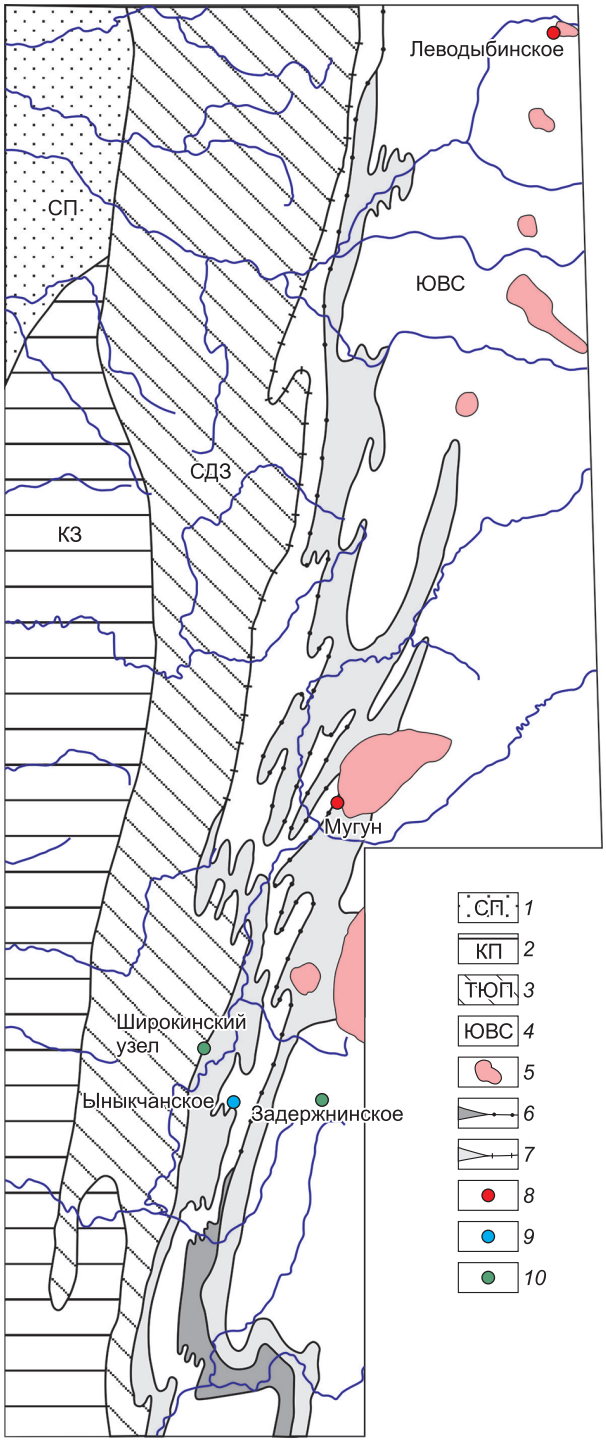


Рис. 1. Схема размещения золотого оруденения с Au–Ag–Bi–Te-минерализацией Аллах-Юньской металлогенической зоны. Геологическая основа по [2].
1 – Сибирская платформа (СП); *2* – Кыллахская зона (КЗ), *3* – Сетте-Дабанская зона (СДЗ), *4* – Южно-Верхоянский синклинорий (ЮВС); *5* – гранитоиды; *6* – отложения суркечанской свиты (C_3sr) – переслаивание алевролитов, песчаников, отдельные пласты конгломератов; *7* – отложения наталинской (C_2nt) и халыинской (P_1hl) свит – алевролиты с прослоями известняков, известковистых песчаников и алевролитов; *8–10* – золоторудные месторождения и рудопроявления с минерализацией (*8* – Au–Bi–Te, *9* – Au–Ag–Te, *10* – Au–Ag–Bi–Te).

Fig. 1. Layout of gold mineralization with Au–Ag–Bi–Te mineralization of the Allah-Yun metallogenic zone. Geological base according to [2].
1 – Siberian platform (СП); *2* – Kyllakh zone (КЗ), *3* – Sette-Daban zone (СДЗ); *4* – South-Verkhoyansk synclinorium (ЮВС); *5* – massifs of granitoids; *6* – deposits of the Surkechanskaya suite (C_3sr) – interbedding of siltstones, sandstones, separate layers of conglomerates; *7* – deposits of the Natalinskaya (C_2nt) and Khalyinskaya (P_1hl) formations – siltstones with interlayers of limestones, calcareous sandstones and siltstones; *8–10* – gold deposits (*8* – with Au–Bi–Te, *9* – with Au–Ag–Te, *10* – with mixed Au–Ag–Bi–Te mineralization).

лиз проводился по методу XPP с использованием Software INCA Energy. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1,08 нА, время измерения 10 сек. Условия съемки: напряжение 20 кВ, ток – 17 нА. Аналитические линии: Cu, Fe, Zn – K_α; Sb, S – L_α. Стандарты: золото 750 ‰ – Au, Ag; HgTe (колорадоит) – Hg, Te, $CuSbS_2$ (халькостибит) – Cu, Sb, S; Tl–Tl (Br, I); ZnS (сфалерит) – Zn; $CuFeS_2$ (халькопирит) – Fe; PbS (галенит) – Pb; FeAsS (арсенопирит) – As.

Изучение флюидных включений. Термобарогеохимические исследования флюидных включений проводились на кафедре минералогии СПбГУ в термокамере, установленной на микроскопе ПОЛАМ Р-211, а также в РЦ «Геомодель» на оптическом микроскопе Olympus BX53F в комплекте с термостоликом THMSG-600-ec с системой охлаждения образца жидким азотом LNP95 при диапазоне температур –196…+600 °С. Точность измерений температуры составляет ±0,1 °С в интервале температур от –20 до +20 °С. Состав солей во флюидных включениях оценивался по температуре эвтектики [7]. Концентрация солей рассчитывалась по температуре плавления льда на основе данных для системы $NaCl–H_2O$. Давление оценено по пересечению изотермы и изохоры для сингенетических газово-жидких и углекислотно-водных включений. Температура и давление для пирит-пирротин-кварцевой ассоциации оценены по геотермобарометру Куллеруда.

Состав газовой фазы флюидных включений в кварцах анализировался там же на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 Ar-лазер с длиной волны 514,5 нм и 488 нм, время экспозиции 3 с, число повторений – 5, мощность лазера – 50 мВт, увеличение микроскопа – 50 (аналитик В.Н. Бочаров).

Анализ изотопного состава Pb в сульфидах проведен в лаборатории геохронологии и геохи-

мии изотопов ИГГД РАН (аналитик Саватенков В.М.). Монофракции сульфидов предварительно выщелачивались на теплой плитке в течение часа в 0,5N растворе HBr с целью удаления поверхностных загрязнений. Затем сульфиды растворялись в концентрированной царской водке на горячей плитке в плотно закрытой фторопластовой посуде в течение 2 часов. Галениты растворялись в 5N растворе соляной кислоты. После этого раствор доводился до концентрации Pb приблизительно 200–400 нг/мкл. 2 мкл полученного раствора наносились непосредственно на Re-ленту без пропускания через ионообменную смолу. Химическое выделение Pb из сульфидов проводилось по стандартной методике на анионно-обменной смоле Bio-RadAG1-X8 (0,1 $см^3$) в растворах кислот HBr и HCl [8]. Навески проб сульфидов составляли 10–20 мг соответственно. Изотопный анализ Pb и U выполнялся на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261 в режиме одновременной регистрации ионных токов исследуемых элементов с погрешностью внутри опыта 0,01 % (2σ). Изотопный состав Pb измерялся в одноленточном режиме на Re-испарителях. Для измерений использовался силикатный эмиттер в смеси с H_3PO_4. Общий уровень лабораторного загрязнения Pb не превышал 0,1 нг. Поправка изотопных отношений Pb на фракционирование проводилась на коэффициент дискриминации масс (0,13 %), рассчитанный на основе измерения международного стандарта SRM982. Ошибки измерения изотопных отношений $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{208}Pb/^{204}Pb$, определенные по серии параллельных анализов стандарта породы BCR-1, не превышают 0,03, 0,03 и 0,05 % соответственно.

Результаты и обсуждение

Краткая геологическая характеристика объектов. Леводыбинское рудное поле с золоторудными проявлениями Одержимое и Тенистое расположено на левобережье р. Дыба. Кроме вышеупомянутых объектов здесь сосредоточен еще ряд проявлений, представленных мощными (до 2 м) и протяженными жилами кварца с арсенопиритом, в которых отмечаются (до 4 г/т) содержания золота; жилами, жильными зонами дробления и окварцевания с антимонитовой и полиметаллической минерализацией небольшой мощности по периферии Дыбинского массива гранодиоритов K_{1-2} [6, 9].

Мугунское рудопроявление расположено на левобережье р. Аллах-Юнь, вдоль западного контакта Тарбаганнахского гранитоидного массива в зоне Кидерикинского регионального разлома. Вмещающие породы представлены грубофлишоидной толщей, состоящей из чередования пачек разнозернистых песчаников и алевролитов C_3–P_1. Оруденение локализуется в виде ярусно расположенных на нескольких продуктивных уровнях межпластовых и внутрипластовых кварцевых жил, типичных для Аллах-Юньской металлогенической зоны. Западная зона приурочена ко второй песчанистой пачке нижнехалыинской подсвиты на западном крыле антиклинали и вмещает «жилу Тарбаганнахскую». Кварц в жилах слабо ороговикован. Восточная зона располагается непосредственно в приконтактовой части Тарбаганнахского массива в пределах зоны биотитовых роговиков и биотитизированных пород. Рудные тела представлены контактово-метаморфизованными субпластовыми кварцевыми жилами буларского типа, сложенными гранулированным кварцем, биотитом, диопсидом, амфиболом и альбитом, а также постинтрузивными гидротермальными проявлениями в гранитоидах – кварцевыми, кварц-полевошпатовыми и пегматитовыми жилами.

Месторождение Задержнинское расположено в бассейне р. Менджель, на левобережье р. Аллах-Юнь [10]. Рудовмещающие терригенные турбидиты нижней перми представлены переслаивающимися песчанистыми алевролитами и песчаниками бонсолчанской свиты. В пределах месторождения широко развиты маломощные дайки, выполненные породами среднего состава: диоритами, керсантитами, микродиоритами, диоритовыми порфиритами и спессартитами. В восточной части рудного поля закартированы два мелких штока диоритов. Наиболее поздними из дайковых образований золоторудного поля являются спессартиты, которые часто пространственно сопряжены с золотоносными кварцевыми жилами. В породах редко сохраняются реликты первичной кристаллическизернистой структуры. Промышленная золотоносность месторождения Задержнинское связана с рудными телами секущего морфоструктурного типа, представленными крутопадающими кварцевыми жилами и минерализованными зонами дробления с прожилково-вкрапленными рудам

Широкинский рудно-россыпной узел расположен на границе Сетте-Дабанской и Аллах-Юньской зон и занимает междуречье Силур–Суох, правых притоков рч. Аллах-Юнь. Вмещающий

комплекс узла представлен карбонатными и вулканогенно-осадочными породами PZ_{1-2}, прорванными редкими дайками диабазов (D), а также терригенными отложениями C_{1-2} [11]. Имеют место единичные выходы габбро-долеритов и ультракалиевых сиенитов [12]. Рудные тела представлены секущими кварцевыми и карбонат-кварцевыми жилами – апофизами зон дробления продольных субпараллельных разрывных нарушений Аллах-Юньского разлома, разграничивающего карбонатный комплекс Сетте-Дабанского антиклинория и терригенного комплекса Южно-Верхоянского синклинория.

Ыныкчанское рудно-россыпное поле входит в состав Юрско-Бриндакитского рудного района Аллах-Юньской металлогенической зоны, которая известна россыпными месторождениями по рч. Ыныкчан и его притоков (Заря, Мар, Тарагай, Наш, Том). В Ыныкчанском рудно-россыпном поле золотое оруденение развито в минерализованных зонах дробления с карбонат-кварцевым прожилкованием [13]. Пиритизированные алевролиты в зонах интенсивного смятия перетерты до глины желтого, белесого и синевато-серого цвета. Песчаники в зонах дробления брекчированы, сцементированы кварцевым, кварц-карбонатным материалом с сульфидами.

Позиция золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации в общем ряду вещественного состава руд. Лево-Дыбинское (Одержимое) рудопроявление характеризуется малосульфидным (не более 3 %) составом руд. Типоморфным для месторождения является присутствие в ранних арсенидно-сульфоарсенидных ассоциациях минералов никеля и кобальта (никелин, кобальтин, герсдорфит). Золото ассоциируется с комплексом висмутовых минералов, которые представлены висмутином, сульфотеллуридами и теллуридами висмута, золото-висмутовыми интерметаллидами и сульфидами, самородным висмутом. В месторождении выявлена широкая дисперсия состава золота – 700–1000 ‰, причем пробность золота в рудных телах снижается с удалением от их контакта с интрузивом [4, 1].

Вещественный состав руд Мугунского месторождения изучался Г.Н. Гамяниным, с выделением двух минеральных типов: 1) арсенопиритового, связанного с рудными телами, удаленными от массива, и представленного арсенопиритом, галенитом, сфалеритом, золотом, леллингитом, пиритом, пирротином, марказитом, халькопиритом и 2) висмутового, в эндо- и экзоконтакте гранитоидного массива, с молибденитом, арсенопиритом, пиритом, леллингитом, пирротином, халькопиритом, самородным Bi и Au.

В результате минералогического исследования руд из кварцево-жильных тел, расположенных в эндо- и экзоконтакте Тарбаганнахского массива, авторами уточнен и существенно дополнен вещественный состав. Впервые были диагностированы мальдонит (Au_2Bi), хедлейит (Bi_2Te), бурнонит, пентландит, кобальтин (рис. 2), определены составы многих известных минералов, уточнена пробность самородного Au различных минеральных ассоциаций [14]. С учетом полученных данных установлены два минеральных типа: As-полиметаллический и золото-редкометалльный. Во втором типе выделяются пентландит-кобальтин-леллингитовая с самородным Au (I) средней пробы – 827 ‰, Au (II)-мальдонит-висмут-теллуридная и Au(III)-Ag-молибденитовая ассоциации. Появление весьма высокопробного Au (II) – 960–990 ‰ и самородного Bi, скорее всего, свидетельствует о разложении мальдонита в нестабильной обстановке. В ассоциации с этими минералами встречаются теллуриды Bi – хедлейит (Bi_2Te) и цумоит (BiTe). В поздней ассоциации появляются молибденит с реликтами бисмутита ($Bi_2O_2(CO_3)$), дискразит (Ag_3Sb), самородное Ag и низкопробное Au (III) – 660 ‰. Состав минералов Bi стехиометричен.

Минеральный состав руд Задержнинского месторождения детально освещен в ранних работах авторов [10, 15, 16]. Содержание сульфидов до 3–5 %, основной комплекс рудных минералов: галенит, сфалерит, арсенопирит, пирит, халькопирит, золото. Типоморфным эндогенным карбонатом Au-кварцевого оруденения является магнезиоанкерит-сидеродоломит I (12,86–33,71 $FeCO_3$, мол. %). Au–Bi(Te)-оруденение, характеризующееся присутствием самородного висмута, висмутина, хедлейита, сульфотеллуридов Bi, минералов группы густавита и вторичных минералов – оксидов и теллуритов Bi с низкопробным золотом (рис. 3) локализуется в мелкозернистом до криптозернистого кварце, развитом на контакте с дайкой спессартитов в рудной зоне 2 месторождения, и накладывается на ранний катаклазированный арсенопирит II генерации Au-полисульфидного оруденения. Наложенность руд Au–Bi(Te)-ассоциации подчеркивается также появлением примеси Bi (0,3–0,5 %) в галените данной рудной зоны, тогда как для дру-

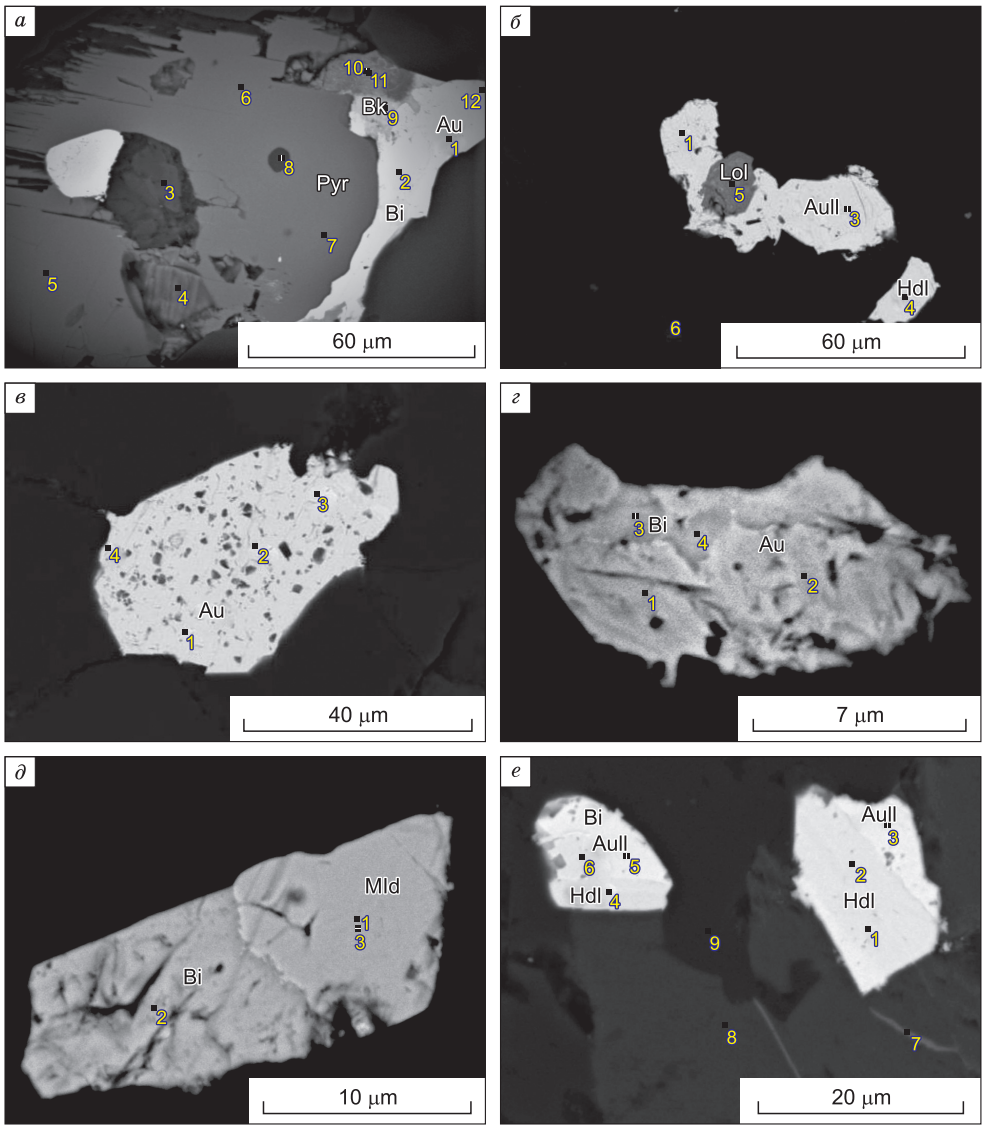


Рис. 2. Взаимоотношение минералов теллура с другими минералами Мугунского рудопроявления.
а – обрастание самородным золотом (Au) и висмутом (Bi) зерна пирротина (Pyr); *б* – включение леллингита (Lol) в самородное золото II (AuII) в ассоциации с хедлейитом (Hdl); *в* – самородное золото (Au)-теллуридной ассоциации; *г* – самородное золото с включениями самородного висмута; *д* – тесное срастание самородного висмута (Bi) и мальдонита (Mld); *е* – ассоциация самородных висмута (Bi) и золота (AuII) с хедлейитом (Hdl). 1–4 – номера микрозондовых анализов (то же самое на рис. 3–5).

Fig. 2. Relation between tellurium minerals and other minerals of the Mugun ore occurrence.
а – crustification of the native gold (Au) and bismuth (Bi) in pyrrhotite grain (Pyr), *б* – loellingite (Lol) inclusion in native gold II (AuII) in association with hedleyite (Hdl), *в* – native gold (Au) of the telluride association, *г* – native gold with native bismuth inclusions, *д* – close intergrowth of native bismuth (Bi) and maldonite (Mld), *е* – association of native bismuth (Bi) and gold (AuII) with hedleyite (Hdl). 1–4 – numbers of microprobe analyses (same on Figs. 3–5).

гих рудных тел месторождения она не характерна. Наблюдается нестехиометричность состава сульфотеллуридов и теллуридов висмута. Основные изоморфные элементы в минералах висмута – Pb, Sb и Ag. Особенностью состава висмутина являются ощутимые концентрации Pb (3,40–5,13 %) и Sb (0,93–1,79 %). Сульфотеллуриды Bi по химическому составу наиболее близки к ингодиту (Bi_2TeS), сульфоцумоиту (Bi_3Te_2S) и жозеиту B (Bi_4Te_2S). В виде примеси присутствуют Pb (до 4,76 %), реже Sb и Ag до 1 %. Сульфосоли Bi, Pb и Ag отнесены к ряду густавита. Оксиды и теллуриты Bi являются основными носителями данного элемента и доминируют над

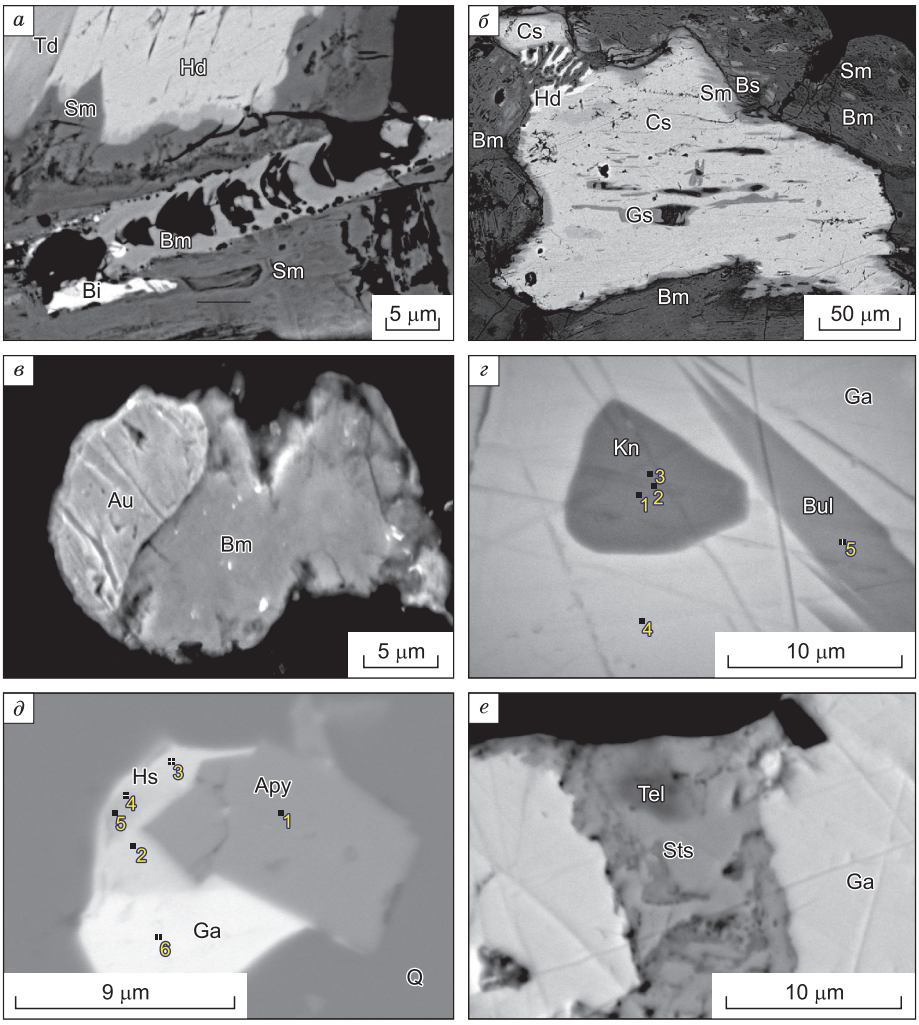


Рис. 3. Взаимоотношение минералов теллуридной ассоциации с другими минералами ранних ассоциаций Задержнинского месторождения:
а – выделение самородного висмута (Bi) в бисмите (Bm) и смирните (Sm), замещающем хедлейит (Hd) и сульфоцумоит (Cs); *б* – развитие минералов группы густавита (Gs) по спайности сульфоцумоита (Cs) и замещение хедлейита (Hd), сульфоцумоита (Cs) и висмутина (Bs) оксидами – бисмитом (Bm) и теллуритами – смирнитом (Sm); *в* – ассоциация самородного золота с бисмитом (Bm); *г* – включение зерна канфильдита (Kn) и вытянутых выделений буланжерита (Bul) в галените (Ga); *д* – взаимоотношение арсенопирита (Apy), галенита (Ga) и гессита (Hs); *е* – замещение штютцитом (Sts) с теллуратами (Tel) галенита (Ga).

Fig. 3. Relation between minerals of the telluride association and other minerals of the earlier associations in the Zaderzhninskoe deposit:
a – native bismuth (Bi) in bismite (Bm) and smirnite (Sm), replacing hedleyite (Hd) and sulphotsumoite (Cs); *б* – development of minerals of the gustavite group (Gs) along cleavage of sulphotsumoite (Cs) and replacement of hedleyite (Hd), sulphotsumoite (Cs) and bismithine (Bs) by oxides – bismite (Bm) and tellurites – smirnite (Sm); *в* – native gold association with bismite (Bm); *г* – canfieldite (Kn) grain inclusion and elongated boulangerite (Bul) in galena (Ga); *д* – relationship of arsenopyrite (Apy), galena (Ga) and hessite (Hs); *е* – stutzite (Sts) and tellurates (Tel) replacing galena (Ga).

всей группой Bi-содержащих минералов. Все вышеприведенные теллуриды, сульфотеллуриды, сульфиды и сульфосоли Bi и Ag, самородное Au сконцентрированы в них в виде выделений и реликтов. По химическому составу теллуриды отнесены к смирниту (Bi_2TeO_5), а оксиды Bi – к бисмиту (Bi_2O_3). В теллуридах фиксируются Ag, Sb и Se. Единственным ассоциирующим рудным минералом с Au–Bi–Te-минерализацией является катаклазированный арсенопирит.

Самородное золото тесно ассоциирует с оксидами висмута. Размер составляет 0,01–0,5 мм. Состав, %: Au – 74,95, Ag – 24,99, Hg – 0,41, сумма 100,35. Пробность – 747 ‰, соответствует пробности основной массы самородного Au месторождения.

В рудах Широкинского узла диагностировано около 50 минералов. Помимо преобладающих жильных (кварц, кальцит, доломит и серицит) и традиционных рудных минералов (пирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, борнит, халькозин) в рудах выявлен ряд редких сульфидов, теллуридов, сульфостаннатов, самородных элементов, интерметаллидов серебра, Hg-содержащих минералов, сформировавшихся в несколько стадий. Главным отличием руд Широкинского узла является отсутствие арсенопирита. Носителями мышьяка являются теннантит, энаргит, люцонит и геокронит. Золотоносность руд низкая (0,2 г/т), соотношение Au/Ag – 10–100. Видимое самородное золото встречается крайне редко.

Висмутовые минералы найдены в ассоциации с минералами серебра. Теллуриды Bi, по составу отвечающие группе хедлейита, встречены в халцедоновидном кварце в виде овальных, таблитчатых и игольчатых включений среди галенита. В тесном парагенезисе с теллуридами Bi отмечается гессит (Ag_2Te), между ними наблюдаются как взаимное прорастание, так и обрастание (рис. 4, *а*, *в*). Размеры выделений до 0,7 мм. По составу минерал отнесен к пильзениту (Bi_4Te_3) – характерному минералу продуктивных ассоциаций золотых и золото-серебряных месторождений (особенно вулканогенных). Отличительной особенностью теллурида Bi является постоянная примесь Sb и Pb. Самородный Bi наблюдается в галените в парагенезисе с гесситом и пильзенитом (см. рис. 4, *а*). Самородный Te найден с теллуритами Bi и Ag – продуктам распада теллуридов, в основном гессита и пильзенита, в ассоциации с алтаитом (PbTe) (см. рис. 4, *а*, *б*).Самородное золото выявлено в тесном срастании с гесситом, сильванитом ($(AuAg)_2Te_4$), петцитом ($AuAg_3Te_2$) и штютцитом ($Ag_{5-x}Te_3$) (см. рис. 4, *в*). Пробность золота теллуридной ассоциации варьирует от 540 до 700 ‰, а сульфоантимо-

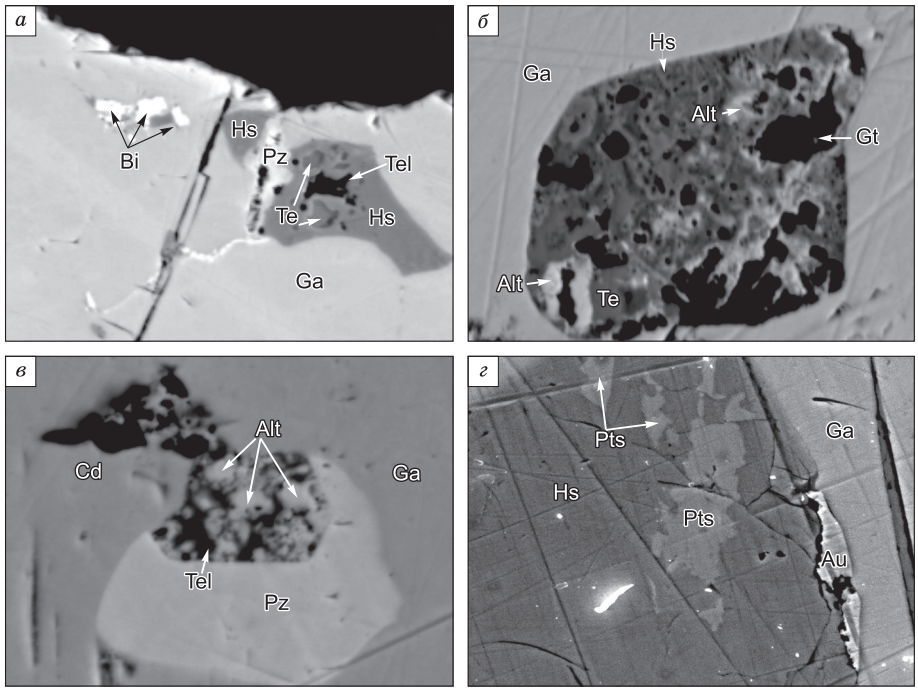


Рис. 4. Микропарагенезисы минералов теллуридной ассоциации Широкинского узла:
а – самородные висмут (Bi) и теллур (Te), пильзенит (Pz), гессит (Hs) и неидентифицированный теллурат Ag, Bi (Tel) в галените (Ga); *б* – реликты алтаита (Alt), гессита (Hs) и самородного теллура (Te) в гетите (Gt) среди галенита (Ga); *в* – ободок пильзенита (Pz) вокруг неидентифицированного теллурата Ag, Bi (Tel) с реликтами алтаита (Alt) и гринокита (Cd) в галените (Ga); *г* – таблитчатое выделение гессита (Hs) с включениями петцита (Pts)) и в срастании с самородным золотом (Au) в матрице – галените (Ga).

Fig. 4. Microparageneses of the telluride association minerals in the Shirokinskiy cluster:
а – native bismuth (Bi) and tellurium (Te), pilsenite (Pz), hessite (Hs) and unidentified tellurate of Ag, Bi (Tel) in galena (Ga); *б* – relicts of altaite (Alt), hessite (Hs) and native tellurium (Te) in goethite (Gt) in galena (Ga); *в* – pilsenite (Pz) rim around an unidentified tellurate of Ag, Bi (Tel) with altaite (Alt) and greenockite (Cd) relics in galena (Ga); *г* – tabular hessite (Hs) with petzite (Pts) inclusions, with intergrowth of native gold (Au) in galena (Ga) matrix.

нитовой ассоциации – до 860 ‰, в виде примеси постоянно присутствуют Hg (до 1,86 %) и Cu. Au–Bi-минерализация Широкинского узла самостоятельного значения не имеет и входит в состав Au–Ag–Te-оруденения.

В пределах Ыныкчанского рудного поля содержание сульфидов в цементе 5–10 %, в обломочном материале – до 5 %. Жильные минералы – кварц, анкерит и железистый доломит, серицит и хлорит. Рудная минерализация представлена гнездами, вкрапленностью и прожилками пирита, галенита, сфалерита, реже пирротина, халькопирита и арсенопирита. Фрейбергит (Ag – 10,57–17,61 %), теллуриды Ag (штютцит, гессит), сульфотеллуриды Ag и Sb (бенлеонардит, цнигриит) и низкопробное (620–722 ‰) самородное золото отмечаются в виде микровключений в главных сульфидах. Проявление Au–Ag–Te-минерализации, наложенной на ранние пирит-арсенопиритовую и галенит-сфалеритовую, дает основания предполагать изменение условий рудообразования.

Единичные выделения теллуридов серебра (штютцит, гессит) овальной, таблитчатой, удлиненной форм наблюдаются в галените, а также в виде самостоятельных выделений в кварце вблизи галенита (рис. 5, *а*, *б*). Состав минералов соответствует теоретическому.

Редкие минералы – сульфотеллуриды Ag и Sb обнаружены в парагенезисе с теллуридами Ag во взаимном прорастании и заключены в галенит. Бенлеонардит образует удлиненные изометричные зерна в тесном контакте с штютцитом (см. рис. 3, *а*), а цнигриит – с гесситом (см. рис. 5, *б*). Размеры выделений – от 15 до 40 мкм. По рельефу и отражению изученные минералы одинаковы с галенитом, оптически однородны; цвет – белый, с заметным голубовато-серым оттенком по сравнению с галенитом, анизотропия слабая. По химическому составу приводимые минералы охватывают интервал от бенлеонардита до цнигриита, подтверждая непрерывность гомологического ряда между ними.

Самородное золото в парагенезисе с пиритом образует включения в сфалерите (рис. 5, *в*, *г*). Форма выделений ксеноморфная, удлиненная, прожилковидная. Редко отмечаются выделения в кварце. Проба самородного золота колеблется от 620–722 ‰, т. е. соответствует низкопробной разности. Незначительные концентрации Fe (до

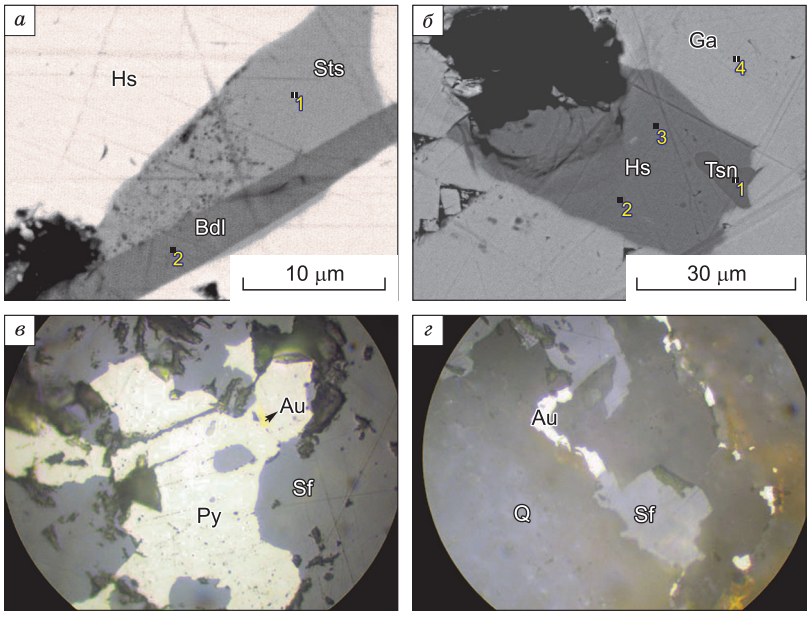


Рис. 5. Взаиммотношение минералов Ыныкчанского рудного поля:
а – бенлеонардит (Bdl) и штютцит (Sts) в галените (Ga); *б* – гессит (Hs) с включением цнигриита (Tsn) в галените (Ga); *в* – включение самородного золота (Au) в зерне пирита (Py), ассоциирующего со сфалеритом (Sf); *г* – прожилковидные выделения самородного золота (Au) в кварце (Q) в тесном срастании со сфалеритом (Sf).

Fig. 5. Mineral relations of the Ynykchansky field:
а – benleonardite (Bdl) and stutzite (Sts) in galena (Ga); *б* – hessite (Hs) with tsnigriite inclusion (Tsn) in galena (Ga); *в* – native gold (Au) inclusion in pyrite grain (Py); *г* – streaky inclusions of native gold (Au) in quartz (Q) in close intergrowth with sphalerite (Sf).

0,9 %), скорее всего, объясняются очень тесной ассоциацией золота с пиритом. Примесь Hg (до 0,46 %) в самородном золоте образует такие же концентрации, как и на соседних месторождениях (Задержнинское, Широкинское).

Физико-химические параметры и условия образования месторождений. Термобарогеохимические исследования непосредственно на наших объектах АЮМЗ проводили А.С. Борисенко и др. (1994 г.), Г.Н. Гамянин [17] и авторы статьи.

По данным Г.Н. Гамянина и др. [17], на месторождении Леводыбинское установлены высокие начальные температуры гомогенизации, отмечается гомогенизация CO_2 в жидкость и газ с критическими явлениями, а плотность флюида достаточно высока во всех генетических типах включений. По наличию высоких концентраций хлоридов при высоких температурах формирования месторождения Леводыбинское можно отнести к типичным месторождениям «granitoid related deposits». Для месторождения отмечаются повышенные температуры гомогенизации ГЖВ (до 500 °С) в жилах из роговиков ближайшего (100–200 м) экзоконтакта, по сравнению с жилами эндоконтакта и на удалении (300–400 м) от контакта с гранитоидами, установлен градиент понижения температур 15°/100 м на 300 м вертикального интервала. Полученные данные по изучению флюидных включений из жил свидетельствуют о высоких начальных температурах гомогенизации ГЖВ и концентрации солей мас. % экв. NaCl (46,0–1,1), малоглубинном уровне рудоотложения, нередко из кипящего водного флюида, хлоридно-калиевой специализации флюида, в целом незначительной роли углекислоты, устойчивом характере отношений концентраций компонентов при их различных концентрациях во флюидных включениях [17].

Для изучения условий формирования золотого оруденения Задержнинского месторождения ранее были проведены исследования флюидных включений в кварце пяти типов гидротермальных образований: 1) безрудных жил; 2) ранних Au–As-стратоидных жил, жильно-прожилкового и прожилково-вкрапленного оруденения секущего типа; 3) в турбидитах верхоянского комплекса с Au–Pb–Zn-минерализацией; 4) в дайках спессартитов; 5) в минерализованных зонах дробления. В двух последних оруденение Au-полисульфидного типа совмещено с поздней Au–Bi(Te)- и Au–Ag(Sb)-минерализацией [16].

Проведенные микротермометрические исследования флюидных включений в кварце показали, что ранние слабозолотоносные (Au–As) стратоидные жилы сформированы низко-солеными флюидами до 6,67 мас.% NaCl экв. в интервалах температур 130–291 °С. Главными особенностями рудообразующего флюида оруденения продуктивного этапа (Au–Pb–Zn + Au–Ag ± Au–Bi) являются повышение концентрации растворов до 10,61 мас.% NaCl экв., увеличение в газовой составляющей примесей CH_4 и N_2, более широкий диапазон температур гомогенизации (90–340 °С) и относительное их снижение от раннего мезотермального этапа к позднему близповерхностному.

Впервые проведенные микротермометрические исследования флюидных включений в кварце Ыныкчанского рудно-россыпного поля показали, что формирование оруденения происходило с участием двух типов флюидов.

При оптическом изучении были выделены первичные включения, которые по фазовому составу при комнатной температуре подразделены на три типа:

I тип: однофазовые – существенно газовые;

II тип: двухфазовые – газово-жидкие;

III тип: трехфазовые – углекислотно-водные.

I тип. Однофазовые ФВ – газовые включения, выполняющие 100 об. %, имеют размер от 5 до 50 мкм, чаще всего вытянутой формы.

II тип. Характеризуются присутствием двух фаз (газовая + жидкая) (рис. 6). В основной массе от 5 до 100 мкм. Газовый пузырек занимает 20–50 % от общего объема. Форма вакуолей округлая, угловатая, удлиненная, реже изометричная с отрицательной огранкой. Флюидные включения II типа в кварце гомогенизируются в жидкую фазу при температурах 158–188 °С. Они имеют температуру плавления льда от –1,5 до 3 °С, что соответствует концентрации солей 2,57–4,96 мас.% экв. NaCl.

III тип. Трехфазовые включения (газовая фаза+жидкая фаза+жидкость) – углекислотно-водного характера, округлые, почковидные, вытянутые, призматические (рис. 7). Газовый пузырек занимает 10–15 % от общего объема. Температуры гомогенизации первичных включений III типа изменяются в интервале от 270 до 330 °С. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 7,86–5,56 мас. % экв. NaCl. Судя по величине температуры эвтектики

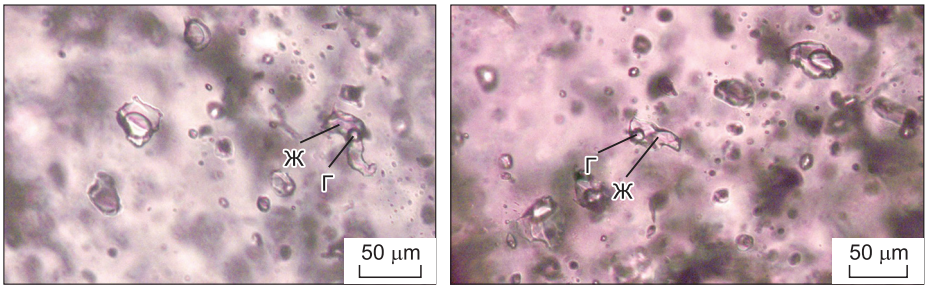


Рис. 6. Первичные двухфазовые флюидные включения. Г – газ; Ж – жидкость.

Fig. 6. Primary two-phase fluid inclusions. Г – gas; Ж – liquid.

(–23…–30 °С) в рудообразующих флюидах среди солей преобладают хлориды натрия и калия.

Гомогенизация углекислоты во флюидных включениях III типа, сингенетичных включениям II типа, происходит в жидкую фазу при температурах от +27,8 до +30,5 °С. Плавление углекислоты наблюдается в диапазоне от –57 до –57,9 °С. Температуры плавления ниже температуры плавления чистой углекислоты (–56,6 °С) связаны с наличием в ней небольшого количества примесей метана или азота. Плотность газовой фазы 0,58–0,64 г/см^3.

Давление флюида оценено для включений III типа Ыныкчанского рудно-россыпного поля и составляет 810–884 бар.

Условия формирования первичных включений углекислотно-водного типа из натрий-хлоридных растворов с соленостью 5,56–7,89 мас.% NaCl экв. при температурах 270–330 °С отвечает условиям образования ранней пирит-арсенопиритовой минеральной ассоциации мезотермального оруденения. Завершается процесс рудообразования отложением эпитермальной Au–Ag–Te *минерализации* при температурах 158–189 °С с понижением солености до 2,57–4,96 мас. %. NaCl экв.

В кварце Широкинского узла термобарогеохимические исследования провести не удалось.

Резюмируя вышеописанное приводим обобщающую диаграмму (рис. 8).

Изотопы свинца в сульфидах. Проблема источников вещества в рудных месторождениях – одна из важнейших фундаментальных задач. Наиболее информативными в этом отношении, как известно, являются изотопы свинца в сульфидах [18]. Присутствие свинца в сульфидных рудах современных гидротермальных полей позволяет использовать его изотопный состав для установления источника рудного вещества, что приводится во многих публикациях [19–22]. Авторами предпринята попытка установления

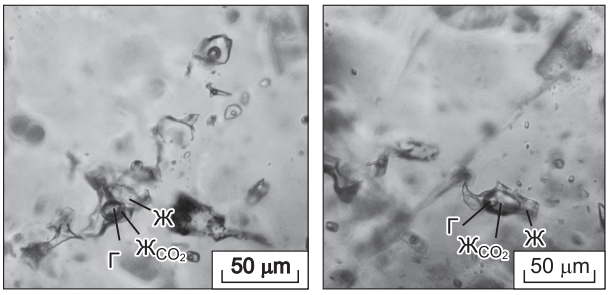


Рис. 7. Первичные трехфазовые флюидные включения. Г – газ; Ж – жидкость; $Ж_{CO_2}$ – жидкая углекислота.

Fig. 7. Primary three-phase fluid inclusions. Г – gas; Ж – liquid; $Ж_{CO_2}$ – liquid carbon dioxide.

источника вещества руд для Задержнинского месторождения и Ыныкчанского рудного поля. Анализы проведены в Институте докембрия РАН В.М. Саватенковым (табл. 1).

Фигуративные точки, представляющие изотопный состав Pb в сульфидах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское и золото-серебряно-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля, на диаграммах в координатах $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ образуют компактную группу точек (рис. 9).

Малая выборка не позволяет делать каких-либо окончательных заключений, тем не менее, возраст вмещающих осадочных пород близок к возрасту наложенной активизации, с которой ассоциирует формирование рудной минерализации. Изотопные характеристики Pb в сульфидах месторождения явно указывают на то, что рудный компонент был мобилизован из вмещающих пород без привноса мантийного компонента.

Следует отметить, что изотопные составы Pb в сульфидах Задержнинского месторождения на изотопных диаграммах Pb–Pb находятся в верхнем окончании тренда изотопных составов Pb в галенитах Нежданинского золоторудного место-

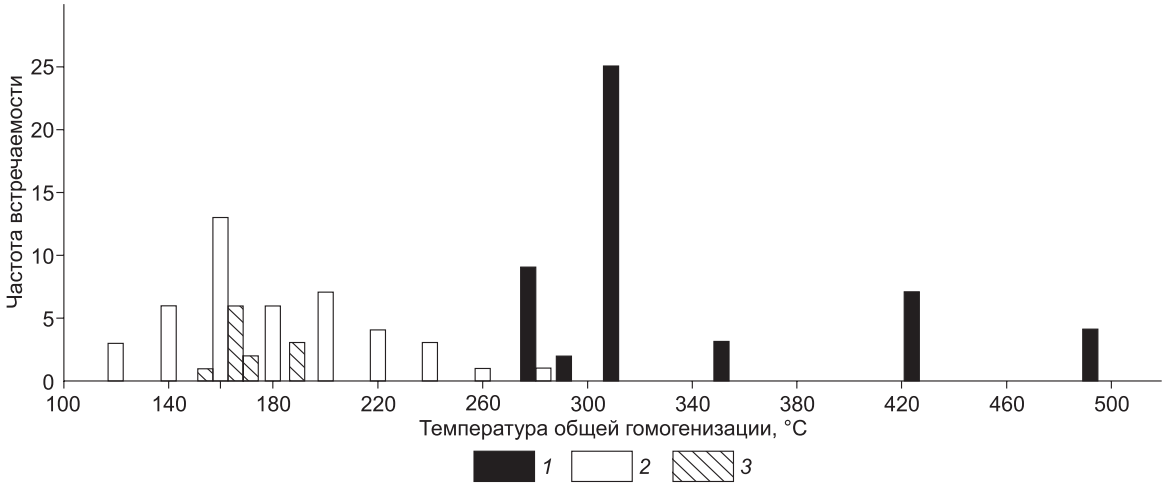


Рис. 8. Гистограмма температур гомогенизации во флюидных включениях в кварце золото-редкометалльных объектов Аллах-Юньской металлогенической зоны.
1 – Леводыбинский рудный узел, *2* – Задержнинское месторождение, *3* – Ыныкчанское рудно-россыпное поле.

Fig. 8. Histogram of homogenization temperatures in fluid inclusions in quartz of gold-rare metal objects of the Allah-Yun metallogenic zone.
1 – Levodybinsky ore cluster, *2* – Zaderzhninskoye deposit, *3* – Ynykchansky ore-placer field.

рождения, расположенного севернее Задержнинского месторождения [21], а такие же данные для сульфидов Ыныкчанского рудного поля – в нижнем окончании тренда, где располагаются изотопные составы в сульфидах серебро-полиметаллических объектов Тыры-Дыбинского узла, приводимые в публикации И.В. Чернышева и др. [21]. В своей работе авторы отмечали, что галениты с низкими отношениями $^{206}Pb/^{204}Pb$ и $^{207}Pb/^{204}Pb$ ассоциируют с серебро-полиметаллической ассоциацией, а галениты с высокими изотопными отношениями Pb – с золото-сульфидной минерализацией. Таким образом, источник золота соответствует более радиогенным составам Pb, отвечающим более молодому возрасту источника рудного вещества.

Здесь уместно отметить, что результаты изучения Rb-Sr изотопных систем магматических пород месторождения Задержнинское [23] показывают что гидротермальный флюид не связан с магматическими проявлениями рудного поля и имеет коровый генезис.

Обсуждение

Как видно из вышеописанного, теллуровая минерализация Аллах-Юньской зоны отличается

Таблица 1

Данные изотопного состава Pb в сульфидах из месторождения Задержнинское и Ыныкчанского рудного поля

Table 1

Pb isotopic composition data in sulfides from the Zaderzhninskoye deposit and the Ynykchan ore field

Номер образца	Минерал/Mineral	$^{206}Pb/^{204}Pb$	2σ, %	$^{207}Pb/^{204}Pb$	2σ, %	$^{208}Pb/^{204}Pb$	2σ, %
Задержнинское/Zaderzhninskoye							
2-40	Галенит/Galena	18,595	0,043	15,638	0,047	38,903	0,057
с-37-19а	Галенит/Galena	18,528	0,043	15,617	0,047	38,746	0,057
с-32-10	Пирит/Pyrite	18,577	0,042	15,630	0,046	38,863	0,056
Ыныкчанское/Ynykchan							
0 302 б	Галенит/Galena	18,2171	0,043	15,5906	0,047	38,2497	0,057
0 308 а	Галенит/Galena	18,2045	0,043	15,5833	0,047	38,2185	0,057

видовым разнообразием. В рудах установлено 20 минералов теллура: 10 теллуридов, 6 сульфотеллуридов и 4 теллурата, из которых 2 являются не идентифицированными (табл. 2). Обычно они образуют микро- и нановключения размером 1–20 мкм, исключением являются руды месторождений Одержимый и Тенистый, где размеры теллуровисмутита и/или тетрадимита достигают 3 мм. Форма зерен округло-овальная, вытянутая, игольчатая либо неправильная угловатая. Минералы теллура встречаются как в виде нановключений, так и в ансамблях из двух-трех теллуридов.

Преобладают минералы Te двух систем: Au–Ag–Te и Au–Bi–Te. Наибольшим разнообразием характеризуются теллуриды системы Au–Ag–Te. Установлено семь минеральных видов. Минералы чаще образуют включения в пирите, пирротине, галените, встречаются также в кварце (см. рис. 2). Среди минералов системы Au–Bi–Te наиболее распространены теллуриды группы тетрадимита (теллуровисмутит, тетрадимит, цумоит, сульфоцумоит и хедлейит). Теллуриды обычно наблюдаются в пирите, галените, пирротине и кварце (см. рис. 3).

Анализ видового состава минералов Te в золоторудных месторождениях АЮМЗ позволил выделить три минеральных типа: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, а также тип, в котором сочетается минерализация обеих систем и выделяемый, как смешанный (табл. 3).

Au–Bi–Te минеральный тип. Au–Bi–Te-тип распространен на рудопроявлениях Одержимый, Тенистый и Мугун. Здесь развиты теллуриды Bi, в основном теллуровисмутит, реже хедлейит, пильзенит и сульфотеллуриды Bi – тетрадимит и сульфоцумоит. Ассоциирующиеся минералы – мальдонит, самородный висмут, висмутин (табл. 4).

Au–Ag–Te минеральный тип. Au–Ag–Te-тип минерализации развит в рудопроявлениях Ыныкчанского поля АЮМЗ. Этот тип представлен чаще гесситом и штютцитом, реже встречаются сульфотеллуриды серебра и сурьмы – бенлеонардит и цнигриит, канфильдит (табл. 5). Теллуриды Bi отсутствуют.

Смешанный Au-Ag-Bi-Te минеральный тип. На месторождениях со смешанной Au–Ag–Bi–Te-минерализацией Задержнинского и Широкинского рудно-россыпного узла сосуществуют минералы обеих систем (табл. 6). Ассоциирующие минералы разнообразны – самородный висмут, галенит, акантит, сульфовисмутиды Pb

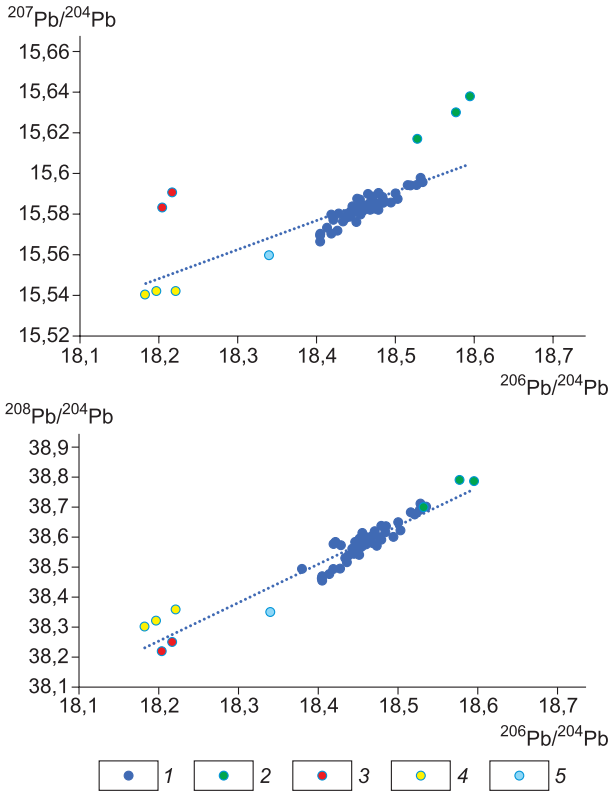


Рис. 9. Диаграммы $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ для сульфидов месторождений Аллах-Юньской металлогенической зоны:
1 – Нежданинское месторождение [21], *2* – Задержнинское месторождение, *3* – Ыныкчанское рудное поле, *4*, *5* – серебро-полиметаллические объекты Тыры-Дыбинского узла [21]: *4* – месторождение Менкече, *5* – рудопроявление Сентябрь.

Fig. 9. Diagrams $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ and $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ for sulfides of deposits of the Allakh-Yun metallogenic zone:
1 – Nezhdaninskoe deposit [21], *2* – Zaderzhninskoe deposit, *3* – Ynykchanskoe ore field, *4*, *5* polymetallic objects of the Tyry-Dybinsky cluster [21]: *4* – Menkeche deposit, *5* – September ore occurrence

из группы лиллианита. В минералах Te отмечаются примеси Cu, Sb и Fe, захваченные из окружающих минералов – пирита, теннантита и борнита.

Рудообразующие системы обогащенных Te золотосеребряных эпитермальных месторождений принадлежат к ***A-muny*** [24]. Их характерными особенностями являются тесная пространственная связь со щелочным магматизмом, типичная «мантийная» ассоциация элементов (Te, V и F), важная роль среди минералов теллуридов Au и Ag, флюорита и роскоэлита, а также [25] ванадийсодержащих сульфидов (колусит, некрасовит, стибиоколусит) и оксидов (касситерита). В разных классификациях такие месторождения

Таблица 2

Минералы теллура Аллах-Юньской металлогенической зоны

Table 2

Tellurium minerals of the Allah-Yun metallogenic zone

Теллуриды Tellurides	Сульфотеллуриды Sulphotellurides	Теллураты, оксиды Tellurites, Oxides
Сильванит ($(AuAg)_2Te_4$) Sylvanite	Te-Канфильдит ($Ag_8Sn(S,Te)_6$) Te-canfieldite	Смирнит (Bi_2TeO_5) Smirnite
Петцит (Ag_3AuTe_2) Petzite	Бенлеонардит ($Ag_8(Sb,AS)Te_2(S)_3$ Benleonardite	Теллураты Bi, Ag Tellurates Bi,Ag
Штютцит ($Ag_{4.7}Te$) Stutzite	Цнигриит ($Ag_9SbTe_3(S,Se)_3$ Tsnigriite	Оксиды Te, Sb Oxide Te, Sb
Гессит (Ag_2Te) Hessite	Тетрадимит Bi_2Te_2S Tetradymite	Бисмит (Bi_2O_3) Bismite
Теллуровисмутит (Bi_2Te_3) Tellurobismuthite	Сульфоцумоит (Bi_3Te_2S) Sulphotsumoite	
Хедлейит (Bi_7Te_3) Hedleyite	Жозеит B ($Bi4Te_2S$) Joseite B	
Цумоит (BiTe) Tsumoite		
Пильзенит (Bi_4Te_3) Pilsenite		
Алтаит (PbTe) Altaite		

выделялись как эпитермальный Au–Te–кварц–флюорит-адуляровый, щелочной Au–Ag эпитермальный, Au–Ag–Te жильный, Au–Ag–Te эпитермальный, «щелочной» тип эпитермальных месторождений Au [26, 27]. Характерной чертой таких рудообразующих систем является то, что эпитермальное оруденение на глубине часто сменяется Au–Cu порфировой минерализацией, ассоциирующей со щелочными габбро и сиенитами. Примерами месторождений А-типа являются такие объекты мирового класса как Крипл Крик (Колорадо, США, 673 т Au), Аккупан (Филиппины, 500 т Au, ~500 т Ag), Эмперор (Фиджи, >120 т Au), Лэдолам (Папуа-Новая Гвинея, 680 т Au), Кочбулак (Узбекистан) и др.

Многолетние исследования авторами геологии и минералогии Широкинского узла [28] показывают, что есть все признаки отнести благороднометалльное оруденение к А-типу золотосеребряных эпитермальных месторождений. В пользу данного предположения говорит следующий фактический материал: *геодинамическая позиция* – активная континентальная окраина; *ассоциирующие магматические породы* – ультракалиевые сиениты (K_2O – 7,93–15,05 *%); формы проявления гидротермальной минерализации* – зоны дробления, жилы в разломах; *рудные минералы* – Au, Te, Bi, ртутистое Ag, электрум, теллуриды Au, Ag, Pb, Bi, сульфотеллуриды Ag и Sb, пирит, сульфиды цветных металлов, сульфосоли, V-содержащие сульфостаннаты, станнаты, ванадаты, рутил, Te-содержащий канфильдит, Cu-содержащий аргиродит; жильные минералы – кварц, халцедон, барит, флюорит, карбонаты, каолинит; диагностические минералы – Au–Ag-теллуриды (петцит, сильванит), V-содержащие сульфостаннаты (Zn-некрасовит, Zn-колусит, кестерит), станнаты (висмирновит, моусонит,), ванадаты (карелианит), Te-содержащий канфильдит, флюорит; *геохимические признаки* – Au, Ag, Te, Bi, Sn, Pb, Zn; *смена на флангах* Au–Ag–Cu-порфировой минерализацией.

Сравнение пробности разных типов теллуридной минерализации показывает, что пробность самородного золота оруденения Au–Ag–Te-типа колеблется с 520 до 722 ‰, в смешанном типе – от 650 до 878 ‰ и, наконец, в Au–Bi–Te-типе пробность составляет 830–999 ‰. Таким образом,

Таблица 3

Типоморфные особенности серебро-висмут-теллуридной минерализации золотого оруденения Аллах-Юньской метталлогенической зоны

Table 3

Typomorphic features of silver-bismuth-telluride mineralization of gold mineralization of the Allah-Yun metallogenic zone

Месторождение Ore deposit	Мугун Mugun	Одержимый Oderzhimy	Задержнинское Zaderzhninskoe	Широкинский Shirokinskiy	Ыныкчанский Ynykchanskiy
Гранитоидный магматизм Granitoid magmatism	Экзоконтакт Exocontact	Экзоконтакт Exocontact	Невскрытый Unopened	Не проявлен Not manifested	Не проявлен Not manifested
Щелочной магматизм Alkaline magmatism				Ультракалиевые сиениты Ultrapotassium syenites	
Тип минерализации Mineralization type					
Au–Bi–Te-тип Au–Bi–Te type	Самородный Bi, мальдонит, хедлейит, цумоит Native Bi, maldonite, hedleyite, tsumoite	Висмутин, тетрадимит, самородный висмут, галеновисмутит Bismutin, tetradymite, native bismuth, galena bismuthite			
Смешанный Au–Ag–Bi–Te-тип Mixed Au–Ag–Bi–Te type			Самородный Bi, висмутин (Pb,Sb), хедлейит, сульфо-цумоит (Ag,Pb), жозеит B, теллуриты Ag и Bi, минералы лиллианит-густавитовой серии (Te,Sb), окислы: смирнит (Ag,Cu,Sb,Se), и бисмит (F, реже Te,Se) Native Bi, bismuthine (Pb, Sb), headleyite, sulphotsumoite (Ag, Pb), joseite B, tellurites Ag and Bi, minerals of lillianitegustavite series (Te, Sb), oxides: (Ag, Cu, Sb, Se), and bismit (F, less often Te, Se)	Самородный Bi, пильзенит (Sb,Pb), теллуриты Ag и Bi, петцит, сильванит, гессит (Se,Pb), алтаит, самородный Te (Ag), канфильдит Native Bi, pilsenite (Sb, Pb), tellurium Ag and Bi, petzite, hessite (Se, Pb), altaite, nativeny Te (Ag), canfieldite	

Окончание таблицы 3

Au–Ag–Te-тип Au–Ag–Te type					Цнигриит, бенлеонардит, гессит, штютцит, канфильдит Znigriite, benleonardtite, hessite, stutzite, canfieldite
Ассоциирующие минералы Associated minerals	Пирротин, арсенопирит, леллингит, молибденит, кобальтин, пентландит Pyrrhotite, arsenopyrite, löllingite, molybdenite, cobaltite, pentlandite	Арсенопирит, лёллингит, пирротин, пирит, кобальтин Arsenopyrite, löllingite, pyrrhotite, pyrithe, cobaltite	Арсенопирит Arsenopyrite	Галенит, пирротин, гринокит Galena, pyrrhotite, greenockite	Пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит Pyrite, arsenopyrite, sphalerite, galena
Пробность золота, ‰ Gold fineness, ‰	960–990	890–960	740–760	540–700	620–722
Физико-химические параметры Physicochemical parameters	280 °C	410–220 ºC	160 ºC	Не изучен	158–189 °C

Примечание. В скобках даны элементы-примеси.

Note. Admixtures are given in parentheses.

можно констатировать понижение пробности самородного золота от Au–Bi–Te-типа к Au–Ag–Te. Понижение пробности самородного золота согласуется с последовательностью и температурами образования минералов Te и ассоциирующих минеральных парагенезисов от мезотермального Au–Bi–Te (830–999 ‰) к эпитермальному Au–Ag–Te (<600 ‰) типу.

Г.Н. Гамяниным золото-редкометалльные месторождения отнесены к висмутовому [3], А.В. Кокиным – к золото-сульфотеллуридному минеральному типу, а по совокупности основных элементов-ассоциантов золота – As, Bi, Te, Co, W, редко Sb и Ag – к золото-теллур-висмутовому геохимическому типу [11].

В соответствии с правилом Гесса–Ферсмана, сочетание минералов в конкретной термодинамической (геологической) обстановке определяется геохимической ассоциацией элементов. Д.В. Рундквист [29] установил для стандартного ряда минеральных типов единую главную последовательность выделения геохимических парагенезисов, которая проявляется для различных гипо-, мезо-, эпитермальных месторождений золота: /Au–W/Au–Mo/Au–(Mo,Cu)/Au–As/Pb–Zn–Au–Ag/Au–Te/Au–Ag/Au–Sb/Au–Ag–Sb–As–Hg/. По примесному составу минералов Bi и геохимии минералов-ассоциантов висмутовой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны наблюдается смена гипо-мезотермального оруденения (W–Mo–As–Co–Ni) Мугунского и Одержимого проявлений в экзоконтактах гранитоидных интрузий, мезо-эпитермальным (Au–Pb–Ag–Sb) Задержнинского и эпитермальным (Ag–Au–Te–Sb) Широкинского узла и Ыныкчанского рудного поля.

Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низ-

Таблица 4

Средние составы (масс. %) теллуридов и ассоциирующих минералов Мугунского проявления (Au–Bi–Te-тип)

Table 4

Average compositions (wt%) of tellurides and associated minerals of the Mugun occurrence (Au–Bi–Te type)

Минерал Mineral	Au	Bi	Te	Сумма Total
Сам.висмут Native		100,4		100,4
Мальдонит Maldonite	64,66	36,49		101,16
Пильзенит Pilzenite		67,75	33,8	101,56

Таблица 5

Средний (масс. %) химический состав минералов теллура Ыныкчанского поля (Au–Ag–Te-тип)

Table 5

Average (wt%) chemical composition of tellurium minerals in the Ynykchansk field (Au–Ag–Te type)

Минерал Mineral	Ag	Sb	Te	S	Сумма Total
Теллуриды Au, Ag Tellurides of Au, Ag					
Гессит (3) Hessite	63,32		37,31		100,63
Штютцит (2) Stutzite	59,21		41,28		100,49
Сульфотеллуриды Ag, Sb, Pb Sulphotellurides Ag, Sb, Pb					
Цнигриит (1) Tsnigriite	61,71	7,91	24,52	5,47	99,61
Бенлеонардит (2) Benleonardite	62,43	9,17	19,72	7,3	98,62

Таблица 6

Средний (масс. %) химический состав минералов теллура Задержнинского месторождения и Широкинского узла (смешанный Au–Ag–Bi–Te тип)

Table 6

Average (wt%) chemical composition of tellurium minerals from the Zaderzhninskoe deposit and the Shirokinsky cluster (mixed Au–Ag–Bi–Te type)

Месторождение Ore deposite	Au	Ag	Fe	Pb	Bi	Sb	Sn	Se	Te	S	Сумма Total
Теллуриды Au, Ag *Tellurides of Au,Ag*											
Гессит Hessite											
Задержнинское (5) Zaderzhninskoe (5)		60,92	1,97						35,93	1,24	100,76
Широкинский (7) Shirokinskiy (7)		61,67							37,23		98,93
Штютцит Stutzite											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)		58,9							40,93		99,83
Широкинский (1) Shirokinskiy (1)		58,17							40,94		99,11
Петцит Petzite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)	24,27	43,4							31,86		99,53
Сильванит Sylvanite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)	24,81	13,13							61,97		99,91
Теллуриды Bi *Tellurides of Bi*											
Хедлейит											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)					78,07				21,88		99,95
Пильзенит Pilzenite											
Широкинский (31) Shirokinskiy (31)			0,17	0,82	68,86	0,72			30,31		100,88
Теллуриды Pb *Tellurides of Pb*											
Алтаит Altaite											
Широкинский (3) Shirokinskiy (3)				62					37,18		99,18

Окончание таблицы 6

Месторождение Ore deposite	Au	Ag	Fe	Pb	Bi	Sb	Sn	Se	Te	S	Сумма Total
Сульфотеллуриды Bi, Ag, Sb, Pb *Sulthotellurides Bi, Ag, Sb, Pb*											
Сульфоцумоит Sulthotsumoite											
Задержнинское (10) Zaderzhninskoe (10)		0,72		3,26	65,79				25,71	5,5	100,98
Жозеит B Joseite B											
Задержнинское (10) Zaderzhninskoe (10)					74,52				22,15	2,79	99,46
Канфильдит Canfieldite											
Задержнинское (2) Zaderzhninskoe (2)		59,68		11,45			5,92	1,59	10,72	11,34	100,69
Широкинский (2) Shirokinskiy (2)		61,48					9,19		18,67	9,43	98,77
Бенлеонардит Benleonardtite											
Широкинский (2) Shirokinskiy (2)		62,5				9,1			18,1	9,6	99,3

котемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °С. Ыныкчанское рудное поле, судя по температуре образования 200–150 °С, обладает чертами эпитермального оруденения. Смешанный Au–Ag–Bi–Te (Задержнинское месторождение) минеральный тип образован из гетерогенных растворов и имеет разную глубину формирования.

Данные по изотопам Pb в сульфидах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское и золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля на диаграммах в координатах $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ образуют компактную группу точек. При этом показали соответствие с таковой Нежданинского золоторудного месторождения у данных Задержнинского месторождения, а у Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла.

Наблюдаемые на графиках соотношения изотопного состава Pb галенита [30] предполагают, что основным источником поступления свинца в гидротермальные системы Задержнинского месторождения и Ыныкчанского рудного поля служили терригенно-карбонатные толщи.

Возраст магматических пород и золотого оруденения. Из всех описываемых объектов достоверный возраст магматических пород и оруденения определен для Леводыбинского узла [31] и Задержнинского месторождения. Дыбинский гранитный шток, в пределах которого локализована серия Au-редкометалльных проявлений (Тенистое, Контактовое и Одержимое), имеет раннемеловой возраст (122,3±0,4 млн лет биотит, $^{40}Ar/^{39}Ar$ [32]), а возраст образца серицита, полученного из призальбандовой оторочки в кварцевой жиле с Au–Bi-минерализацией Дыбинского рудного узла, установлен 124,8±1,5 млн лет ($^{40}Ar/^{39}Ar$)[31].

Возраст Тарбаганнахского плутона, с которым генетически связывается оруденение, связанное с интрузивами рудопроявления Мугун, как описано выше, оценивается 123 ± 1 млн лет [33].

Возраст основного продуктивного золото-полисульфидного оруденения Задержнинского ме-

сторождения определен методом $^{40}Ar/^{39}Ar$ (аналитик А.В. Травин, ИГМ СО РАН) по серициту из кварца рудной зоны 20, расположенной на южном фланге месторождения [34]. Полученная датировка 123,5±1,6 млн лет близка ранее установленным возрастам крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья. Это позволяет предположить, что формирование золотополисульфидного минерального типа золотокварцевого оруденения Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.

В пределах Широкинского рудно-россыпного узла найдены ультракалиевые сиениты (K_2O до 15,03 %) [12]. По Rb–Sr-изотопным исследованиям изохронный возраст приводимых пород равен 151±3 млн лет. По нашему предположению, оруденение Широкинского узла имеет парагенетическую связь с этими магматическими породами.

В пределах Ыныкчанского поля на современном уровне магматические породы не выявлены.

По минеральному составу золоторудные месторождения и проявления имеют схожие черты с Au–Ag-объектами Куларского [35] и Верхнеиндигирского районов Верхояно-Колымской складчатой области [36] и Охотско-Чукотского вулканогенного пояса [37], Приморья [38], но оно также близко и к Au–Ag–Bi–Te-месторождениям Алданского щита [39, 40] и Центральной Азии [41].

В качестве наглядного примера отработки компактного высокопродуктивного Au–Ag–Bi–Te-объекта в Кыргызстане приведем месторождение Джеруй, которое относится к Суусамыр-Караджоргинскому золоторудному поясу. Месторождение приурочено к массиву кварцевых диоритов и монцодиоритов (O_{1-2}), прорывающих кварцево-слюдистые гнейсы, мигматиты, известковистые сланцы ортотауской свиты (R_2) [42]. Субвертикальная, трубообразная структура месторождения (протяженность на глубину до 900 м), в центральной части выполненная кварцем, к периферии постепенно переходит в кварцевый штокверк и далее в кварцевое прожилкование в измененных кварцевых диоритах [43].

Оруденение относится к золотокварцевому убогосульфидному минеральному типу; рудные минералы (составляющие 1–2 %), представлены пиритом, халькопиритом, галенитом, минералами висмута (тетрадимитом, висмутином), реже халькозином, бурнонитом [44]. Самородное золото образует срастания с кварцем (до 85 %), висмутином и тетрадимитом. Пробность золота 850–957 ‰, преобладает мелкое золото (менее 0,2 мм), размеры выделений от 0,001 до 0,2 мм. В золотоносных рудах как сопутствующие компоненты устанавливаются серебро (порядка 1 г/т), висмут – 0,014 %, что хорошо коррелируется с золотоносностью, теллур – 0,0016 %. В интенсивно окварцованных центральных частях штокверков содержания золота от 5 до 30 г/т (редко до 50–100 г/т), менее окварцованные периферические зоны менее золотоносны (1–5 г/т), зальбанды рудных тел окварцованы и золотоносны слабо (до 1 г/т).

17 марта 2021 года при участии президентов Кыргызской Республики и Российской Федерации был запущен Талассский золоторудный комбинат, основу сырьевой базы которого составят руды месторождения Джеруй; ежегодная добыча золота составит 5,5 т. Российская компания «Альянс Алтын» (дочерняя компания ОАО «Восток-геологодобыча»), входящая в состав корпорации «Русская платина», владеет лицензией на право пользования недрами месторождения Джеруй до 2035 г.

Заключение

Систематизация и обобщение известных и новых данных по Te-минерализации позволили установить видовое разнообразие и расширить территорию распространения Au–Ag–Bi–Te-минерализации в Аллах-Юньской металлогенической зоне. При этом минералы теллура развиты во всех известных типах гидротермальных образований. Данные по характеристикам флюидных включений позволяют отнести Au–Ag–Te-руды к низкотемпературным, Au–Bi–Te – мезотермальным, наиболее высокую температуру образования руд показывает оруденение Леводыбинского узла – 365–276 °C. Составы изотопов Pb в галенитах золото-полисульфидной ассоциации месторождения Задержнинское на диаграммах в координатах $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/^{204}Pb$ и $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ показали соответствие с таковой Нежданинского золоторудного месторождения, а данные золото-серебро-теллуровой ассоциации Ыныкчанского рудного поля – с серебро-полиметаллическими объектами Тыры-Дыбинского узла. По соотношениям изотопного состава Pb галенита предполагается, что основным источником поступления

свинца в гидротермальные системы служили терригенно-карбонатные толщи.

Формирование золотополисульфидного минерального типа Леводыбинского узла и Задержнинского месторождения происходило синхронно с внедрением крупных гранитоидных плутонов Южного Верхоянья.

Золото находится не только в невидимом состоянии в пирите и в виде самородного золота разной пробности, но также входит в состав разнообразных соединений: калаверита ($AuTe_2$) и сильванита $(AuAg)_2Te_4$, петцита (Ag_3AuTe_2) и мальдонита (AuBi). Au–Ag–Bi-теллуриды являются важными вспомогательными минералами, несущими определенную долю запаса золота. При этом из некоторых объектов также могут попутно извлекаться серебро, теллур и висмут.

Литература

1. *Кокин А.В*. Золоторудное проявление Одержимый – перспективный объект для промышленного освоения золота, висмута и теллура// Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII всероссийской науч.-практич. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. I. С. 90–95.

2. *Окунев А.Е., Данилов В.П.* Новые проявления золото-кварц-сульфидной формации Аллах-Юньской металлогенической зоны // Вестник ЯГУ. 2010. Т. 7, № 1. С. 41–46.

3. *Гринберг Г.А., Бахарев А.Г., Гамянин Г.Н. и др.* Гранитоиды Южного Верхоянья. М.: Наука, 1970. 216 с.

4. *Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А.* Золото-редкометалльные месторождения Востока России // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17, № 3. С. 94–103.

5. *Кокин А.В.* Минеральные типы золоторудных месторождений Юго-Восточной Якутии // Отечественная геология. 1994. № 8. С. 10–17.

6. *Кокин А.В.* Золото-редкометалльное оруденение Южного Верхоянья. Проблемы поисков и перспективы освоения месторождений // Геодинамика, магматизм и минерагения континентальных окраин Севера Пацифики. Магадан, 2003. Т. 3. С. 111–115.

7. *Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.

8. *Кокин А.В.* Рудно-геохимическая зональность эндогенных рудных месторождений как следствие распространенности, периодичности и термодинамических свойств элементов // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. Вып. 3 (28). С. 43–55.

9. *Manhes G., Allegre C.J., Provost A.* U–Th–Pb systematics of the eucrite «Juvinas». Precise age determination and evidence for exotic lead // Geochem. Cosmochem. Acta // 1984. Vol. 48, No. 12. P. 2247–2264.

10. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Холмогоров А.И.* Структура и минералогия Задержнинского золоторудного поля // Отечественная геология. 2005. № 5. С. 23–28.

11. *Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Leskova N.V.* Gold and Silver tellurides on Shirokinsky Ore-and-Placer Cluster, the Sette-Daban Ridge, Yakutia // Geology of Ore Deposits. 2011. Vol. 53, № 7. P. 620–625

12. *Анисимова Г.С., Зайцев А.И., Заякина Н.В.* Ультракалиевые породы Широкинского рудно-россыпного узла Аллах-Юньского металлогенического пояса // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 89–95.

13. *Анисимова Г.С., Лыткин С.Ф.* Коренная золотоносность и сереброносность Ыныкчанского рудноросыпного поля Аллах-Юньской металлогенической зоны // Отечественная геология. 2013. № 5. С. 10–18.

14. *Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А.* Au-Ag-Te-Bi-REE-U минерализация Мугунского рудопроявления // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с, ч. 1. С. 41–45.

15. *Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А.* Золото-теллур-висмутовая минерализация месторождения Задержнинское (Южное Верхоянье, Восточная Якутия) // Минералогия. 2016. № 2. С. 10–19.

16. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Зайцев А.И.* Задержнинское золоторудное месторождение: минеральный состав, флюидные включения, возраст формирования (Южное Верхоянье) // Геология и геофизика. 2018. № 10. С. 1606–1622.

17. *Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю.* Изотопно-геохимические особенности рудообразующего флюида золотовисмутовых месторождений Северо-Востока России // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII всероссийской науч.-практич. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. I. С. 46–51.

18. *Чернышев И.В., Чугаев А.В., Шатагин* К.Н. Высокоточный изотопный анализ Pb методом многоколлекторной ICP-масс-спектрометрии с нормированием по $^{205}Tl^{203}Tl$: оптимизация и калибровка метода для изучения вариации изотопного состава Pb // Геохимия. 2007. № 11. С. 1155–1168.

19. *Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г. и др.* Изотопный состав по данным высокоточного MC-ICP-MS метода и источники вещества крупномасштабного благороднометалльного месторождения Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 6. С. 550–559.

20. *Чугаев А.В., Чернышев И.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р.* Свинцово-изотопные характеристики

сульфидов крупных месторождений золота Байкало-Патомского нагорья (Россия) по данным высокоточного MC-ICP-MS анализа свинца // Докл. РАН. 2010. Т. 434, № 5. С. 677–680.

21. *Чернышев И.В., Бортников Н.С., Чугаев А.В., Гамянин Г.Н., Бахарев А.Г.* Источники металлов крупного орогенного золоторудного Нежданинского месторождения (Якутия), Россия) результаты высокоточного изучения изотопного состава свинца (MCCICPPMS) и стронция // Геология рудных месторождений. 2011. Т. 53, № 5. С. 395–418.

22. *Чугаев А.В., Знаменский С.Е.* Свинцово-изотопные характеристики месторождения золота Миндяк (Южный Урал): к вопросу об источниках металлов // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 1. С. 57–67.

23. *Кондратьева Л.А., Зайцев А.И., Анисимова Г.С.* Параметры Rb-Sr систем магматических пород Задержнинского золоторудного поля (Южное Верхоянье) // Отечественная геология. 2011. № 5. С. 11–19.

24. *Коваленкер В.А.* Рудообразующие системы эпитермальных золото-серебряных месторождений: концепции, реальность, модели // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 160–184.

25. *Коваленкер В.А.* Минералого-геохимические закономерности формирования эпитермальных руд золота и серебра: Дисс. д. г.-м. н. М.: ИГЕМ РАН, 1995. 102 с.

26. *Bonhan H.F., Jr.* Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits a review // Int. Volcanol. Congress. Hamilton, New Zealand. Symp. 5. Febrary 1986. P. 13–18.

27. *Richards J.P.* Alcalic-type epithermal gold deposits – a review // Magmas, fluid and ore deposits / J.E.H. Thomsson, ed. Minerflogical Assoc. of Canada. Short course ser. 1995. Vol. 23. P. 367–400.

28. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Стручков К.К.* Комплексная рудоносность и алмазоносность Белореченской зоны Сетте-Дабанского палеорифта // Отечественная геология. 2010. № 6. С. 3–11.

29. *Рундквист Д.В.* Фактор времени при формировании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, этапы и стадии рудообразования // Геология рудных месторождений. 1997. № 1. С. 11–24.

30. *Чугаев А.В., Чернышев И.В.* Pb–Pb изотопная систематика орогенных месторождений золота Байкало-Патомского складчатого пояса (Северное Забайкалье, Россия) и оценка роли неопротерозойской коры в их формировании // Геохимия. 2017. № 11. С. 1027–1040.

31. *Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G.* Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and trace element geochemistry // Geology. 2001. Vol. 29, No. 2. P. 167–170.

32. *Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королева О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В.* Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. № 10. С. 1542–1563.

33. *Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L.* Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 2009, Vol. 4. P. 71–84.

34. *Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Бахарев А.Г., Травин А.В., Прокопьев А.В., Борисенко А.С.* Задержнинское золоторудное месторождение (Южное Верхоянье): геологическая позиция, вещественный состав руд и возраст оруденения // Материалы Всероссийской конференции «Новые и нетрадиционные типы месторождений полезных ископаемых Прибайкалья и Забайкалья», Улан-Удэ, 10–12 ноября 2010 г. Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2010. С. 105–106.

35. *Анисимова Г.С., Москвитин С.Г.* Редкие минералы и интерметаллические соединения в золоторудных формациях Куларского поднятия // Редкие самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск: ЯНЦ, 1992. С. 40–49.

36. *Гамянин Г.Н.* Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 2001. 222 с.

37. *Савва Н.Е.* Минералогия серебра Северо-Востока России. М.:Триумф, 2019. 541 с.

38. *Лотина А.А.* Висмут-теллуровая минерализация участка Болотистый (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 97–107.

39. *Анисимова Г.С., Кардашевская В.Н., Соколов Е.П.* Золоторедкометалльное (Au-Mo-Te-Bi) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия) // Отечественная геология. 2017. № 5. С. 12–22.

40. *Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н.* Золотое оруденение лебединского и куранахского типов в Верхнеамгинском районе (Южная Якутия) // Отечественная геология. 2018. № 5. С. 3–13.

41. *Конеев Р.И., Халматов Р.А., Мун Ю.С.* Наноминералогия и наногеохимия руд золоторудных месторождений Узбекистана // Геология рудных месторождений. 2010. Вып. 52, № 8. С. 755–766.

42. *Никоноров В.В., Караев Ю.В., Борисов Ф.И. и др.* Золото Кыргызстана. Геология. Условия локализации. Бишкек: Наси, 2004. 271 с.

43. *Дженчураева Р.Д., Пак Н.Т., Никоноров В.В., Ивлева Е.А.* Золоторудные месторождения Кыргызстана. Бишкек, 2020. 494 с.

44. *Мустафин С.К., Пономарева А.М., Миколайчук Г.А. и др.* Минералого-технологическая типизация золотосодержащих руд // Роль технологической минералогии в расширении сырьевой база СССР. Челябинск: ВМО, 1986. С. 667–668.

Поступила в редакцию 11.07.2021
Принята к публикации 12.08.2021

Об авторах

АНИСИМОВА Галина Семеновна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,
https://orcid.org/ 0000-0002-1275-5393, gsanisimova1952@mail.ru;

КОНДРАТЬЕВА Лариса Афанасьевна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,
https://orcid.org/0000-0001-9347-6427, lkon12@yandex.ru;

КАРДАШЕВСКАЯ Вероника Николаевна, младший научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия,
https://orcid.org/0000-0003-1069-2533, kardashevskaya92@mail.ru;

МУСТАФИН Сабир Кабирович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Башкирский государственный университет, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32, Россия,
https://orcid.org /0000-0002-4241-4004, sabir.mustafin@yandex.ru.

Информация для цитирования

Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н., Мустафин С.К. Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 5–30. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-5–30

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-5–30

Features of the gold-silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone (North-East of Russia)

G.S. Anisimova[1,*], L.A. Kondratieva[1], V.N. Kardashevskaia[1], S.K. Mustafin[2]

[1]Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
[2]Bashkir State University, Ufa, Russia

**gsanisimova1952@mail.ru*

Abstract. *The features of the substance composition, physicochemical parameters and conditions of the formation of gold mineralization of deposits and ore occurrences with the silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone are reported. The ores were determined to contain 20 tellurium minerals: 10 tellurides, 6 sulfotellurides, and 4 tellurates, two of them are unidentified. Usually they form micro- and nanoinclusions 1–20 μm in size, except for the ores of the Oderzhimyi and Tenistyi deposits, in which the size of tellurobismuth and/or tetradimite reach 3 mm. Tellurium minerals of two systems dominate: Au–Bi–Te and Au–Ag–Te. Gold is present in association with tellurium telluride minerals: calaverite ($AuTe_2$), sylvanite $(AuAg)_2Te_4$ and petzite (Ag_3AuTe_2). Three types of gold and silver-bismuth-tellurium mineralization are revealed in the gold ore deposits of the Allakh-Yun metallogenic zone: Au–Ag–Te, Au–Bi–Te, and the mixed type, combining the mineralization of both system. A decrease in the fineness of*

gold corresponds to the sequence and temperatures of the formation of Te minerals and associating mineral parageneses from mesothermal Au–Bi–Te (830–999 ‰) to epithermal Au–Ag–Te (<600 ‰). The data on the characteristic of fluid inclusions allow us to relate Au–Ag–Te ores to low-temperature, Au–Bi–Te – to mesothermal; the highest temperature of ore formation is demonstrated by the mineralization of the Levodybinskiy ore cluster: 365–276 °C. Ynykchanskoye ore field, judging from formation temperature 200–150 °C, possesses the features of epithermal mineralization. The mixed Au–Ag–Bi–Te (the Zaderzhninskoye deposit) mineral type is composed of heterogeneous solutions. The compositions of Pb isotopes in galena of the gold-polysulfide association of the Zaderzhninskoye in the diagrams composed in the coordinates $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{207}Pb/204Pb$ and $^{206}Pb/^{204}Pb$–$^{208}Pb/^{204}Pb$ demonstrated the agreement with the corresponding data on the Nezhdaninskoye gold deposit, and the data on the gold–silver–tellurium association of the Ynykchanskoye ore field – with the silver-polymetallic objects of the Tyry-Dybinskiy cluster. Genetic and paragenetic association of Au–Bi–Te mineralization with granitoid magmatism is assumed, while Au–Ag–Te mineralization is assumed to be associated with alkaline magmatism. The formation of the gold-polysulfide mineral type of the Levodybinskiy cluster and the Zaderzhninskoye deposit proceeded synchronously with the intrusion of large granitoid plutons of the Southern Verkhoyan territory. The gold ore deposits and occurrences in the Allakh-Yun metallogenic zone have some similar features in their mineral composition with the Au–Ag objects of the Verkhoyan-Kolyma folded zone and the Okhotsk-Chukotka volcanic belt, Primorye, and are close to the Au–Ag–Bi–Te deposits of the Aldanian shield and Central Asia. The description of the Dzheruy, a compact highly productive Au–Ag–Bi–Te deposit which is at the start of its intense development in Kyrgyzstan, is presented as an example. The studies revealed that Au–Te mineralization is spread within the boundaries of the Allakh-Yun metallogenic zone. The Au–Ag–Bi tellurides are essential auxiliary minerals revealing the physicochemical conditions of ore formation in the deposits. Silver, tellurium and bismuth may also be extracted as accompanying components from several deposits.

Keywords: gold–tellurium–bismuth mineralization, tellurides, gold, Au–Bi–Te, Au–Ag–Te and mixed Au–Ag–Bi–Te mineral types, granitoid and alkaline magmatism, native bismuth, tetradimite, petzite, fluid inclusions, lead and sulfide sulfur isotopes, Zaderzhninskoye deposit, Mugun ore occurrence, Ynykchanskoye field, Shirokinskiy cluster, Allakh-Yun metallogenic zone.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project № 18-45-140045 r_a) and partly according to the research plan of Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS).*

References

1. *Kokin A.V.* Zolotorudnoye proyavleniye Oderzhimyy – perspektivnyy obyekt dlya promyshlennogo osvoyeniya zolota. vismuta i tellura// Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Severo-Vostoka Rossii: mat-ly VII vserossiyskoy nauch.-praktich. konf., posvyashchennoy 60-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN. 5–7 aprelya 2017 g. Yakutsk: Izdatelskiy dom SVFU. 2017. Vol. I. P. 90–95.

2. *Okunev A.E., Danilov V.P.* Novyye proyavleniya zoloto-kvarts-sulfidnoy formatsii Allakh-Yunskoy metallogenicheskoy zony // Vestnik YaGU. 2010. Vol. 7, No. 1. P. 41–46.

3. *Grinberg G.A., Bakharev A.G., Gamyanin G.N. i dr.* Granitoidy Yuzhnogo Verkhoyania. M.: Nauka 1970. 216 p.

4. *Gamyanin G.N., Goncharov V.I., Goryachev N.A.* Zoloto-redkometalnyye mestorozhdeniya Vostoka Rossii // Tikhookeanskaya geologiya. 1998. Vol. 17, No. 3. P. 94–103.

5. *Kokin A.V.* Mineralnyye tipy zolotorudnykh mestorozhdeniy Yugo-Vostochnoy Yakutii // Otechestvennaya geologiya. 1994. No. 8. P. 10–17.

6. *Kokin A.V.* Zoloto-redkometallnoye orudeneniye Yuzhnogo Verkhoyania. Problemy poiskov i perspektivy osvoyeniya mestorozhdeniy / Geodinamika. magmatizm i minerageniya kontinentalnykh okrain Severa Patsifiki. Magadan. 2003. Vol. 3. P. 111–115.

7. *Borisenko A.S.* Izucheniye solevogo sostava gazovo-zhidkikh vklyucheniy v mineralakh metodom kriometrii // Geologiya i geofizika. 1977. No. 8. P. 16–27.

8. *Kokin A.V.* Rudno-geokhimicheskaya zonalnost endogennykh rudnykh mestorozhdeniy kak sledstviye rasprostranennosti, periodichnosti i termodinamicheskikh svoystv elementov // Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya. 2015. Iss. 3 (28). P. 43–55.

9. *Manhes G., Allegre C.J., Provost A.* U–Th–Pb systematics of the eucrite «Juvinas». Precise age determination and evidence for exotic lead // Geochem. Cosmochem. Acta // 1984. Vol. 48, No. 12. P. 2247–2264.

10. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Kholmogorov A.I.* Struktura i mineralogiya Zaderzhninskogo zolo-

torudnogo polya // Otechestvennaya geologiya. 2005. No. 5. P. 23–28.

11. *Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Leskova N.V.* Gold and Silver tellurides on Shirokinsky Ore-and-Placer Cluster, the Sette-Daban Ridge, Yakutia // Geology of Ore Deposits. 2011. Vol. 53, № 7. P. 620–625

12. *Anisimova G.S., Zaytsev A.I., Zayakina N.V.* Ultrakaliyevyye porody Shirokinskogo rudno-rossypnogo uzla Allakh-Yunskogo metallogenicheskogo poyasa // Otechestvennaya geologiya. 2014. No. 5. P. 89–95.

13. *Anisimova G.S., Lytkin S.F.* Korennaya zolotonosnost i serebronosnost Ynykchanskogo rudno-rossypnogo polya Allakh-Yunskoy metallogenicheskoy zony // Otechestvennaya geologiya. 2013. No. 5. P. 10–18.

14. *Anisimova G.S., Kondratyeva L.A.* Au-Ag-Te-Bi-REE-U mineralizatsiya Mugunskogo rudoproyavleniya // Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Sibiri. 2014. No. 3s. Ch. 1. P. 41–45.

15. *Anisimova G.S., Kondratyeva L.A.* Zoloto-tellur-vismutovaya mineralizatsiya mestorozhdeniya Zaderzhninskoye (Yuzhnoye Verkhoyanye. Vostochnaya Yakutiya) // Mineralogiya. 2016. No. 2. P. 10–19.

16. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Zaytsev A.I.* Zaderzhninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye: mineralnyy sostav, flyuidnyye vklyucheniya, vozrast formirovaniya (Yuzhnoye Verkhoyanye) // Geologiya i geofizika. 2018. No. 10. P. 1606–1622.

17. *Gamyanin G.N., Vikentyeva O.V., Prokofyev V.Yu.* Izotopno-geokhimicheskiye osobennosti rudoobrazuyushchego flyuida zolotovismutovykh mestorozhdeniy Severo-Vostoka Rossii // Geologiya i mineralno-syryevyye resursy Severo-Vostoka Rossii: mat-ly VII vserossiyskoy nauch.-praktich. konf. posvyashchennoy 60-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN. 5–7 aprelya 2017 g. Yakutsk: Izdatelskiy dom SVFU. 2017. Vol. I. P. 46–51.

18. *Chernyshev I.V., Chugayev A.V., Shatagin K.N.* Vysokotochnyy izotopnyy analiz Pb metodom mnogokollektornoi ICP-mass-spektrometrii s normalizatsiyey po 205Tl203Tl: optimizatsiya i kalibrovka metoda dlya izucheniya variatsii izotopnogo sostava Pb // Geokhimiya. 2007. No. 11. P. 1155–1168.

19. *Chernyshev I.V., Chugayev A.V., Safonov Yu.G. i dr.* Izotopnyy sostav po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS metoda i istochniki veshchestva krupnomasshtabnogo blagorodnometallnogo mestorozhdeniya Sukhoy Log (Rossiya) // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2009. Vol. 51, No. 6. P. 550–559.

20. *Chugayev A.V., Chernyshev I.V., Safonov Yu.G., Saroyan M.R.* Svintsovo-izotopnyye kharakteristiki sulfidov krupnykh mestorozhdeniy zolota Baykalo-Patomskogo nagoria (Rossiya) po dannym vysokotochnogo MC-ICP-MS analiza svintsa // Dokl. RAN. 2010. Vol. 434, No. 5. P. 677–680.

21. *Chernyshev I.V., Bortnikov N.S., Chugayev A.V., Gamyanin G.N., Bakharev A.G.* Istochniki metallov krupnogo orogennogo zolotorudnogo Nezhdaninskogo mestorozhdeniya (Yakutiya). Rossiya) rezultaty vysokotochnogo izucheniya izotopnogo sostava svintsa (MCCICPPMS) i strontsiya // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2011. Vol 53. No. 5. P. 395–418.

22. *Chugayev A.V., Znamenskiy S.E.* Svintsovo-izotopnyye kharakteristiki mestorozhdeniya zolota Mindyak (Yuzhnyy Ural): k voprosu ob istochnikakh metallov // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2018. Vol. 60, No. 1. P. 57–67.

23. *Kondratyeva L.A., Zaytsev A.I., Anisimova G.S.* Parametry Rb-Sr sistem magmaticheskikh porod Zaderzhninskogo zolotorudnogo polya (Yuzhnoye Verkhoyanye) // Otechestvennaya geologiya. 2011. No. 5. P. 11–19.

24. *Kovalenker V.A.* Rudoobrazuyushchiye sistemy epitermalnykh zoloto-serebryanykh mestorozhdeniy: kontseptsii, realnost, modeli//Problemy rudnoy geologii. petrologii. mineralogii i geokhimii. M.:IGEM RAN, 2004. P. 160–184.

25. *Kovalenker V.A.* Mineralogo-geokhimicheskiye zakonomernosti formirovaniya epitermalnykh rud zolota i serebra: Dis. d. g.m. n. M.: IGEM RAN, 1995. 102 p.

26. *Bonhan H.F., Jr.* Models for volcanic-hosted epithermal precious metal deposits a review // Int. Volcanol. Congress. Hamilton, New Zealand. Symp. 5. Febrary 1986. P. 13–18.

27. *Richards J.P.* Alcalic-type epithermal gold deposits–a review // Magmas, fluid and ore deposits / J.E.H. Thomsson, ed. Minerflogical Assoc. of Canada. Short course ser. 1995. Vol. 23. P. 367–400.

28. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Struchkov K.K.* Kompleksnaya rudonosnost i almazonosnost Belorechenskoy zony Sette?Dabanskogo paleorifta // Otechestvennaya geologiya. 2010. No. 6. P. 3–11.

29. *Rundkvist D.V.* Faktor vremeni pri formirovanii gidrotermalnykh mestorozhdeniy: periody, epokhi, etapy i stadii rudoobrazovaniya // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 1997. No. 1. P. 11–24.

30. *Chugayev A.V., Chernyshev I.V.* Pb–Pb izotopnaya sistematika orogennykh mestorozhdeniy zolota Baykalo-Patomskogo skladchatogo poyasa (Severnoye Zabaykalye. Rossiya) i otsenka roli neoproterozoyskoy kory v ikh formirovanii // Geokhimiya. 2017. No. 11. P. 1027–1040.

31. *Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G.* Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and trace element geochemistry // Geology. 2001. Vol. 29, No. 2, P. 167–170.

32. *Prokopyev A.V., Borisenko A.S., Gamyanin G.N., Fridovskiy V.Yu., Kondratyeva L.A., Anisimova G.S,. Trunilina V.A., Vasyukova E.A., Ivanov A.I., Travin A.V., Koroleva O.V., Vasilyev D.A., Ponomarchuk A.V.* Vozrastnyye rubezhi i geodinamicheskiye obstanovki formirovaniya mestorozhdeniy i magmaticheskikh obra-

zovaniy Verkhoyano-Kolymskoy skladchatoy oblasti // Geologiya i geofizika. 2018. No. 10. P. 1542–1563.

33. *Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L.* Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // Stephan Mueller Spec. Publ. Ser. 2009. Vol. 4. P. 71–84.

34. *Kondratyeva L.A., Anisimova G.S., Bakharev A.G., Travin A.V., Prokopyev A.V., Borisenko A.S.* Zaderzhninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye (Yuzhnoye Verkhoyanye): geologicheskaya pozitsiya. veshchestvennyy sostav rud i vozrast orudeneniya // Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Novyye i netraditsionnyye tipy mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh Pribaykalia i Zabaykalia». Ulan-Ude. 10–12 noyabrya 2010 g. Ulan-Ude: GIN SO RAN, 2010. P. 105–106.

35. *Anisimova G.S., Moskvitin S.G*. Redkiye mineraly i intermetallicheskiye soyedineniya v zolotorudnykh formatsiyakh Kularskogo podnyatiya // Redkiye samorodnyye metally i intermetallidy korennykh i rossypnykh mestorozhdeniy Yakutii. Yakutsk: YaNTs, 1992. P. 40–49.

36. *Gamyanin G.N.* Mineralogo-geneticheskiye aspekty zolotogo orudeneniya Verkhoyano-Kolymskikh mezozoid. Moskva: GEOS, 2001. 222 p.

37. *Savva N.E.* Mineralogiya serebra Severo-Vostoka Rossii. M.: Triumf, 2019. 541 p.

38. *Lotina A.A.* Vismut-tellurovaya mineralizatsiya uchastka Bolotistyy (Severo-Zapadnyy Sikhote-Alin) // Tikhookeanskaya geologiya. 2011. Vol. 30, No. 1. P. 97–107.

39. *Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N., Sokolov E.P*. Zolotoredkometallnoye (Au–Mo–Te–Bi) orudeneniye Verkhnealgominskogo zolotonosnogo rayona (Yuzhnaya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 5. P. 12–22.

40. *Anisimova G.S., Kondratyeva L.A., Sokolov E.P., Kardashevskaya V.N.* Zolotoye orudeneniye lebedinskogo i kuranakhskogo tipov v Verkhneamginskom rayone (Yuzhnaya Yakutiya) // Otechestvennaya geologiya. 2018. No. 5 P. 3–13.

41. *Koneyev R.I., Khalmatov R.A., Mun Yu.S.* Nanomineralogiya i nanogeokhimiya rud zolotorudnykh mestorozhdeniy Uzbekistana // Geologiya rudnykh mestorozhdeniy. 2010. Iss. 52, No. 8. P. 755–766.

42. *Nikonorov V V., Karayev Yu.V., Borisov F.I. i dr.* Zoloto Kyrgyzstana. Geologiya. Usloviya lokalizatsii. Bishkek: Nasi, 2004. 271 p.

43. *Dzhenchurayeva R.D., Pak N.T., Nikonorov V.V., Ivleva E.A.* Zolotorudnyye mestorozhdeniya Kyrgyzstana. Bishkek, 2020. 494 p.

44. *Mustafin S.K., Ponomareva A.M., Mikolaychuk G.A. i dr*. Mineralogo-tekhnologicheskaya tipizatsiya zolotosoderzhashchikh rud // Rol tekhnologicheskoy mineralogii v rasshirenii syryevoy baza SSSR. Chelyabinsk: VMO, 1986. P. 667–668.

About the authors

ANISIMOVA, Galina Semenovna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-1275-5393, gsanisimova1952@mail.ru;

KONDRATIEVA, Larisa Afanasyevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-9347-6427, lkon12@yandex.ru;

KARDASHEVSKAIA, Veronika Nikolaevna, junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,
https://orcid.org/0000-0003-1069-2533, kardashevskaya92@mail.ru;

MUSTAFIN, Sabir Kabirovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), professor, Bashkir State University, 32 Zaki Validi st., Ufa 450076, Russia,
https://orcid.org /0000-0002-4241-4004, sabir.mustafin@yandex.ru.

Citation

Anisimova G.S., Kondratieva L.A., Kardashevskaia V.N., Mustafin S.K. Features of the gold-silver-bismuth-tellurium mineralization in the Allakh-Yun metallogenic zone (North-East of Russia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 5–30. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-5–30

УДК 551.244:551.252
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-31–42

Микроструктуры кливажа и индикаторы растяжения в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (Куларский район, Якутия)

О.А. Суставов

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия
olsustavov@mail.ru

Аннотация. *Рассмотрены разновидности кливажа в черносланцевых породах северной части Улахан-Сисской антиформы (в туогучанской и тарбаганнахской свитах верхнепермского возраста) и некоторые индикаторы растяжения пород в этой части антиформы. При реконструкции процессов деформации наряду с обычными геологическими методами использованы систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах под микроскопом. Охарактеризованы главный субсогласный кливаж S_1 и роль растворения под давлением при его формировании. Становление кливажа S_1 местами сопровождалось образованием линейности растяжения, вдоль которой в метапесчаниках вытянуты зерна кварца, плагиоклаза и прилегающие к торцам этих зерен серицит-кварцевые «бороды». Судя по ориентировке данной линейности, породы при образовании кливажа S_1 подвергались растяжению в северо-северо-западном направлении. В углеродистых сланцах туогучанской свиты нередко присутствуют осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодули и более поздние кристаллы пирита. Те и другие часто окружены сложенными кварцем и хлоритом параллельно-шестоватыми оторочками деформации (ОД). Шестоватость в ОД прямолинейная и параллельная S_1, что указывает на образование ОД при коаксиальной деформации пород с растяжением параллельно S_1. Судя по направлению шестоватости в ОД на кристаллах пирита, растяжение при образовании этих ОД было ориентировано преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы. В статье рассмотрен также локально наложенный на S_1 кливаж плойчатости S_2 (в данном районе описан впервые); его кливажные зоны отвечают крыльям микроскладок, в которые сминается S_1. Кливаж S_2 имеет близкое к оси антиформы северо-восточное простирание и преимущественно крутое юго-восточное падение. Формирование кливажа S_1 может быть связано с первой (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизионного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области, а кливажа плойчатости S_2 – со второй (складчатой) стадией того же этапа деформаций.*

Ключевые слова: Якутия, Куларский район, Верхояно-Колымская орогенная область, черносланцевые породы, кливаж, вкрапленный пирит, линейность растяжения, оторочки деформации, кливаж плойчатости.

Благодарности. *Автор выражает благодарность рецензенту статьи за полезные рекомендации.*

Введение

Континентальные коллизионные зоны представляют собой места интенсивной деформации, проявляющейся в таких процессах, как коровое скучивание, вертикальное утолщение, параллельное орогенам растяжение и эксгумация более глубоких коровых пород [1]. Одним из источников данных при реконструкции этих процессов в древних зонах коллизии являются деформированные горные породы – их внутренняя деформация обусловлена общей деформацией орогенов.

Важная информация о деформированных породах может быть получена при микроструктурном анализе – целенаправленном структурном изучении деформированных пород в шлифах под микроскопом [2–4]. В качестве деформационных маркеров и кинематических индикаторов, несущих информацию о тектонических движениях и деформациях, могут рассматриваться многие деформационные структуры и текстуры горных пород [4]. Полученные при микроструктурном анализе данные могут быть использованы, в частности, для определения механизмов дефор-

© Суставов О.А., 2021

мации пород, ориентировки напряжений при деформации и для реконструкции последовательности тектонических событий в исследуемых районах [3, 4].

По Е.И. Полуфунтиковой и В.Ю. Фридовскому [5], одним из главных маркеров деформации верхоянского терригенного комплекса является кливаж обломочных пород; он характеризует как морфологическое изменение различных компонентов породы, так и общую величину деформации породы. Образование кливажа ортогонально оси сжатия определяет возможность использования этой плоскостной текстуры в качестве динамического индикатора. В работе [5] приводится подробная обобщающая характеристика микроструктур кливажа верхоянского комплекса, рассматриваются механизмы образования этих микроструктур и, с использованием стрейн-анализа, особенности деформации пород при образовании разных микроструктур.

Целью настоящей статьи является описание, с использованием микроструктурного анализа, разновидностей кливажа и некоторых индикаторов растяжения в черносланцевых породах северной части крупной Улахан-Сисской антиформы, к которой приурочен одноименный золоторудный район [6].

Методы исследования

Статья основывается на ранее не опубликованных результатах полевых наблюдений и более позднего изучения проб (в том числе 520 шлифов пород), отобранных в 1976–1982 гг. при минералогическом картировании северной части Куларского района [7]. Пробы отбирались при исхаживании обнаженных участков местности по широтным профилям, располагающимся через 50 м друг от друга. Измерялись элементы залегания слоистости, кливажей и линейности на поверхности кливажа. Особое внимание уделялось описанию оторочек деформации на кристаллах вкрапленного пирита.

Для реконструкции процессов деформации пород наряду с обычными геологическими методами использованы систематические микроструктурные наблюдения пород в шлифах под микроскопом. 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 описанием минерального состава и структуры породы детально характеризуется кливаж – его сотношения со слоистостью, состав, форма и густота кливажных зон, соотношения чешуек серицита с кливажными зонами. Рассматриваются проявления процессов растворения под давлением, форма обломочных зерен и их соотношения с кливажными зонами, наличие изометричных, линзовидных и уплощенных зерен. Отмечаются наличие и возрастные соотношения регенерационных кайм, «бород» и оторочек деформации на зернах породы, соотношения между кливажем и кристаллами ильменита, карбонатов, биотита. В случае наличия кливажа плойчатости характеризуются его ориентировка, строение и роль при его образовании процесов растворения под давлением.

В качестве справочных пособий при описании в шлифах особенностей деформации пород использовались работы [2–4, 8].

Геология

Изучаемый район (рис. 1) находится на северо-западном фланге Кулар-Нерского сланцевого пояса Верхояно-Колымской орогенной области, сложенном углеродистыми сланцами и турбидитами склона и подножия Верхоянской пассивной континентальной окраины. Породы подвержены складчатости в поздней юре–раннем мелу при коллизии Сибирского кратона и Колыма-Омолонского супертеррейна [9]. В районе устанавливается несколько крупных кулисообразно расположенных опрокинутых складок северо-восточного простирания, разделенных надвигами и взбросами северо-западной вергентности, в том числе сложенная породами верхнепермского возраста Улахан-Сисская антиформа длиной более 100 км и шириной до 20 км (рис. 1, *а*).

Улахан-Сисская антиформа ориентирована в северо-северо-восточном направлении (10–15°) и постепенно погружается на юго-юго-запад под углом 5–8°. Углы падения слоев в приосевой части антиформы (тарбаганнахская свита верхнепермского возраста) не превышают 3–7°, а на крыльях (туогучанская свита верхнепермского возраста) – 20–25°. По [9], это лежачая изоклинальная складка, повторно изогнутая в пологую асимметричную антиклиналь. В ее своде предполагается невскрытый крупный гранитоидный интрузив, кровля которого, по геофизическим данным, находится на глубине 1–2 км от совре-

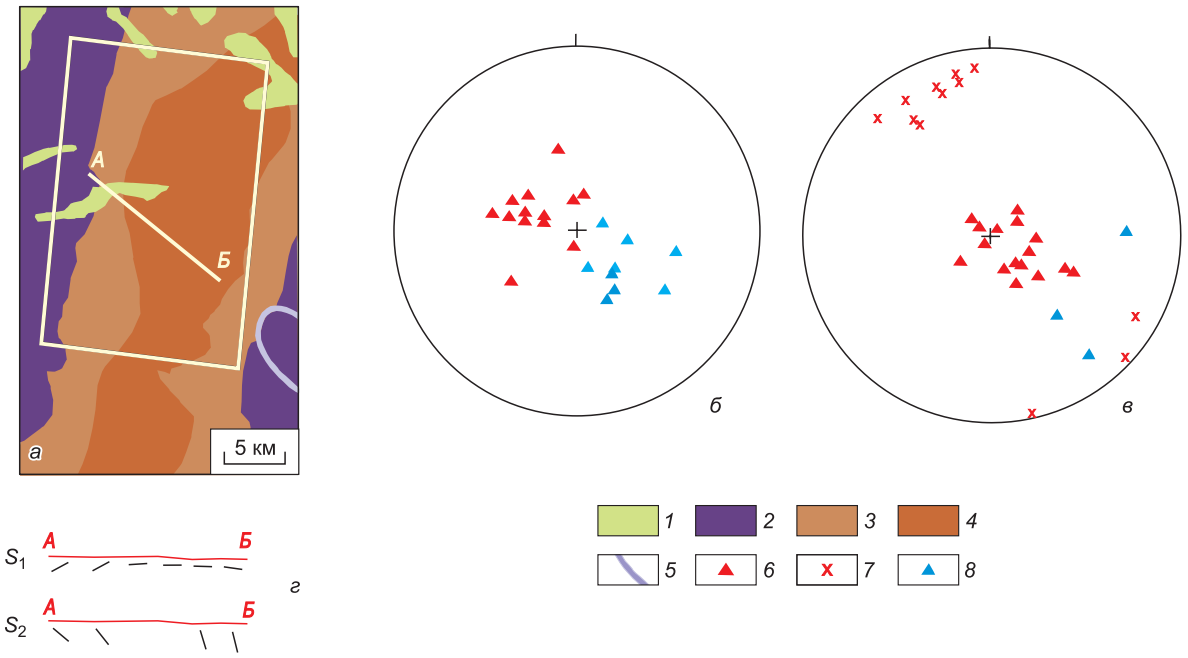


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Улахан-Сисской антиформы (*а*, схематизировано по геологической карте масштаба 1 : 1 000 000: *1* – четвертичные отложения, *2*– триас, *3* – туогучанская свита верхней перми, *4* – тарбаганнахская свита верхней перми, *5* – р. Яна; белая рамка – изученная площадь) и ориентировка кливажа S_1 (*б*), линейности на поверхностях S_1 (*7*) и кливажа S_2 (*8*) в породах туогучанской (*б*, ручьи Бургуат и Нэттик) и тарбаганнахской (*в*, ручей Бургуат и гора Кыллах) свит; *г* – положение кливажа S_1 и S_2 в разрезе по *АБ*.

Fig. 1. The scheme of the geological structure of the Northern part of the Ulakhan-Sissky antiform (*а*, according to the geological map of the scale 1 : 1 000 000: *1* – quaternary deposits, *2*– lower Triassic, *3* – Tuoguchansky suite of upper Permian, *4* – Tarbagannahsky suite of upper Permian, *5* – Yana River; white frame – the studied area) and the orientation of cleavage S_1 (*б*), lineation on the cleavage S_1 plane (*7*) and cleavage S_2 (*8*) in the rocks of Tuoguchansky (*б*, streams Burguat and Nettik) and Tarbagannahsky (*в*, stream Burguat and mountain Kyllah) suites; *г* – position of cleavages S_1 and S_2 in the section *АБ*.

менной поверхности. С запада и востока антиформа окружена породами нижнего и среднего триаса, отделенными от антиформы надвигами и взбросами северо-западной вергентности.

В данной статье рассматривается северная часть Улахан-Сисской антиформы между ручьями Тарбаганнах, Батор-Юрэх на юге и горой Мунулу на севере (см. рис. 1). Это зона развития верхнепермских углеродистых сланцев (преимущественно метааргиллитов и метаалевролитов), среди которых залегают отдельные пласты метапесчаников. Углеродистые сланцы состоят в основном из кварца, серицита, углеродистого вещества и хлорита (последний особенно характерен для туогучанской свиты). Метапесчаники главным образом мелко- и тонкозернистые (размер обломков в среднем 0,2–0,05 мм) граувакковые (наряду с обломками кварца и плагиоклаза в них содержится более 25 % обломков пород); могут также присутствовать, преимущественно в матриксе, серицит, хлорит, карбонаты и углеродистое вещество. Следует отметить присутствие в породах туогучанской свиты вкрапленности кристаллов пирита, а в углеродистых сланцах тарбаганнахской свиты – ильменита. Породы метаморфизованы в условиях мусковит-хлоритовой и биотитовой субфаций зеленосланцевой фации [7].

Результаты исследований

Преобладающим развитием в породах Улахан-Сисской антиформы пользуется *кливаж* S_1 [9], залегающий в тарбаганнахской свите (в ядре антиформы) субгоризонтально, преимущественно параллельно слоистости, а в туогучанской свите (на крыльях антиформы) – под углами до 20–25° к горизонту (см. рис. 1), нередко пересекая слоистость. В слагающей ядро антиформы тарбаганнахской свите кливаж S_1 развит значительно более интенсивно, чем в при-

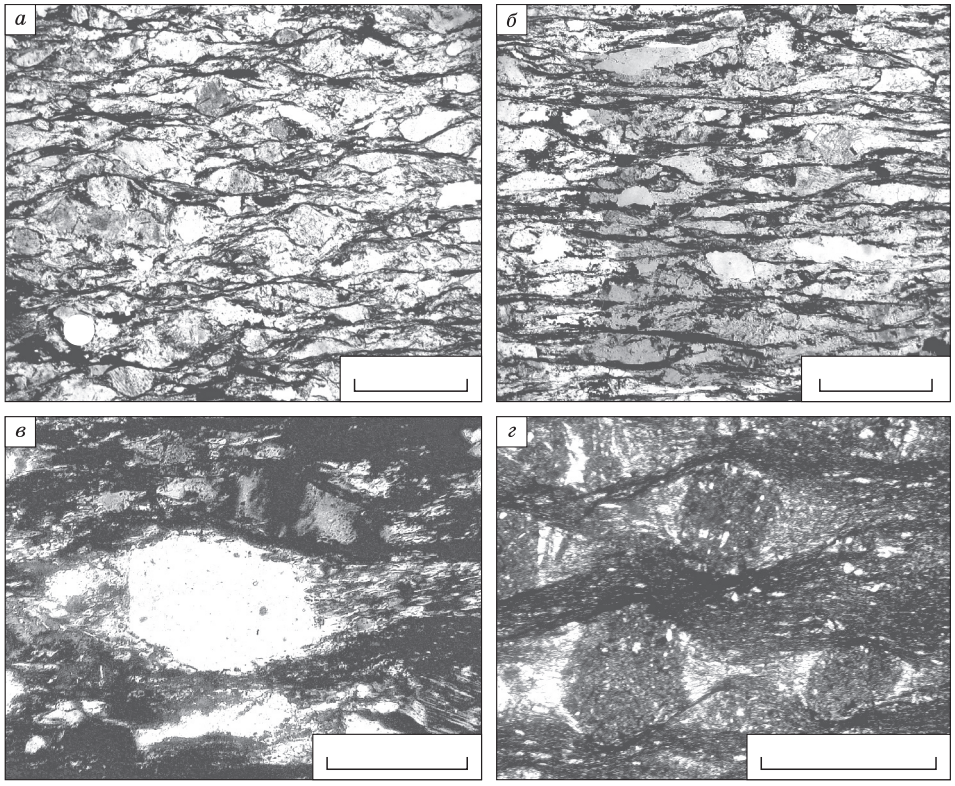


Рис. 2. Кливаж S_1:
а–в – межзерновой кливаж в мелко-тонкозернистом метапесчанике (*а* – перпендикулярно линейности; *б, в* – перпендикулярно S_1 и параллельно линейности, *в* – кварц-серицитовая «борода» на правой границе обломка кварца); тарбаганнахская свита, гора Мунулу; *г* – углеродисто-кварцевые нодули с хлорит-кварцевыми оторочками деформации в метааргиллите со сланцевым кливажем и углеродистыми кливажными зонами (черное); туогучанская свита, ручей Бургуат. *а, б, г* – без анализатора, *в* – николи скрещены. Масштабный отрезок: *а, б* – 0,5 мм, *в* – 0,2 мм, *г* – 0,4 мм.

Fig. 2. Cleavage S_1:
а–в – intergranular cleavage in fine-grained metasandstone (*а* – perpendicular to the lineation; *б, в* – perpendicular to S_1 and parallel to the lineation, *в* – quartz-sericite «beard» at the right edge of the quartz grain), Tarbagannahsky suite, mountain Munulu; *г* – carbon-quartz nodules with chlorite-quartz strain fringes in metapelite with slaty cleavage and carbon-containing cleavage zones (black); Tuoguchansky suite, stream Burguat (*а, б, г* – without the analyzer, *в* – crossed nicoli). Scale segment: *а, б* – 0.5 mm, *в* – 0.2 mm, *г* – 0.4 mm.

уроченной к крыльям антиформы туогучанской свите.

В метапесчаниках тарбаганнахской свиты кливаж S_1 под микроскопом наблюдается в виде совокупности субпараллельных серицит-углеродистых кливажных зон толщиной в тысячные доли миллиметра, которые отстоят между собой на расстояния до 0,1–0,2 мм («межзерновой» [4] кливаж). Обломочные зерна уплощены субпараллельно S_1 и нередко имеют линзовидную форму (рис. 2, *а–в*). В присутствующих в метапесчаниках обломках пород и в матриксе наблюдаются параллельные кливажным зонам S_1 мелкие чешуйки серицита.

В углеродистых сланцах (метааргиллитах) туогучанской свиты наблюдается сланцевый кливаж S_1 (slaty cleavage [2]), проявленный в параллельности чешуек хлорита и серицита, уплощенности в той же плоскости зерен кварца и в наличии протяженных углеродистых кливажных зон такой же ориентировки (рис. 2, *г*). Углеродистые сланцы тарбаганнахской свиты нередко отличаются более высоким содержанием серицита и местами характеризуются текстурой, близкой к сланцеватости.

В породах тарбаганнахской свиты на поверхностях кливажа S_1 местами наблюдается слабо выраженная *линейность*. Вдоль руч. Бургуат и на горе Кыллах она ориентирована в северо-северо-западном направлении, под углом 20–40° к оси Улахан-Сисской антиформы (см. рис 1, *в*).

Линейность отражается в конфигурации углеродистых кливажных зон S_1: в охарактеризованном рисунком 2, *а–в* метапесчанике с линей-

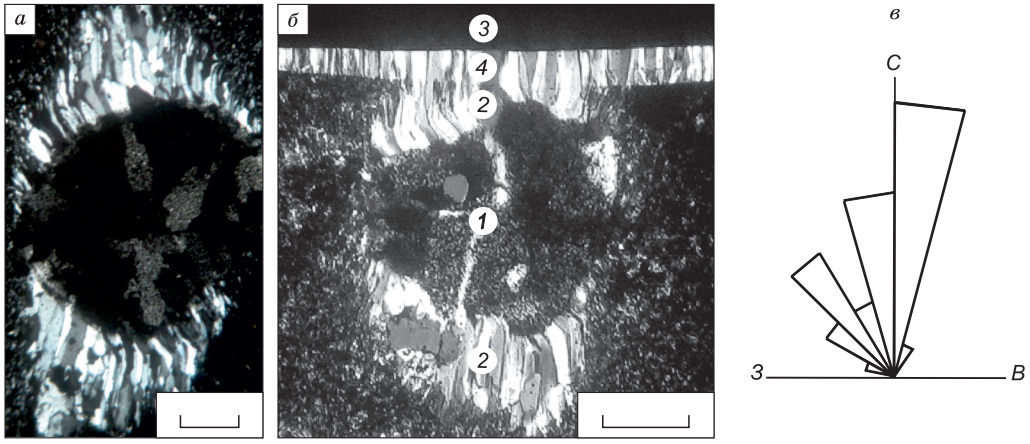


Рис. 3. Параллельно-шестоватые кварцевые оторочки на углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита в углеродистых сланцах:
а – поворот направления шестоватости в оторочке на нодуле, *б* – оторочка (*2*) на нодуле (*1*) пересекается оторочкой (*4*) на пирите (*3*) (*а, б* – сечение параллельно S_1, ручей Улахан-Юреге); *в* – распределение азимутов ориентировки шестоватости в оторочках на кристаллах пирита, по 52 замерам в 16 точках наблюдения (замеры А.Ф. Бушмакина). *а, б* – николи скрещены; масштабный отрезок: *а* – 0,1 мм, *б* – 0,2 мм.

Fig. 3. Fibrous quartz strain fringers on carbon-quartz nodules and pyrite crystals in carbonaceous shales:
а – turning of the fibres direction in fringer on nodule, *б* – fringer (*2*) on nodule (*1*) intersects by the fringer (*4*) on pyrite (*3*) (*а, б* – section parallel to S_1, stream Ulakhan-Yurege); *в* – distribution of the azimuth orientation of fibres on pyrite crystals, 52 measurements (A.F. Bushmakin) in 16 observation points. *а, б* – crossed nicoli; scale segment: *а* – 0.1 mm, *б* – 0.2 mm.

ностью углеродистые кливажные зоны в шлифе, ориентированном поперек линейности (см. рис. 2, *а*), имеют волнистую форму, а в шлифе, ориентированном вдоль линейности (см. рис. 2, *б*), их форма более уплощенная.

В шлифе, ориентированном вдоль направления линейности (см. рис. 2, *б*) к поперечным по отношению к S_1 границам относительно крупных обломочных зерен кварца и плагиоклаза нередко приурочены вытянутые параллельно S_1 «бороды» [2, 10] – «удлиненные взаимопрорастания волокнистой белой слюды и кварца» [2] (см. рис. 2, *в*). В шлифе, ориентированном поперек линейности (см. рис. 2, *а*), «бород» возле зерен кварца и плагиоклаза обычно не наблюдается.

Углеродистым сланцам туогучанской свиты нередко свойственно присутствие осадочно-диагенетических *углеродисто-кварцевых* [11] *нодулей* (округлых выделений) размерами преимущественно в десятые доли миллиметра (см. рис. 2, *г*; 3, *а, б*). Нодули обычно представляют собой срастания нескольких разноориентированных зерен кварца (см. рис. 3, *а*), равномерно насыщенных тонкодисперсным углеродистым веществом (подобную форму, состав и размеры могут иметь заполненные при диагенезе кремнеземом цисты водорослей [12]). Кроме того, породам туогучанской свиты свойственно широкое развитие вкрапленности кристаллов *пирита* [11].

Осадочно-диагенетические углеродисто-кварцевые нодули огибаются и срезаются кливажем S_1, а кристаллы пирита пересекают кливаж; под микроскопом в кристаллах пирита наблюдаются остатки углеродистых кливажных зон S_1, замещаемых пиритом (реликтовая текстура [11]).

По краям углеродисто-кварцевых нодулей и кристаллов пирита часто располагаются сложенные параллельно-шестоватым кварцем и хлоритом тени деформации [2–4] («тени давления» [13]) параллельно-шестоватого строения (см. рис. 2, *г*; 3, *а, б*); такие тени деформации называют оторочками деформации (ОД) – strain fringes [2, 3]. В большинстве случаев оторочки деформации на углеродисто-кварцевых нодулях (ОД-1) и на кристаллах пирита (ОД-2) сложены прямолинейными шестоватыми индивидами кварца, вытянутыми параллельно S_1 (см. рис. 2, *г*). Оторочки деформации на углеродисто-кварцевых нодулях пересекаются кристаллами пирита и приуроченными к ним ОД-2 (см. рис. 3, *б*).

В ОД-1 в единичных редких случаях имеются изгибы, изменения направления вытянутости шестоватых индивидов (см. рис. 3, *а*). Это наблюдается в некоторых шлифах, вырезанных параллельно S_1 (при этом в шлифах, вырезанных из тех же образцов поперек S_1, подобных изменений направления шестоватости в ОД-1 нет –

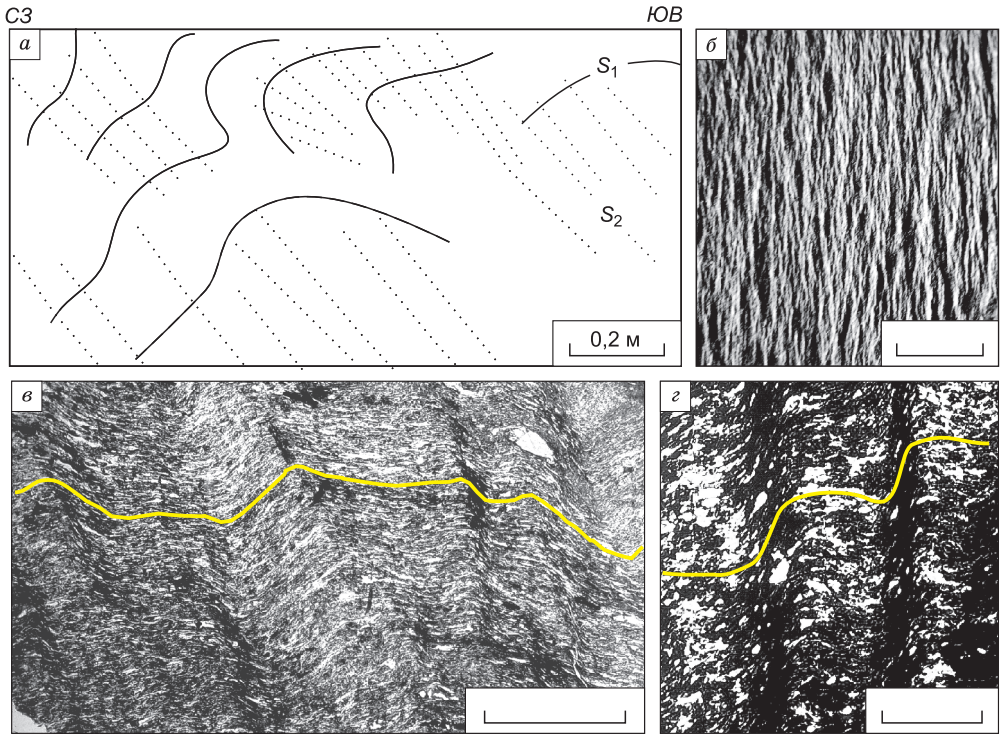


Рис. 4. Кливаж плойчатости S_2 в углеродистых сланцах:
а – S_2 (пунктир) в складках, изгибающих кливаж S_1; *б* – поверхность кливажа S_1, гофрированная перпендикулярным к этой поверхности кливажем S_2 (линейность плойчатости; образец из обнажения, изображенного на рисунке *а*); *в, г* – S_2 в шлифах, ориентированных перпендикулярно S_1, без анализатора; желтое – изменение направления кливажа S_1. *а, б* – гора Кыллах, *в* – ручей Тарбаганнах, *г* – ручей Эмись, масштабный отрезок: *б* – 6 мм, *в, г* – 0,5 мм.

Fig. 4. Crenuiation cleavage S_2 in carbonaceous slates:
а – S_2 (dotted line) in the folds, bending the cleavage S_1, *б* – the cleavage S_1 surface corrugated by a cleavage S_2 perpendicular to this surface (crenulation lineation; a sample from the outcrop shown in figure *а*); *в, г* – S_2 in thin sections oriented perpendicular to S_1, without analyzer; yellow – changing the direction of the cleavage S_1. (*а, б* – mountain Kyllah, *в* – stream Tarbagannah, *г* – stream Emici), scale bar: *б* – 6 mm, *в, г* – 0.5 mm.

наблюдается обычная однонаправленная прямолинейная шестоватость).

Оторочки деформации возле кристаллов пирита на севере изученной площади, по данным А.Ф. Бушмакина, встречаются значительно реже, чем в южной части площади; их средняя мощность на севере площади 0,5–1 мм. В средней части площади (ручьи Бургуат, Пологий) ОД-2 встречаются часто в углеродистых сланцах и редко в метапесчаниках, их мощность 1–2 и 1 мм соответственно. На юге изученной площади ОД-2 обычны на кристаллах пирита из углеродистых сланцев, где достигают мощности 4–5 мм, и часто отмечаются на кристаллах пирита из метапесчаников.

Как показывают замеры ориентировки шестоватости в оторочках деформации возле кристаллов пирита на местности (в породах туогучанской свиты на западном и восточном крыльях антиформы), направление вытянутости шестоватых индивидов в ОД-2 изменяется от северо-западного до преобладающего северо-северо-восточного (см. рис. 3, *г*), близкого к оси Улахан-Сисской антиформы.

Наряду с кливажем S_1 в углеродистых сланцах туогучанской и тарбаганнахской свит местами присутствует пересекающий S_1 кливаж плойчатости [4, 14] S_2 (в данном районе описывается впервые). Под микроскопом устанавливается, что кливажные зоны S_2 отвечают в той или иной степени сжатым крыльям микроскладок плойчатости, в которые сминается кливаж S_1 (рис. 4, *в, г*; 5, *б, в*). В штуфах кливаж S_2 может быть макроскопически проявлен на поверхностях S_1 в виде тонкой гофрировки (линейность плойчатости [4, 14]) – рис. 4, *б*.

Микроскладки плойчатости кливажа S_2 характеризуются преимущественно плавными, реже резкими изгибами: внутри одних микролитонов S_2 кливаж S_1 может быть изогнутым, а в других –

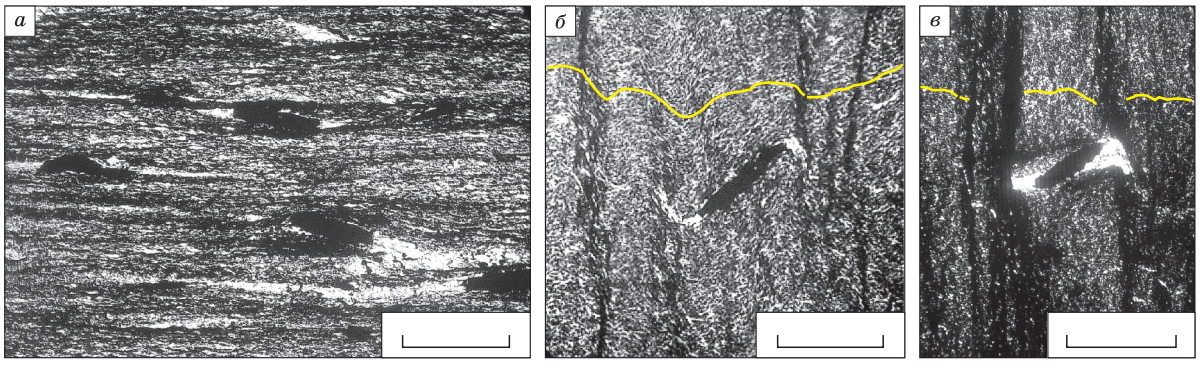


Рис. 5. Кварцевые тени деформации (белое) возле кристаллов ильменита в серицит-углеродисто-кварцевых сланцах с кливажем S_1 (*а,* S_1 горизонтальный) и с кливажем плойчатости S_2 (*б, в*; S_2 вертикальный; желтое – положение S_1; тени деформации изгибаются (*б*) и срезаются (*в*) на контактах с кливажными зонами S_2); тарбаганнахская свита, гора Кыллах. Без анализатора, масштабный отрезок: *а, в* – 0,5 мм, *б* – 0,15 мм.

Fig. 5. Quartz strain shadows (white) near ilmenite crystals in sericite-carbonaceous-quartz slates with cleavage S_1 (*а*, S_1 horizontal) and with crenulation cleavage S_2 (*б, в*; S_2 vertical; yellow – position S_1; strain shadows bend (*б*) and cut away (*в*) at contacts with cleavage zones S_2); Tarbagannakh suite, mountain Kyllah. Without analyzer, the scale segment: *а*, *в* – 0.5 mm, *б* – 0.15 mm.

плоским (см. рис. 5, *в*); микроскладки могут быть симметричными и асимметричными (см. рис. 4, *г*; 5, *б*). При сжатии крыльев микроскладок на месте этих крыльев могут возникать почти чисто углеродистые кливажные зоны S_2 (см. рис. 5, *г*). В некоторых случаях углеродистые кливажные зоны S_2 имеют резкие границы и пересекают почти не смятый кливаж S_1 (см. рис. 5, *в*).

Если в углеродистых сланцах присутствуют минералы с образовавшимися при формировании S_1 тенями деформации, то при наложении на эти сланцы кливажа плойчатости S_2 тени деформации могут изгибаться у границ с кливажными зонами S_2 и срезаться этими зонами. Так, это наблюдается в углеродистых сланцах тарбаганнахской свиты, содержащих вкрапленность кристаллов ильменита. Возле этих кристаллов нередко имеются возникшие при формировании S_1 тени деформации (сложенные изометрично-зернистым кварцем), сильно вытянутые вдоль направления S_1 (рис. 5, *а*). Изгибание этих теней деформации у границ с кливажныи зонами S_2 и срезание теней деформации в результате растворения под давлением на границах с кливажными зонами S_2 показано на рис. 5, *б, в*.

Кливаж S_2 имеет северо-восточное простирание, близкое к оси Улахан-Сисской антиформы. Падение этого кливажа на юго-восток – преимущественно под 60–85° в породах тарбаганнахской свиты (в ядре антиформы) и под 20–50° в породах туогучанской свиты на западном крыле антиформы – измерения проведены по линии *АБ* (см. рис. 1). В небольших локальных складках северо-западной вергентности, в которые иногда смят ранний кливаж S_1, кливаж S_2 ориентирован близко к направлению осевых поверхностей этих складок (см. рис. 4, *а).*

Обсуждение результатов

Формирование рассмотренного выше пологозалегающего кливажа S_1 связано, по-видимому, с первой [15] (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизионного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области. Образование субсогласного кливажа (сланцеватости) S_1 на первой стадии раннеколлизионных деформаций (синхронно с крупными лежачими складками, в условиях вертикального сжатия пород) отмечается и в других регионах [16–18].

Микроструктуры кливажа S_1 показывают, что его формирование происходило при уплощении пород перпендикулярно S_1, сопровождавшемся потерей объема при процессах растворения под давлением, обычных при деформации слабометаморфизованных терригенно-осадочных пород [4, 14].

В метапесчаниках процессы растворения под давлением проявлены преимущественно вдоль границ между углеродистыми кливажными зонами и обломочными зернами, чем обусловлена уплощенная параллельно S_1 и линзовидная форма обломочных зерен метапесчаников. С процессами растворения под давлением при образовании кливажа связывают и образование теней деформации (в том числе параллельно-шестова-

тых оторочек деформации) возле отдельных зерен породы (считается, что в тенях деформации отлагается кремнезем, особождающийся при растворении обломочных зерен [4]).

Линейность, местами наблюдаемая в изученных породах и ориентированная в северо-северо-западном направлении, под углом 20–40° к оси Улахан-Сисской антиформы (см. рис 1, *в*), относится к обычной в метаморфических породах [14] линейности растяжения [3, 4]. В метапесчаниках с линейностью зерна породы вытянуты вдоль направления линейности (см. рис. 2, *б*), что характерно для линейности растяжения [3, 4]. Вдоль направления линейности вытянуты и образующиеся при растяжении породы в плоскости кливажа [10] «бороды» возле зерен кварца и плагиоклаза (см. рис. 2, *в*).

При формировании в углеродистых сланцах туогучанской свиты кливажа S_1 основная масса породы нередко отрывается от боковых частей присутствующих в этих сланцах углеродисто-кварцевых нодулей и кристаллов пирита. Образующиеся полости заполняются параллельно-шестоватым кварцем и хлоритом с образованием оторочек деформации [2, 3]. Такие ОД, возникшие при образовании кливажа, являются кинематическими индикаторами – шестоватость в них указывает на направление растяжения пород [2, 3, 14].

То, что в данном районе ОД на углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита в большинстве случаев сложены прямолинейными шестоватыми индивидами кварца, вытянутыми параллельно S_1 (см. рис. 2, *г*), показывает, согласно [3, 4, 13, 19], что образование ОД в том и другом случае происходило преимущественно в процессе коаксиальной деформации пород с растяжением в плоскости S_1. Присутствие в отдельных случаях изгибов, изменений направления вытянутости шестоватых индивидов (см. рис. 3, *а*) является признаком локального проявления некоаксиальной деформации пород [4, 13, 19] и может быть связано с присутствием зон сдвига (отмечены в данном районе в работе [20]) и разломов в местах нахождения таких ОД [19].

На осадочно-диагенетических углеродисто-кварцевых нодулях оторочки деформации (ОД-1) образуются на ранних стадиях формирования кливажа, по-видимому, в близкое время с «бородами», вытянутыми вдоль линейности растяжения (см. рис. 2, *в*). Присутствующие в тех же породах кристаллы пирита возникают на поздних стадиях формирования кливажа, после того, как кливаж S_1 был в основном сформирован. Это следует из того, что кристаллы пирита пересекают кливаж S_1 и в них постоянно наблюдаются видимые под микроскопом остатки углеродистых кливажных зон S_1, которые присутствовали в породе до образования кристаллов пирита (реликтовая текстура [11]). Это подтверждается и многочисленными случаями пересечений кристаллами пирита и оторочками ОД-2 возле кристаллов пирита оторочек ОД-1 (см. рис. 3, *б*).

В оторочках деформации возле кристаллов пирита направление вытянутости шестоватых индивидов изменяется от северо-западного до преобладающего северо-северо-восточного (рис. 3, *г*). Из этого следует, что направление растяжения пород при образовании оторочек деформации возле кристаллов пирита было ориентировано преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы. Увеличение мощности этих оторочек с севера на юг изучаемой площади показывает, что на данной площади растяжение пород при образовании ОД-2 нарастало с севера на юг.

Кливаж плойчатости S_2 является более поздним, чем S_1 (S_2 пересекает S_1). Он характеризуется резко отличным от S_1 крутым углом падения и простиранием вдоль оси Улахан-Сисской антиформы. Иногда наблюдающееся развитие кливажа плойчатости параллельно осевым плоскостям относительно редких наложенных складок сантиметрового и метрового масштаба (см. рис. 4, *а*) отмечается и в других районах [21].

Образование кливажа S_2, как и кливажа S_1, происходит с участием процессов растворения под давлением. При сжатии крыльев микроскладок кливажа плойчатости кварц и серицит могут из крыльев микроскладок почти полностью удаляться (вынос материала растворами), а углеродистое вещество – пассивно накапливаться, в связи с чем на месте крыльев микроскладок могут возникать почти чисто углеродистые кливажные зоны S_2 (см. рис. 5, *в*).

Подобно тому, как это отмечается в других регионах [16, 18, 22, 23], образование кливажа плойчатости S_2, может быть связано со второй (складчатой) стадией [15] раннеколлизионного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области.

Выводы

1. В верхнепермских терригенных породах северной части Улахан-Сисской антиформы развит субпараллельный слоистости кливаж S_1 и локаль-

но наложенный на него преимущественно крутопадающий кливаж плойчатости S_2. Образование того и другого кливажа происходит при участии процессов растворения под давлением.

2. Кварцевые оторочки деформации на присутствующих в углеродистых сланцах углеродисто-кварцевых нодулях и кристаллах пирита возникают в условиях преобладающей коаксиальной деформации пород: на углеродисто-кварцевых нодулях – на ранних стадиях образования кливажа S_1, а на кристаллах пирита – на поздних стадиях образования кливажа S_1.

3. При формировании кливажа S_1 породы подвергаются растяжению в северо-северо-западном направлении (исходя из простирания линейности растяжения), а после образования вкрапленности кристаллов пирита (судя по ориентировке шестоватости в оторочках деформации возле этих кристаллов) – преимущественно в северо-северо-восточном направлении, близком к оси Улахан-Сисской антиформы.

4. Образование кливажа S_1 может быть связано с первой (надвиго-складчатой) стадией раннеколлизионного надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области, а ориентированного поперек S_1 кливажа плойчатости S_2 – со второй (складчатой) стадией того же этапа деформаций.

Литература

1. *Seyferth M., Henk A.* Syn-convergent exhumation and lateral extrusion in continental collision zones – insights from three-dimensional numerical models // Tectonophysics. 2004. Vol. 382. P. 1–29.

2. *Vernon R. H.* A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, 2018. 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609

3. *Passchier C.W., Trouw R.A. J.* Microtectonics. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005. 366 p.

4. *Кирмасов А.Б.* Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.

5. *Полуфунтикова Е.И., Фридовский В.Ю.* Микродеформации рудоносных терригенных толщ // Разведка и охрана недр. 2013. № 12. С. 16–19.

6. *Фридовский В.Ю.* Куларская металлогеническая зона: метаморфогенные Au кварцевые месторождения // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 350–353.

7. *Уставов О.А.* Деформации жильного кварца при формировании золотого оруденения в черносланцевых толщах (Куларский район, Восточная Якутия) // Геол. и геоф. 1995. № 4. С. 81–87.

8. *Atlas* of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics / Edited by G.J. Borradaile, M.B. Bayly, C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. 551 p.

9. *Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В.* Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Под ред. Л.М. Парфенова и М.И. Кузьмина. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 199–254.

10. *Powell C. McA.* Conjugate cleavage in quartzose sandstone // Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics. Edited by G. J. Borradaile M. B. Bayly C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 266–267.

11. *Бушмакин А.Ф.* Унаследованное строение кристаллов пирита из пород с углеродистым веществом // Проблемы онтогении минералов. Л.: Наука, 1985. С. 73–82.

12. *Schieber J.* Early diagenetic silica deposition in algal cysts and spores: a sourse of sand in black shales? // Jour. Sedim. Res. 1996. Vol. 66. P. 175–183.

13. *Ramsay J.G., Huber M.I.* The Techniques of Modern Structural Geology. London: Academic press, 1983. Vol. 1. 307 p.

14. *Fossen H.* Structural Geology. Cambridge University Press, 2010. 463 p.

15. *Третьяков Ф.Ф.* Стадии надвигового этапа позднемезозойских деформаций Верхояно-Колымской орогенной области // Отеч. геол. 2015. № 5. С. 89–95.

16. *Poyatos D.M., Nieto F., Azor A.* Relationships between very low-grade metamorphism and tectonic deformation: examples from the southern Central Iberian Zone (Iberian Massif, Variscan belt) // Jour. Geol. Soc. London. 2001. Vol. 158. P. 953–968.

17. *Chen C.T., Chan Y.C., Lo C.H., Malavieille J., Lu C.Y., Tang J.T., Lee Y.H.* Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // Jour. Asian Earth Sci. 2018. Vol. 152. P. 80–90. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030.

18. *Friedel C.H., Huckriede H., Leis B., Zweig M.* Large-scale Variscan shearing at the southeastern margin of the eastern Rhenohercynian belt: a reinterpretation of chaotic rock fabrics in the Harz Mountains, Germany // Intern. Jour. Earth Sci. (Geol Rundsch). 2019. Vol. 108. P. 2295–2323. https://doi.org/10.1007/s00531-019-01763-1

19. *Tillman K.S., Byrne T.B*. Kinematic analysis of the Taiwan Slate Belt // Tectonics. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 322–341.

20. *Фридовский В.Ю*. Деформации и оруденение Куларского сегмента Кулар-Нерского сланцевого пояса (Восточная Якутия) // Изв. вузов. Геол и разв. 1996. № 4. С. 64–71.

21. *Aerden D.G.A.M.* Porphyroblast non-rotation during crustal extension in the Variscan Lys-Caillaouas Massif, Pyrenees // Jour. Struct. Geol. 1995. Vol. 17, No. 5. P. 709–725.

22. *Миллер Ю.В.* Тектоно-метаморфические циклы. Л.: Наука, 1982. 159 с.

23. *Lačný A., Plašienka D., Vojtko R.* Structural evolution of the Turňa Unit constrained by fold and cleavage analyses and its consequences for the regional tectonic models of the Western Carpathians // Geol. Carpathica. 2016. Vol. 67. N 2. P. 177–193. https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0012

Поступила в редакцию 15.06.2021
Принята к публикации 28.07.2021

Об авторе

СУСТАВОВ Олег Анатольевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Уральский государственный горный университет, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Россия, https://orcid.org/0000-0002-1880-5494, olsustavov@mail.ru.

Информация для цитирования

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. Т. 26, № 3. С. 31–42. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31–42

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-31–42

Cleavage microstructures and stretching indicators in black-slate rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia)

O.A. Sustavov

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia
olsustavov@mail.ru

Abstract. *The varieties of cleavage in the black-shale rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (in the Tuoguchan and Tarbagannakh suites of the Upper Permian age) and some rocks stretching indicators in this part of the antiform are considered. In the reconstruction of the deformation processes, along with the ordinary geological methods, systematic microstructural observations of rocks in the thin sections under a microscope were used. The main sub-conformable cleavage S_1 and the role of pressure solution in its formation are characterized. The cleavage S_1 formation sometimes accompanied by the formation of a stretching lineation. In metasandstones the of quartz and plagioclase grains and sericite-quartz «beards» adjacent to the ends of these grains are elongated along lineation. Based on the orientation of this lineation, the rocks during the formation of the cleavage S_1 were subjected to stretching in the north-north-western direction. The carbonaceous shales of the Tuoguchan suite often contain the sedimentary-diagenetic carbon-quartz nodules and later pyrite crystals. Both are often surrounded by fibrous strain fringers (SF) composed of quartz and chlorite. The fibers in SF is rectilinear and parallel to S_1, which indicates the formation of SF during the coaxial deformation of rocks with stretching parallel to S_1. Based on the fiber directions in SF on pyrite crystals, the stretching during these SF formation was oriented mainly in the north-north-eastern direction, close to the axis of the Ulakhan-Sis antiform. The article also considers the crenulation cleavage S_2 (described in this area for the first time), locally superimposed on S_1.*

The S_2 cleavage zones correspond to the microfolds limbs into which the cleavage S_1 is bended. The cleavage S_2 has a north-eastern strike, close to the antiform axis, and a predominantly steep south-eastern fall. The cleavage S_1 formation may be associated with the first (thrust-fold) stage of the early collisional thrust phase of the Late Mesozoic deformations of the Verkhoyano-Kolyma orogenic region, and the crenulation cleavage S_2 – with the second (fold) stage of the same deformation phase.

Keywords: Yakutia, Kularsky district, Verkhoyansk-Kolyma orogenic region, black shale rocks, cleavage, impregnated pyrite, extension linearity, deformation margins, plicature cleavage.

Acknowledgements. *Author expresses gratitude to Reviewer for useful recommendations.*

References

1. *Seyferth M., Henk A.* Syn-convergent exhumation and lateral extrusion in continental collision zones – insights from three-dimensional numerical models // Tectonophysics. 2004. Vol. 382. P. 1–29.

2. *Vernon R.H.* A practical guide to rock microstructure. Cambridge University Press, 2018. 431 p. https://doi.org/10.1017/9781108654609

3. *Passchier C.W., Trouw R.A. J.* Microtectonics. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2005. 366 p.

4. *Kirmasov A.B.* Osnovy strukturnogo analiza. M.: Nauchnyj mir, 2011. 368 p.

5. *Polufuntikova E.I., Fridovskij V.Ju.* Mikrodeformacii rudonosnyh terrigennyh tolshh // Razvedka i ohrana nedr. 2013. No. 12. P. 16–19.

6. *Fridovskij V.Ju.* Kularskaja metallogenicheskaja zona: metamorfogennye Au kvarcevye mestorozhdenija // Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija) / Pod red. L.M. Parfenova i M.I. Kuz'mina. M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 350–353.

7. *Sustavov O.A.* Deformacii zhil'nogo kvarca pri formirovanii zolotogo orudenenija v chernoslancevyh tolshhah (Kularskij rajon, Vostochnaja Jakutija) // Geol. i geof. 1995. No. 4. P. 81–87.

8. *Atlas* of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics / Edited by G.J. Borradaile, M.B. Bayly, C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag 1982. 551 p.

9. *Parfenov L.M., Oksman B.C., Prokoi'ev A.V., Timofeev V.F., Tret'jakov F.F., Trunilina V.A., Dejkunenko A.V.* Kollazh terrejnov Verhojano-Kolymskoj orogennoj oblasti // Tektonika, geodinamika i metallogenija territorii Respubliki Saha (Jakutija) / Pod red. L.M. Parfenova i M.I. Kuz'mina. M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 199–254.

10. *Powell C. McA.* Conjugate cleavage in quartzose sandstone // Atlas of Deformational and Metamorphic Rock Fabrics. Edited by G. J. Borradaile M. B. Bayly C. McA. Powell. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1982. P. 266–267.

11. *Bushmakin A.F.* Unasledovannoe stroenie kristallov pirita iz porod s uglerodistym veshhestvom // Problemy ontogenii mineralov. L.: Nauka, 1985. P. 73–82.

12. *Schieber J.* Early diagenetic silica deposition in algal cysts and spores: a sourse of sand in black shales? // Jour. Sedim. Res. 1996. Vol. 66. P. 175–183.

13. *Ramsay J.G., Huber M.I.* The Techniques of Modern Structural Geology. London: Academic press, 1983. Vol. 1. 307 p.

14. *Fossen H.* Structural Geology. Cambridge University Press, 2010. 463 p.

15. *Tret'jakov F.F.* Stadii nadvigovogo jetapa pozdnemezozojskih deformacij Verhojano-Kolymskoj orogennoj oblasti // Otech. geol. 2015. No. 5. P. 89–95.

16. *Poyatos D.M., Nieto F., Azor A.* Relationships between very low-grade metamorphism and tectonic deformation: examples from the southern Central Iberian Zone (Iberian Massif, Variscan belt) // Jour. Geol. Soc. London. 2001. Vol. 158. P. 953–968.

17. *Chen C.T., Chan Y.C., Lo C.H., Malavieille J., Lu C.Y., Tang J.T., Lee Y.H.* Basal accretion, a major mechanism for mountain building in Taiwan revealed in rock thermal history // Jour. Asian Earth Sci. 2018. Vol. 152. P. 80–90. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.11.030.

18. *Friedel C.H., Huckriede H., Leis B., Zweig M.* Large-scale Variscan shearing at the southeastern margin of the eastern Rhenohercynian belt: a reinterpretation of chaotic rock fabrics in the Harz Mountains, Germany // Intern. Jour. Earth Sci. (Geol Rundsch). 2019. Vol. 108. P. 2295–2323. https://doi.org/10.1007/s00531-019-01763-1

19. *Tillman K.S., Byrne T.B*. Kinematic analysis of the Taiwan Slate Belt // Tectonics. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 322–341.

20. *Fridovskij V.Ju.* Deformacii i orudenenie Kularskogo segmenta Kular-Nerskogo slancevogo pojasa (Vostochnaja Jakutija) // Izv. vuzov. Geol. i razv. 1996. No. 4. P. 64–71.

21. *Aerden D.G.A.M.* Porphyroblast non-rotation during crustal extension in the Variscan Lys-Caillaouas Massif, Pyrenees // Jour. Struct. Geol. 1995. Vol. 17, No. 5. P. 709–725,

22. *Miller Ju.V.* Tektono-metamorficheskie cikly. L.: Nauka, 1982. 159 p.

23. *Lačný A., Plašienka D., Vojtko R.* Structural evolution of the Turňa Unit constrained by fold and cleavage analyses and its consequences for the regional tectonic models of the Western Carpathians // Geol. Carpathica. 2016. Vol. 67, No. 2. P. 177–193. https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0012

About the author

SUSTAVOV, Oleg Anatolyevich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), associate professor, Ural State Mining University, 30 Kuibyshev st., Yekaterinburg 620144, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-1880-5494, olsustavov@mail.ru.

Citation

Sustavov O.A. Cleavage microstructures and stretching indicators in black-slate rocks of the northern part of the Ulakhan-Sis antiform (Kularsky district, Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 31–42. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-31–42

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 551.345
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-43–51

Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики

П.Н. Скрябин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, Якутск, Россия
vsp@mpi.ysn.ru

Аннотация. *Представлены результаты экспериментальных исследований теплового режима верхних горизонтов криолитозоны в естественных условиях и при освоении региона. Показана структура радиационно-теплового баланса поверхности в различных природных подзонах. Количественно оценено влияние снежного, растительного и напочвенного покровов на формирование теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. На основе математического моделирования оценено влияние техногенных воздействий на тепловой режим грунтов. Приведены результаты прогноза изменения термического состояния грунтов при освоении территории северной тайги, лесотундры и южной тундры. Предложены основные задачи геотемпературного мониторинга при организации стационаров и полигонов в осваиваемых районах региона.*

Ключевые слова: Енисейская Арктика, климат, радиационный баланс, тепловой баланс, криолитозона, температура грунтов, мощность деятельного слоя, прогноз теплового режима.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках бюджетного проекта ИМЗ СО РАН 1.5.12 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика».*

Введение

Енисейская Арктика – один из районов криолитозоны, перспективных для комплексного развития. Но здесь, как и в других регионах криолитозоны, освоение территорий приводит к нарушению растительного и напочвенного слоя, микрорельефа, режима снегоотложения, поверхностного стока и мерзлотных условий. Нарушение теплового режима грунтов сопровождается недопустимыми деформациями сооружений, а иногда и их полным разрушением. На сильнольдистых грунтах начинают развиваться опасные для устойчивости сооружений криогенные процессы – термокарст, солифлюкция, оврагообразование и др. Перечисленные трудности при освоении территорий обусловлены недостаточной изученностью теплового режима грунтов.

Многолетнемерзлые породы Енисейской Арктики распространены от Карского моря до 60° с.ш. Первые сведения о многолетнемерзлых породах были получены при проведении исследований природы высокоширотных регионов. Мерзлотные исследования начали систематически проводиться в советское время в связи с освоением этого региона. Наибольший объем геокриологических исследований выполнен Игарской мерзлотной станцией, основанной в 1930 г. Главсевморпутем и переданной в 1937 г. в систему Академии наук СССР. На участке станции по инициативе М.И. Сумгина в 1936 г. были организованы режимные термические наблюдения. В 1940–1960 гг. геокриологические условия в долине Енисея на участке Игарка–Усть-Порт охарактеризовали сотрудники мерзлотной станции. Многолетние экспериментальные исследования криогенных процессов, физико-механических свойств мерзлых пород проведены А.М. Пчелинцевым [1]. С 1964 г. Игарская НИМС начала изучение геокриологических условий вдоль магистрального газопровода Игарка–Талнах, а также в районах месторождений природного газа. Температура, морфология и распространение многолетнемерзлых пород равнинных территорий Енисейско-Пясинского Севера детально рассматриваются в работах Г.С. Константиновой, А.П. Тыртикова, Н.Ф. Григорьева, Е.Г. Карпова [2–9].

По геокриологическому районированию Енисейского Севера [10] подзона южной тундры отнесена к северной геокриологической зоне, лесотундры – к центральной, а северной тайги – к южной. В пределах региона в направлении с се-

© Скрябин П.Н., 2021

вера на юг встречается сплошное, прерывистое и островное распространение мерзлой толщи. Монолитное залегание мерзлых пород на севере сменяется на слоистое к югу. В направлении с запада на восток увеличивается мощность и понижается температура мерзлых пород.

Инженерно-геокриологические условия осваиваемых районов региона освещены в работах научно-исследовательских и проектных организаций: мерзлотной станции Норильского горно-металлургического комбината, Московского госуниверситета им. М.В. Ломоносова, ВНИИГаз Министерства газовой промышленности СССР, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова и других [11–20].

Несмотря на значительный объем исследований, мерзлотные условия региона изучены весьма неравномерно и не в полной мере. Более детально изучены районы Игарки, Дудинки, Норильска. Мало изучены мерзлотные условия левобережья р. Енисей, южнее трассы газопровода Соленое–Норильск, также междуречья Енисея и Пясины.

Изучение закономерностей формирования теплового режима грунтов, его пространственно-временных изменений, развития процессов промерзания-протаивания в естественных условиях и при техногенных воздействиях представляет интерес в научно-теоретическом плане и для практических целей: проектирования, строительства и эксплуатации линейных и площадных сооружений, охраны и рационального использования геологической среды. Это свидетельствует об актуальности исследований теплового режима грунтов в осваиваемых районах криолитозоны и в частности Енисейской Арктики. Термическое состояние грунтов является одной из основных характеристик геокриологических условий, определяющих устойчивость природно-технических систем при изменении климата и антропогенных воздействиях.

Материалы и методы исследований

Геокриологические исследования сотрудников Игарской НИМС позволили оценить особенности формирования термического состояния грунтов в различных природных условиях.

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

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

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

Во всех подзонах повсеместно распространены подземные льды. Полигонально-жильные льды залегают в торфяниках под слоем сезонного протаивания на глубине всего лишь 0,5–0,6 м. Мощность льдов по высоте достигает 4–5 м. В глинистых грунтах развиты сегрегационные льды. На контакте суглинков и отложений с валунными материалами встречаются пластовые льды мощностью до 2 м. В озерно-ледниковых глинах обнаружены уникальные залежи пластовых льдов, мощность которых превышает 20–30 м.

Начиная с 1950-х гг. геокриологи стали организовывать круглогодичные стационарные исследования теплового режима грунтов слоя годовых теплооборотов. Эти работы особенно расширились с 1970-х гг., когда началось планомерное освоение криолитозоны Европейского Севера, Западной и Восточной Сибири, также Дальнего Востока.

Стационарные теплобалансовые исследования, выполненные впервые в подзонах северной тайги и южной тундры на Енисейской Арктике в 1971–1978 гг., и математическое моде-

лирование охватывают широкий круг вопросов, связанных с изучением теплового режима грунтов в естественных условиях и при освоении территории (рис. 1).

В основу исследований был положен метод теплофизики ландшафтов. Экспериментальные исследования включали микрометеорологические, актинометрические, теплофизические, гидротермические режимные наблюдения и геокриологический прогноз. Стационары были организованы в наиболее типичных мерзлотно-климатических условиях на участках местности, различающихся наземными покровами, составом грунтов и видами техногенного воздействия. В 1971–1974 гг. на Игарском теплобалансовом стационаре в подзоне северной тайги режимные исследования были проведены на пяти площадках: разнотравный луг, березовый лес, оголенный участок, торфяник, с пленочным покрытием. Работы в подзоне южной тундры на Соленинском стационаре в 1974–1976 гг. охватили мохово-лишайниковую и сфагново-ерниковую тундровые участки, осоково-сфагновое болото, площадки с удаленным и нарушенным напочвенным покровами, с пенопластовым и бревенчатым покрытиями. В 1977–1978 гг. в подзоне южной тундры сезонный стационар в районе пос. Геологический включал следующие площадки: мохово-лишайниковая, мохово-ерниковая, тундровые участки, с удаленным напочвенным покровом, с естественным зарастанием, с посевами различных трав [21].

Принятая для условий Заполярья рациональная методика режимных стационарных наблюдений характеризуется достаточной простотой, точностью и надежностью.

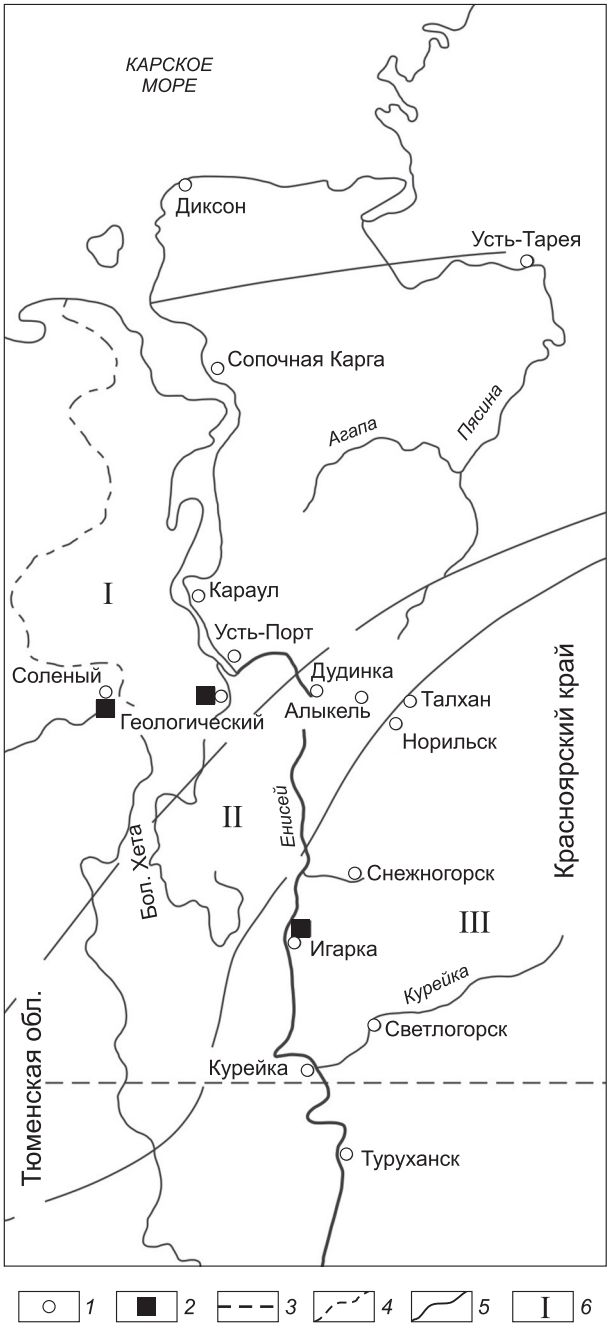


Рис. 1. Обзорная карта районов исследований
1 – метеостанции, *2* – теплобалансовые стационары, *3* – северный полярный круг, *4* – границы административных областей, *5* – границы и *6* – номера природных подзон (I – южно-тундровая, II – лесотундровая, III – северотаежная).

Fig. 1. Overview map of research areas.
1 – meteorological stations, *2* – heat balance stations, *3* – the Arctic circle, *4* – boundaries of administrative regions, *5* – boundaries and *6* – numbers of natural subzones (I – Southern tundra, II – Forest Tundra, III – Northern Taiga).

Результаты и обсуждения

Тепловой режим грунтов формируется в результате тепловлагообмена с приземным слоем атмосферы. Развитие теплофизических процессов в атмосфере и верхних слоях литосферы обусловлено солнечной радиацией – практически единственным внешним источником энергии на Земле. Основные уравнения радиационного и теплового баланса открытого участка местности обычно представляются в виде

$$Q_c(1 - A) - J_{эф} = R, \quad (1)$$

$$R = P + LE + B, \quad (2)$$

где Q_c – суммарная солнечная радиация; A – отражательная способность (альбедо) поверхности; $J_{эф}$ – эффективное излучение. представляющее собой разность между излучением поверхности Земли $J_п$ и встречным излучением

Таблица 1

Составляющие теплового баланса на открытом участке местности

Table 1

Components of energy exchange between soil and atmosphere in an open area

Игарка (1971–1974 гг.)/ Igarka (1971–1974)						*Пос. Соленый (1974–1976 гг.)/ Solenyi Village (1974–1976)*					
Составляющие/ Constituents						Составляющие/ Constituents					
	МДж/м^2 MJ/m^2			%			МДж/м^2 MJ/m^2			%	
	Теплый период/ Warm Period	Холодный период/ Cold Period	Год/ Year	Теплый период/ Warm Period	Год/ Year		Теплый период/ Warm Period	Холодный период/ Cold Period	Год/ Year	Теплый период/ Warm Period	Год/ Year
Q	1848	1360	3208	100,0	100,0	*Q*	1672	1403	3075	100,0	100,0
S	424	885	1309	22,9	40,7	*S*	381	1230	1611	22,9	52,5
$I_{эф}$	540	324	864	29,4	27,4	$I_{эф}$	406	357	763	24,4	24,7
R	884	151	1035	47,8	32,2	*R*	885	–184	701	52,7	22,8
P	307	154	461	16,5	14,3	*P*	37,8	–	–	22,6	–
LE	473	41	514	25,6	16,0	*LE*	348	–	–	20,8	–
B	104	–96	8	5,7	0,3	*B*	109	–113	–4	6,5	–0,1

атмосферы $J_а$ ($J_{эф} = J_п – J_а$); *R* – результирующая лучистого теплообмена (радиационный баланс); *P* – турбулентный теплообмен; *LE* – затраты тепла на испарение (*E* – значение испарения, *L* – теплота испарения воды); *B* – поток тепла в грунт.

В подзоне северной тайги экспериментально оценено влияние снежного, травяного, мохового и лесного покровов на теплообмен между грунтом и атмосферой. Под пологом леса в 3 раза снижается радиационный баланс, в 2 раза – затраты тепла на испарение. Охлаждающее влияние лесного покрова на температурный режим грунтов составляет в среднем за год 0,7, а мохового – 2 °С [22].

Изучены основные свойства снежного покрова в северной тайге и южной тундре. Так, в структуре снежного покрова северной тайги отмечена многослойность; наблюдается уменьшение плотности снега в нижних горизонтах за счет диффузионного переноса пара; тонкие ледяные корки толщиной 3–5 см уменьшают поток водяного пара из почвы в снежный покров всего на 14–24 %; испарение снега под пологом березового леса в 1,4 раза меньше открытого участка; отепляющее влияние снега в южной тундре более чем в 3 раза меньше, чем в северной тайге [23].

Особенностью структуры теплового баланса в южной тундре по сравнению с северной тайгой является снижение затрат тепла на испарение и увеличение теплового потока в грунт (табл. 1). Выявлено влияние напочвенных покровов, заболоченности на теплообмен грунтов с атмосферой. Установлена ведущая роль локальных факторов по сравнению с зональными в закономерностях формирования теплового режима грунтов.

Экспериментальное изучение коэффициента теплопроводности напочвенных покровов, заторфованных грунтов выявило его значительные изменения в течение года и установило их расчетные значения.

Количественные оценки влияния техногенных воздействий выявили, что годовые теплообороты и глубина протаивания могут изменяться в 1,5–2,5 раза, а средняя годовая температура грунтов – на 1–8 °С и более. Исследования теплофизических аспектов биологической рекультивации показали, что посевы злаковых трав способны стабилизировать изменения теплового режима грунтов на нарушенных участках тундры. Осуществлено схематическое картирование радиационного баланса поверхности и предложена упрощенная энергетическая классификация ландшафтных комплексов.

С помощью моделирования составлен прогноз изменения глубины сезонного протаивания и средней годовой температуры грунтов при тех-

Таблица 2

Прогноз изменений температуры и глубины сезонного протаивания грунтов

Table 2

Forecast of the change and the depth of seasonal thawing of soils

Тип местности/ Terrain Type	Естественные условия/ Natural Conditions	Уплотнение снега/ Snow Settlement	Удаление снега/ Snow Removal	Удаление растительного покрова/ Vegetation Removal	Удаление снега и растительного покрова/ Snow & Vegetation Removal
	$\frac{t_0, °C}{\xi, м}$	$\frac{t_0, °C}{\xi, м}$	$\frac{t_0, °C}{\xi, м}$	$\frac{t_0, °C}{\xi, м}$	$\frac{t_0, °C}{\xi, м}$
Южная тундра/Southern Taiga					
Пойменный/ Floodplain	$\frac{–0,6…–0,8}{1,2…1,3}$	$\frac{–6,6…–6,9}{0,8…1,0}$	$\frac{–9,7…–10,7}{0,8…0,9}$	$\frac{–0,4…–0,5}{1,0…1,6}$	$\frac{–9,9…–10,6}{0,9…1,2}$
Водораздельный/ Dividing	$\frac{–5,0…–7,3}{0,4…0,6}$	$\frac{–8,1…–10,3}{0,3…0,5}$	$\frac{–9,9…–11,7}{0,3…0,5}$	$\frac{–4,0…–6,5}{0,6…1,2}$	$\frac{–10,0…–11,6}{0,5…1,0}$
Лесотундра/Forest Tundra					
Пойменный/ Floodplain	$\frac{–0,4…–0,6}{0,7…1,5}$	$\frac{–6,3…–6,5}{0,8…1,0}$	$\frac{–8,9…–9,8}{0,8…0,9}$	$\frac{–0,4…–0,5}{1,1…1,5}$	$\frac{–8,8…–9,8}{0,9…1,2}$
Водораздельный/ Dividing	$\frac{–3,8…–5,0}{0,7…1,3}$	$\frac{–8,3…–8,9}{0,7…1,2}$	$\frac{–9,6…–10,8}{0,7…1,1}$	$\frac{–1,9…–4,2}{1,0…1,8}$	$\frac{–9,4…–10,5}{0,9…1,4}$
Северная тайга/Northern Taiga					
Пойменный/ Floodplain	$\frac{–0,1…–0,4}{1,0…1,6}$	$\frac{–6,0…–6,3}{0,9…1,1}$	$\frac{–8,5…–8,6}{0,9…1,0}$	$\frac{–0,1…–0,4}{1,5…1,6}$	$\frac{–8,6…–8,7}{1,0…1,3}$
Водораздельный/ Dividing	$\frac{–0,4…–0,5}{0,9…1,5}$	$\frac{–4,9…–6,9}{0,9…1,4}$	$\frac{–8,8…–9,6}{0,8…1,3}$	$\frac{0,0…–0,7}{1,0…2,3}$	$\frac{–8,2…–8,7}{1,0…1,8}$

ногенных воздействиях. Изменения теплового режима грунтов за многолетний период и при освоении возрастают с севера на юг (табл. 2).

В 1974–1977 гг. Институт мерзлотоведения СО АН СССР проводил инженерно-геокриологические исследования на Соленинском и Мессояхских газовых месторождениях и на трассе газопровода Мессояха–Норильск. На основе данных натурных наблюдений была оценена эффективность методов инженерной и биологической рекультивации, рассмотрен комплекс мероприятий и средств, способствующих защите мерзлотных ландшафтов от разрушения. Совместно с институтом ВНИИГаз, ВСЕГИНГЕО и объединением Норильскгазпром были составлены рекомендации и руководство, предназначенные для специалистов по проектированию, строительству и эксплуатации площадных и линейных сооружений в районах Севера [24, 25].

В 2020 г. принята государственная программа «Стратегия развития Российской Арктики до 2035 г.». Программа предусматривает разработку проекта системы «Вечная мерзлота АЗРФ». Целью проекта является создание государственного мониторинга вечной мерзлоты, для обеспечения экологического пользования криогенных ресурсов и устойчивого развития арктических территорий.

Исследования состояния криолитозоны включают организацию геотемпературного мониторинга – эффективной системы изучения, оценки состояния и прогноза эволюции теплового режима грунтов при изменении климата и антропогенных воздействий.

В первоочередные задачи исследований закономерностей формирования термического состояния грунтов входит: 1) выбор объектов режимных наблюдений на основе ландшафтной дифференциации; 2) организация наблюдательной сети, охватывающей естественные, нарушенные ландшафты и природно-технические системы; 3) совершенствование методики, автоматизации экспериментов и обработки информации; 4) прогноз эволюции термического состояния верхних горизонтов криолитозоны; 5) разработка технологических решений по защите ландшафтов при деградации криолитозоны.

Выводы

1. Систематизированы данные региональных геокриологических исследований об особенностях термического состояния грунтов под влиянием природно-климатических условий в подзонах северной тайги, лесотундры и южной тундры.

2. Экспериментальные данные круглогодичных стационарных теплобалансовых наблюдений послужили основой количественной оценки влияния лесного, снежного и напочвенного покровов на тепловой режим грунтов в естественных и нарушенных условиях.

3. На основе математического моделирования приведен результаты прогноза изменения глубины протаивания и средней годовой температуры грунтов при антропогенных воздействиях.

4. Сформулированы основные задачи организации геотемпературного мониторинга в осваиваемых территориях региона.

Литература

1. *Пчелинцев А.М.* Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.: Наука, 1964. 260 с.

2. *Константинова Г.С.* Многолетнемерзлые горные породы Енисейско-Пясинского Севера // Вопросы региональной геокриологии Средней Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 114–139. (Тр. Игарской НИМС, вып. 2).

3. *Тыртиков А.П.* Мощность сезонно-талого слоя почвы в районе Игарки // Труды Игарской НИМС. М., 1961. Вып. 2. С. 91–96.

4. *Григорьев Н.Ф.* О современном промерзании пород в процессе обмеления рек в районах Енисейского Севера // Гидрогеология Енисейского Севера. Л., 1969. С. 106–108.

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

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

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

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

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

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

11. *Чжан Р.В.* Участие Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в научном сопровождении мегапроектов в Восточной Сибири // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, 3–7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 14–17.

12. *Гончаров Ю.М., Попович А.П.* Опыт строительства и эксплуатации производственного здания на пространственном вентилируемом фундаменте в г. Норильске // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума, 3–7 сентября 2011 г., г. Мирный, Россия. Якутск: Издательство Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. С. 516–518.

13. *Дроздов Д.Г., Малкова Г.В., Украинцева Н.Г., Коростелев Ю.В.* Мониторинг геокриологических условий южнотундровых ландшафтов Европейского Севера и Западной Сибири // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 159–164.

14. *Круподеров В.С., Дубровин В.А.* Проблемные аспекты изучения и освоения Арктической криолитозоны // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 275–279.

15. *Оберман Н.Г.* Многолетний режим температуры криолитозоны европейского Северо-Востока в течение современного потепления климата // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 359–364.

16. *Рыкова В.В., Шевцова Э.Ю.* Особенности возведения инженерных сооружений в криолитозоне: анализ информационного массива из БД «Проблемы Севера» // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. С. 519–523.

17. *Шполянская Н.А.* Особенности плейстоценово-голоценовой истории криолитозоны западного и восточного секторов Российской Арктики и Субарктики // Труды Десятой Международной конференции по мерзлотоведению, г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО), Россия, 25–29 июня 2012 г. Т. 3. Салехард, 2012. С. 591–596.

18. *Мельников Н.И., Власов В.П.* Инженерно-геологическая изученность Северо-Востока России // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения: Тезисы докладов, г. Магадан (Россия), 5–8 сентября 2017 г. Магадан, 2017 С. 276–277.

19. *Serikov S.I.* Monitoring of the dynamics of rocks thermal regime in Eastern Siberia / S.I. Serikov [et al.] // Tenth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012). Volume 4 (Extended Abstracts in English). Tyumen, Russia: Pechatnik, 2012. P. 516–517.

20. *Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. Vol. 21. P. 136–155.

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

22. *Скрябин П.Н.* Тепловой режим грунтов в районе Игарки // Вопросы геокриологии в трудах молодых ученых и специалистов. Якутск, 1976. С. 87–95.

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

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

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

Поступила в редакцию 16.06.2021
Принята к публикации 20.07.2021

Об авторе

СКРЯБИН Павел Николаевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, Россия, ул. Мерзлотная 36, Россия, https://orcid.org/0000-0001-8155-378X, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus ID: 6508006475, vsp@mpi.ysn.ru.

Информация для цитирования

Скрябин П.Н. Тепловое состояние грунтов Енисейской Арктики // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 43–51. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-43–51

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-43–51

Thermal state of soils in the Yenisei Arctic

P.N. Skryabin

Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia
vsp@mpi.ysn.ru

Abstract. *Results of the experimental studies of the thermal regime in the upper horizons of the cryolithozone under natural conditions and during the development of the region are presented. The structure of radiation-thermal balance over the surface in different natural sub-zones is demonstrated. The effect of snow, vegetation and ground covers on the formation of thermal regime of the soils of annual heat turnover is evaluated quantitatively. The effect of technogenic impact on the thermal regime of soils is estimated on the basis of mathematical modeling. Results of the prediction of changes in the thermal state of soils caused by the development of the northern taiga, forest-tundra and southern tundra territories are described. The major tasks of geothermal monitoring related to the arrangement of observation stations and testing areas in the regions under development are proposed.*

Keywords: Yenisei Arctic, climate, radiation balance, thermal balance, cryolithozone, soil temperature, thickness of the active layer, forecast of thermal regime.

Acknowledgements. *The research was carried out within the framework of fundamental prospecting research 1.5.12 (Project No. 4 Thermal field and cryogenic layer in the North-East of Russia. Features of formation and dynamics).*

References

1. *Pchelintsev A.M.* Stroenie i fiziko-mekhanicheskie svoistva merzlykh gruntov. M.: Nauka, 1964. 260 p.

2. *Konstantinova G.S.* Mnogoletnemerzlye gornye porody Eniseisko-Pyasinskogo Severa // Voprosy regional'noi geokriologii Srednei Sibiri. M.: Izd-vo AN SSSR, 1961. P. 114–139. (Tr. Igarskoi NIMS, vyp. 2).

3. *Tyrtikov A.P.* Moshchnost' sezonno-talogo sloya pochvy v raione Igarki // Trudy Igarskoi NIMS. M., 1961. Iss. 2. P. 91–96.

4. *Grigor'ev N.F.* O sovremennom promerzanii porod v protsesse obmelenii rek v raionakh Eniseiskogo Severa // Gidrogeologiya Eniseiskogo Severa. L., 1969. P. 106–108.

5. *Karpov E.G.* O temperature merzloi zony Taimyrskoi depressii // Gidrogeologiya Eniseiskogo Severa. L., 1969. Iss. 1. P. 75–77.

6. *Tyrtikov A.P.* Razvitie rastitel'nosti kak faktor formirovaniya i dinamiki mnogoletnemerzlykh porod // Problemy Severa. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963. Iss. 7. P. 227–231.

7. *Bakulin F.G., Ermakov V.F.* Novye dannye o temperature mnogoletnemerzlykh porod v Zapadnoi Sibiri // Geokriologicheskie issledovaniya. Yakutsk: Kn. izd-vo, 1971. P. 83–85.

8. *Grigor'ev N.F.* Izmenenie merzlotnykh uslovii pri sozdanii vodokhranilishch v Zapolyar'e (na primere Khantaiskogo vodokhranilishcha) // Voprosy razvitiya i osvoeniya merzlykh tolshch. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1990. P. 85–90.

9. *Kazanskii O.A.* Vliyanie mokhovo-torfyanykh pokrovov na temperaturnyi rezhim gruntov (na primere raiona nizhnego techeniya r. Kureiki) // Termika pochv i gornykh porod v kholodnykh regionakh. Yakutsk: IMZ SO AN SSSR, 1982. P. 80–89.

10. *Sheveleva N.S., Khomichevskaya L.S.* Geokriologicheskie usloviya Eniseiskogo Severa. M.: Nauka, 1967. 128 p.

11. *Chzhan R.V.* Uchastie Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN v nauchnom soprovozhdenii megaproektov v Vostochnoi Sibiri // Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma, 3–7 sentyabrya 2011 g., g. Mirnyi, Rossiya. Yakutsk: Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. P. 14–17.

12. *Goncharov Yu.M., Popovich A.P.* Opyt stroitel'stva i ekspluatatsii proizvodstvennogo zdaniya na prostranstvennom ventiliruemom fundamente v g. Noril'ske // Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma, 3–7 sentyabrya 2011 g., g. Mirnyi, Rossiya. Yakutsk: Izdatel'stvo Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. P. 516–518.

13. *Drozdov D.G., Malkova G.V., Ukraintseva N.G., Korostelev Yu.V.* Monitoring geokriologicheskikh uslovii yuzhnotundrovykh landshaftov Evropeiskogo Severa i Zapadnoi Sibiri // Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 159–164.

14. *Krupoderov V.S., Dubrovin V.A.* Problemnye aspekty izucheniya i osvoeniya Arkticheskoi kriolitozony // Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 275–279.

15. *Oberman N.G.* Mnogoletnii rezhim temperatury kriolitozony evropeiskogo Severo-Vostoka v techenie sovremennogo potepleniya klimata // Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 359–364.

16. *Rykova V.V., Shevtsova E.Yu.* Osobennosti vozvedeniya inzhenernykh sooruzhenii v kriolitozone: analiz informatsionnogo massiva iz BD «Problemy Severa» // Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 519 – 523.

17. *Shpolyanskaya N.A.* Osobennosti pleistotsenovogolotsenovoi istorii kriolitozony zapadnogo i vostochnogo sektorov Rossiiskoi Arktiki i Subarktiki // Trudy Desyatoi Mezhdunarodnoi konferentsii po merzlotovedeniyu, g. Salekhard, Yamalo-Nenetskii avtonomnyi okrug (YaNAO), Rossiya, 25–29 iyunya 2012 g. Vol. 3. Salechard, 2012. P. 591 – 596.

18. *Mel'nikov N.I., Vlasov V.P.* Inzhenerno-geologicheskaya izuchennost' Severo-Vostoka Rossii // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya: Tezisy dokladov, g. Magadan (Rossiya), 5–8 sentyabrya 2017 g. Magadan, 2017. P. 276–277.

19. *Serikov S.I.* Monitoring of the dynamics of rocks thermal regime in Eastern Siberia / S.I. Serikov [et al.] // Tenth International Conference on Permafrost (TICOP): Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World (Salekhard, Yamal-Nenets Autonomous District, Russia, June 25–29, 2012). Volume 4 (Extended Ab-

stracts in English). Tyumen, Russia: Pechatnik, 2012. P. 516–517.

20. *Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., Malkova G.V., Kholodov A.L., Marchenko S.S., Moskalenko N.G., Sergeev D.O., Ukraintseva N.G., Abramov A.A., Gilichinsky D.A., Vasiliev A.A.* Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. Vol. 21. P. 136–155.

21. *Skryabin P.N., Sergeev B.P.* Teplovoi rezhim gruntov Eniseiskogo Severa. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1989. 176 p.

22. *Skryabin P.N.* Teplovoi rezhim gruntov v raione Igarki // Voprosy geokriologii v trudakh molodykh uchenykh i spetsialistov. Yakutsk, 1976. P. 87–95.

23. *Sergeev B.P., Skryabin P.N.* Radiatsionnyi rezhim razlichnykh vidov deyatel'noi poverkhnosti na severe Krasnoyarskogo kraya i Tyumenskoi oblasti // Geoteplofizicheskie issledovaniya v Sibiri. Novosibirsk, 1978. P. 73–85.

24. *Rekomendatsii* po vyboru i podgotovke stroitel'nykh ploshchadok, inzhenernoi i biologicheskoi rekul'tivatsii tundrovykh massivov, narushennykh v rezul'tate stroitel'stva gazoprovodov. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1978. 25 p.

25. *Vremennoe* rukovodstvo po zashchite landshaftov pri prokladke gazoprovodov na Krainem Severa. Yakutsk: In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1980. 44 p.

About the author

SKRYABIN, Pavel Nikolayevich, Cand. Sci. (Geography), senior researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-8155-378X, ResearcherID: V-9373-2018, Scopus ID: 6508006475, vsp@mpi.ysn.ru.

Citation

Skryabin P.N. Thermal state of soils in the Yenisei Arctic // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 43–51. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-43–51

УДК 551.34+631.417.1
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-52–63

Поверхностный органический и неорганический углерод в ландшафтах Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия)

А.М. Черепанова[1,2,*], В.В. Спектор[1], А.Г. Шепелев[1,2]

[1]*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия*
[2]*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

**alexandra_587@mail.ru*

Аннотация. *В исследованиях оценено содержание органического и неорганического углерода для верхней части деятельного слоя голоценовых отложений, представленных большей частью супесью, сформировавшейся на Бестяхской и Тюнгюлюнской террасах в Лено-Амгинском междуречье. Для территории проявляется отчетливая закономерность уменьшения содержания органического углерода по направлению с юга на север и в зависимости от структурных особенностей террасированности ландшафтов. В среднем этот показатель на южной окраине Тюнгюлюнской псевдотеррасы составляет 7,70 % $C_{орг}$, в центральной части Тюнгюлюнской поверхности (участок Бёкё) – 1,64 % $C_{орг}$, а на севере при сочленении Тюнгюлюнской поверхности с Бестяхской органический углерод убывает до минимального содержания, равного 0,99 % $C_{орг}$. Форма неорганического углерода имеет более сложное рассеянное распределение между террасами. В центральной части Тюнгюлюнской поверхности его содержание в среднем составляет 1,03 % $C_{неорг}$ с внезапным снижением к Тюнгюлюнской псевдотеррасе – 0,19 % $C_{неорг}$ и возвышенности на участке Улу-Кюель до 0,03 % $C_{неорг}$. Влияние постпирогенного прошлого на участках Майя-2 и Беджелек отражается в истощении и потере заметного содержания органического углерода из верхних горизонтов почвы по сравнению с участком Майя-1 на 55 и 80 % соответственно. Вместе с тем за 19 лет самовосстановления лесной подстилки намечается повышение содержания углерода растительного происхождения, близкого к исходному состоянию.*

Ключевые слова: органический углерод, неорганический углерод, деятельный слой, Лено-Амгинское междуречье, Центральная Якутия.

Благодарности. *Работа выполнена при поддержке базового проекта СО РАН по теме «Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене», регистрационный номер АААА-А20-120122290035-5.*

Введение

Многолетняя мерзлота, покрывающая почти четверть поверхности суши Северного полушария, за последние несколько десятилетий значительно прогрелась вследствие продолжающегося изменения климата [1–3]. Процесс таяния высокольдистых отложений потенциально влечет глобальные последствия из-за высокого содержания в них углерода органических остатков, по оценкам [4–6], органический углерод составляет 1100–1700 Гт, часть его может выделяться в виде CO_2 и CH_4 при оттаивании. Однако, неучтенным и малоизученным остается углерод в глубоких горизонтах мерзлоты, о реакции которого на меняющийся климат нам мало что известно, но это перспективные исследования ближайшего времени.

Запасы углерода Северного полушария сосредоточены в толще многолетнемерзлых пород [7], что означает их нахождение в законсервированном состоянии как минимум два года. Углерод в мерзлотных почвах формировался тысячелетиями [8]. Оценка потерь углерода из мерзлоты является важным индикатором уязвимости запасов углерода к потеплению и перераспределения углерода из почвы в атмосферу [9–11]. По прогнозам к 2100 г. площадь верхней кровли мерзлоты сократится на 2–66 %, что примерно высвободит от 10 до 240 Гт углерода многолетней мерзлоты [12, 13].

На изменения углерода в покровных отложениях криолитозоны влияет множество факторов климатического и геологического направления. Дестабилизация многолетней мерзлоты включает

© Черепанова А.М., Спектор В.В., Шепелев А.Г., 2021

ряд механизмов, действующих в различных временных и пространственных направлениях. Повышение температуры способствует постепенному углублению деятельного слоя и сокращению площади многолетней мерзлоты [15], осадки и пожары [16] влекут разрушение ландшафтов и вместе с тем истощение запасов органического углерода. Уменьшение высокольдистых голоценовых и плейстоценовых отложений, богатых углеродом, особенно четко выражаются в наше время вследствие активизации термокарстовых процессов, которые широко распространены в центральной части и на северо-востоке Якутии.

Цель исследования заключалась в изучении содержания органического и неорганического углерода в верхней части деятельного слоя в естественном лесном и постпирогенном ландшафте на территории Лено-Амгинского междуречья.

Объекты и методы исследования

В геолого-геоморфологическом отношении исследования относятся к Лено-Амгинскому междуречью, что составляет часть Центральноякутской низменности, лежащей в провинции Среднесибирской возвышенности [17] на Лено-Амгинской аласной провинции физико-географической страны Средняя Сибирь [18]. Район характеризуется широким развитием термокарстовых форм рельефа [19]. Мощность ледового комплекса составляет 10–12 м, а глубина его залегания – 2 м [20]. По почвенно-географическому районированию территория относится к бореальному (умеренно-холодному) поясу Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области, к Центрально-Якутской провинции среднетаежной подзоны мерзлотно-таежных и палевых почв [21].

Ключевой участок Майя-1 расположен в 9,4 км к северо-северо-западу от с. Майя, абсолютная высота составляет 155 м над уровнем моря (см. рисунок 1 и табл. 1). Рассматриваемая поверхность лежит в пределах Тюнгюлюнской псевдотеррасы. Она имеет пологий наклон, местами горизонтальная, осложнена аласными котловинами. На поверхности развит смешанный лиственнично-березовый лес. В верхнем ярусе распространены березы и лиственницы высотой 8–10 м. Подлесок представлен порослью лиственницы высотой 1,5–2 м и локально соснами. В напочвенном покрове отмечаются брусничник и растительная ветошь. Граница, не затронутая и затронутая пожаром 2002 г., четко прослеживается относительно лесной дороги, послужившей естественным препятствием для распространения огня на данном участке. На не затронутом пожаром участке в 20 м слева (при следовании с юга на север) от дороги заложен разрез – N61°49′12,7″, E130°14′03,2″.

Участок Майя-2 расположен в той же области, что и первый, но на южном крае лесного пожара 2002 г. Имеет пологий наклон северной экспозиции. На поверхности наблюдается большое количество поваленных стволов деревьев диаметром преимущественно до 10 см. Огневые борозды на стволах деревьев достигают высоты 1 м от земли. На участке развит смешанный лиственнично-сосновый лес с множеством стоящих оголенных стволов лиственниц, погибших от пожара. В подлеске отмечается поросль лиственницы высотой 1–3 м. Напочвенный покров представлен брусничником, отдельными кустарничками карликовой ивы, злаковыми травами, местами отмечаются зеленые мхи. Разрез заложен в координатах – N61°49′11,0″, E130°15′12,4″.

Участок Бёкё расположен на Тюнгюлюнской поверхности в районе одноименного села. Абсолютная высота составляет 140 м над уровнем моря. На поверхности развит смешанный лиственнично-березовый лес. На девственном участке заложен почвенный разрез – N61°52′21,3″, E130°28′43,8″.

Участок Беджелек расположен в месте перехода Бестяхской поверхности в Тюнгюлюнскую, имеет пологий уклон (1–3°) поверхности в западном направлении. Абсолютная высота составляет 140 м над уровнем моря. Растительность представлена лиственничным лесом, преобладающий диаметр стволов лиственниц около 10 см. На гари наблюдается молодая поросль лиственницы высотой 1–4 м. Напочвенный покров представлен брусничником и разнотравьем. Почвенный разрез заложен на менее нарушенном участке, в 20 м к востоку от границы с гарью с наибольшей интенсивностью пожара в 2002 г. – N61°57′19,2″, E130°10′14,8″.

Участок Улу-Кюель расположен на вершине положительной гребневидной ориентированной формы. Абсолютная высота составляет 134 м над уровнем моря. Гряда вытянута с северо-запада на юго-восток, параллельно линии проходящих озер. На поверхности развит сосновый лес, напочвенный покров представлен брусничником и широко распространенными лишайниками. Разрез заложен в координатах – N61°58′49,1″, E130°05′59,4″.

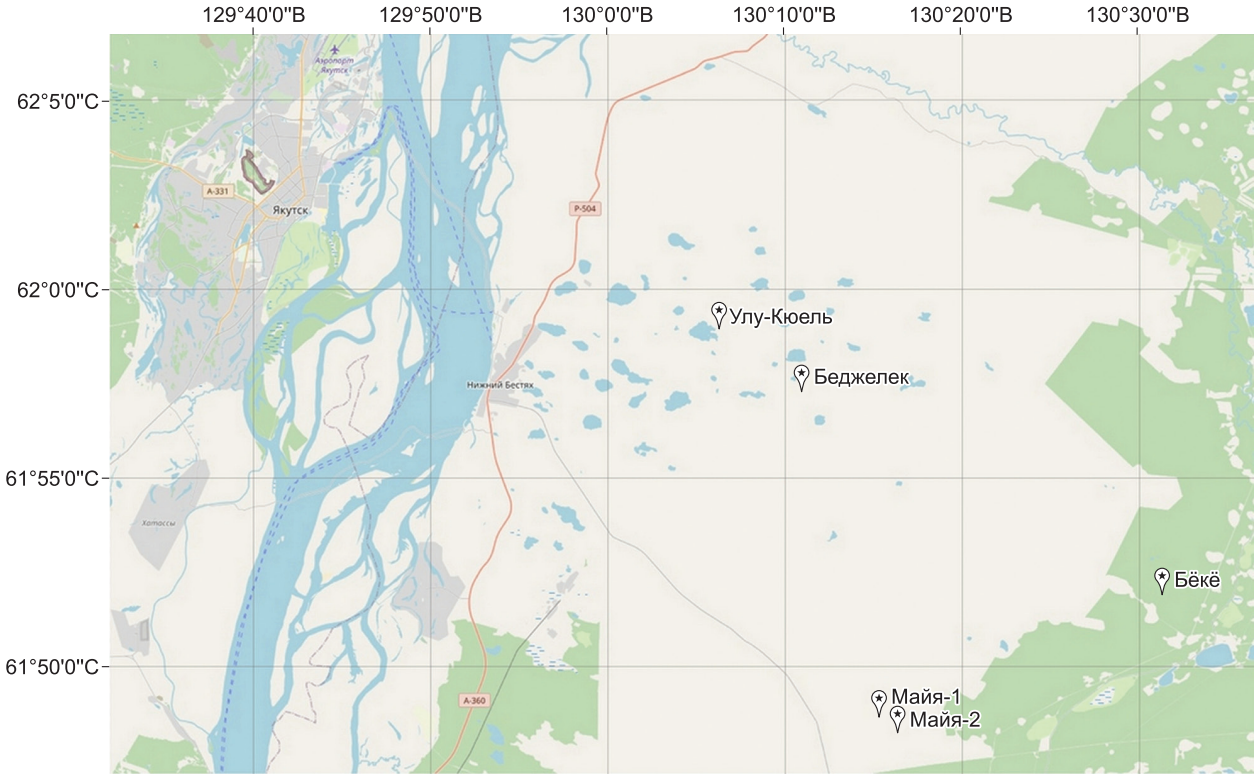


Схема расположения ключевых участков на территории Лено-Амгинского междуречья.

The arrangement of key areas within the Lena-Amga interfluve.

Территории участков развивались на ложе Муруктинского и Сартанского горизонтов с преобладанием озерных, озерно-болотных, озерно-аллювиальных и криогенно-эоловых отложений, т. е. образованных комплексом перигляциальных осадков. В настоящее время они являются рельефообразующей характеристикой района, сформировавшими водораздел между реками Лена и Амга. Четвертичные покровные отложения в основном слагаются супесью мощностью более 50 м и породами повышенной льдистости до 80 % от объема, что типично для территории Центральной Якутии.

Дочетвертичное развитие территории имеет более сложный геологический комплекс, сложенный разновозрастными свитами. Укугутская свита приурочена к участкам Майя, сунтарская свита – к участку Бёкё, биллэхская и нюлькючанская свиты – к участку Беджелек, марыкчанская, бергеинская и сытогинская свиты – к Улу-Кюель. В основном они представлены песчаниками, аргиллитами, алевролитами и углями, которые покрыты мощным чехлом четвертичных образований.

Результаты и обсуждение

В ближайшие десятилетия тундровые и бореальные районы сплошного распространения многолетней мерзлоты способны деградировать быстрее, чем это ожидалось ранее [2, 6]. В этих природных зонах находятся большие запасы органического углерода на Земле, которые в основном содержатся в толщах мерзлых отложений. Особую группу составляют различные его формы, в частности неорганический углерод ($C_{неорг}$). Происхождение данной формы углерода прослеживается из двух основных источников. Преимущественно в почвах $C_{неорг}$ выявляется из карбонатных минералов, таких как кальцит ($CaCO_3$) и доломит ($MgCO_3$), также на его образование сильное влияние оказывают процессы биотического дыхания почвы. В атмосфере $C_{неорг}$ содержится, главным образом, в виде углекислого газа (CO_2), концентрация которого составляет примерно 400 ppm и увеличивается примерно на 2 ppm в год [23]. Когда CO_2 растворяется в воде, он может существовать в различных формах, в зависимости от pH, это CO_2, бикарбонаты и карбонаты. Многие фотосинтетические организмы мо-

Таблица 1

Морфолитологическое описание исследованных участков

Table 1

Morpholithological description of the studied areas

Горизонт, м Horizon, m	Морфология Morphology
	Майя–1 Maya–1
0–0,03	Почвенно-растительный слой Soil and vegetation layer
0,03–0,10	Супесь темно-коричневого цвета с прослоями песка до глубины 0,07 м, сильно пронизанная корнями растений Dark brown sandy loam with interlayers of sand to a depth of 0.07 m, strongly penetrated by plant roots
0,10–0,20	Супесь темно-серая, массивная, пронизанная корнями растений Dark gray sandy loam, massive, penetrated with plant roots
0,20–0,40	Суглинок коричневый, с примесью тонкозернистого песка. Верхняя граница волнистая, с амплитудой до 5 см. На глубине 0,4 м проходит нижняя граница слоя сезонного оттаивания на дату 9 июня Brown loam with an admixture of fine-grained sand. The upper boundary is wavy, with an amplitude of up to 5 cm. At a depth of 0.4 m there is the lower boundary of the seasonal thawing layer on 9 June
	Майя–2 Maya–2
0–0,03	Почвенно-растительный слой Soil and vegetation layer
0,03–0,07	Супесь серовато-коричневого цвета с рассеянным залеганием песка до глубины 0,13 м, сильно пронизанная корнями растений A grayish-brown sandy loam with a scattered bedding of sand to a depth of 0.13 m, strongly penetrated by plant roots
0,07–0,35	Супесь коричневая, массивная. На глубине 0,35 м проходит нижняя граница слоя сезонного оттаивания на дату 10 июня Brown sandy loam, massive. At a depth of 0.35 m there is the lower boundary of the seasonal thawing layer on 10 June
	Бёкё Byokyo
0–0,01	Почвенно-растительный слой Soil and vegetation layer
0,01–0,10	Супесь серая, массивная, пылеватая, с небольшими (до 5 мм) включениями древесного угля. Нижняя граница неровная, затеками амплитудой до 3–5 см Gray sandy loam, massive, silty, with small (up to 5 mm) inclusions of charcoal. The lower boundary is uneven, with streaks of amplitude up to 3–5 cm
0,10–0,52	Супесь тяжелая, коричневая, массивная, в верхней части пронизанная корнями растений. Отмечаются неясные пятна более темного органического вещества на глубине 0,30 и 0,48 м. В талом состоянии наблюдается тонкая чешуйчатая (1–3 мм) отдельность The sandy loam is heavy, brown, massive, penetrated with plant roots in the upper part. Unclear spots of darker organic matter are noted at the depths of 0.30 and 0.48 m. In the thawed state a thin scaly (1–3 mm) join is observed
0,52–0,65	Суглинок легкий, светло-коричневый, массивный. На глубине 0,65 м проходит нижняя граница слоя сезонного оттаивания на дату 11 июня Light brown, massive and light loam. At a depth of 0.65 m there is the lower boundary of the seasonal thawing layer on 11 June

Окончание таблицы 1

Горизонт, м Horizon, m	Морфология Morphology
	Беджелек Bedzhelek
0–0,04	На поверхности почвы подстилка из хвои и разнотравья (0–0,02). Горизонт нарушен постпирогенным фактором. Между корневой системой растений и почвой наблюдаются рудименты древесного угля On the surface of the soil there is a litter of needles and herbs (0–0.02). The horizon is disturbed by the post-pyrogenic factor. There are rudiments of charcoal between the root system of the plants and the soil
0,04–0,27	Супесь коричневая, массивная, сильно пронизанная корнями растений. Нижняя граница с затеками, амплитудой до 5 см. На глубине 0,15 м отмечается включение органического вещества темно-коричневого цвета, размером 3×2 см (разложившихся органических остатков) Brown sandy loam, massive and strongly penetrated with plant roots. The lower boundary with streaks, with an amplitude of up to 5 cm. At a depth of 0.15 m there is an inclusion of organic matter of dark brown color, the size is 3×2 cm (of decomposed organic remains)
0,27–0,48	Супесь светло-коричневая, более тяжелая по сравнению с вышележащим слоем. Нижняя граница плавная. В интервале 0,33–0,37 м наблюдается вогнутый прослой суглинка темно-коричневого цвета Light brown sandy loam, heavier than the overlying layer. The lower border is smooth. A concave interlayer of dark brown loam is observed in the interval 0.33–0.37 m
0,48–0,65	Супесь темно-коричневого цвета, массивная. На глубине 0,65 м проходит нижняя граница слоя сезонного оттаивания на дату 12 июня Massive, dark brown sandy loam. At a depth of 0.65 m, there is the lower boundary of the seasonal thawing layer on 12 June
	Улу-Кюель Ulu-Kyuel
0–0,05	Лесная подстилка из брусники и лишайников. Горизонт от серого до темно-серого цвета Lingonberry and lichen litter. The horizon is from gray to dark gray color
0,05–0,22	Песок оранжевато-коричневый, ожелезненный, с темными пятнами органических остатков с криотурбациями, пронизанный корнями растений Sand is orange-brown, ferruginous, with dark spots of organic remains with cryoturbations, penetrated with plant roots
0,22–0,85	Песок мелкозернистый ожелезненный, оранжевато-коричневый, массивный. На глубине 0,70–0,74 м отмечается субгоризонтальный волнистый прослой песка интенсивно ожелезненный. На глубине 0,85 м проходит нижняя граница слоя сезонного оттаивания на дату 12 июня The sand is fine-grained, ferruginous, orange-brown and massive. At a depth of 0.70–0.74 m there is a subhorizontal wavy sand interlayer, intensely ferruginous. At a depth of 0.85 m, there is the lower boundary of the seasonal thawing layer on 12 June

гут превращать бикарбонаты в кислород. Сравнение количества органического и неорганического углерода может служить оценочным показателем их сохранности в многолетней мерзлоте, в том числе и как потенциальный источник парниковых газов. При потеплении и таянии мерзлоты находящиеся органические остатки как питательный субстрат становятся доступными для микробного разложения, обеспечивая положительную обратную связь с потеплением климата. Первый напрямую стимулирует метаболизм микроорганизмов, обеспечивая их углеродом. Второй косвенно активизирует круговорот органических веществ за счет повышения продуктивности растений и ускоренной смены подстилки. Это указывает на то, что изменения будут иметь противоположный результат на планетарный круговорот углерода, вовлеченного в функционирование надземных биомов и литологической трансформации мерзлоты.

Таблица 2

Содержание различных фракций углерода в начальный период оттаивания деятельного слоя

Table 2

The content of various carbon fractions in the initial period of thawing of the active layer

Участок Site	Глубина, м Depth, m	$C_{орг}$, % OC, %	$C_{неорг}$, % IC, %	$C_{общ}$, % TC, %
		Среднее ± ошибка Average±mistake		
Майя-1 Maya-1	0,0–0,03	17,73 ± 0,66	0,21 ± 0,01	17,94 ± 0,64
	0,03–0,10	17,29 ± 2,31	0,38 ± 0,08	17,67 ± 2,64
	0,12–0,15	2,20 ± 0,04	0,16 ± 0,01	2,35 ± 0,05
	0,20–0,25	0,83 ± 0,11	0,09 ± 0,01	0,93 ± 0,12
	0,30–0,35	0,47 ± 0,07	0,08 ± 0,01	0,56 ± 0,08
Майя-2 Maya-2	0,0–0,03	9,34 ± 1,43	0,33 ± 0,07	9,67 ± 1,47
	0,03–0,07	6,36 ± 2,77	0,29 ± 0,02	6,65 ± 2,76
	0,15–0,20	0,61 ± 0,13	0,12 ± 0,01	0,73 ± 0,15
	0,25–0,30	0,27 ± 0,05	0,09 ± 0,01	0,36 ± 0,06
Бёкё Byokyo	0,0–0,01	7,88 ± 1,09	0,41 ± 0,04	8,29 ± 1,05
	0,01–0,08	0,82 ± 0,06	0,14 ± 0,01	0,95 ± 0,06
	0,10–0,15	1,08 ± 0,09	0,51 ± 0,04	1,60 ± 0,09
	0,25–0,30	0,70 ± 0,04	1,95 ± 0,03	2,64 ± 0,02
	0,35–0,40	0,47 ± 0,01	2,22 ± 0,01	2,69 ± 0,02
	0,45–0,50	0,25 ± 0,01	0,64 ± 0,02	0,89 ± 0,02
	0,55–0,60	0,29 ± 0,01	1,34 ± 0,02	1,63 ± 0,03
Беджелек Bedzhelek	0,01–0,03	5,21 ± 0,38	0,27 ± 0,03	5,49 ± 0,40
	0,05–0,10	1,67 ± 0,05	0,22 ± 0,01	1,89 ± 0,05
	0,10–0,15	0,47 ± 0,04	0,08 ± 0,00	0,56 ± 0,05
	0,20–0,25	0,23 ± 0,02	0,11 ± 0,00	0,34 ± 0,02
	0,27–0,32	0,28 ± 0,01	0,33 ± 0,01	0,61 ± 0,01
	0,33–0,37	0,39 ± 0,05	0,32 ± 0,01	0,71 ± 0,06
	0,40–0,45	0,32 ± 0,03	1,44 ± 0,17	1,76 ± 0,20
	0,50–0,55	0,25 ± 0,00	0,58 ± 0,01	0,83 ± 0,01
	0,60–0,65	0,07 ± 0,00	0,18 ± 0,00	0,25 ± 0,00
Улу–Кюель Ulu-Kyuel	0,01–0,03	2,72 ± 0,36	0,10 ± 0,01	2,82 ± 0,35
	0,05–0,10	0,42 ± 0,01	0,03 ± 0,00	0,45 ± 0,01
	0,15–0,20	0,28 ± 0,05	0,02 ± 0,00	0,30 ± 0,06
	0,25–0,30	0,07 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,08 ± 0,00
	0,35–0,40	0,03 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,04 ± 0,00

Определение содержания углерода в грунтах проводилось на сертифицированном многофазном анализаторе углерода LECO RC612 производства фирмы «LECO Corporation» (США) в твердых образцах по стандарту DIN19539 методом температурного программирования в лабораторных условиях. Анализ на углерод проводили в трех определениях, что позволило разделить различные формы углерода на органический и неорганический.

В табл. 2 представлено вертикальное распределение содержания различных форм углерода. Между различными группами разрезов деятельного слоя выявились существенные различия. Наибольшее содержание $C_{орг}$ присуще для участков Майя-1, Майя-2 на Тюнгюлюнской террасо-

видной ступени и Бёкё на поверхности Тюнгюлюнской террасы с широким распространением термокарстовых форм рельефа, покровные отложения представлены лессовидными суглинками и разнородными супесями, их мощность составляет 30–50 м. С продвижением к надпойменной Бестяхской террасе пограничным по содержанию $C_{орг}$ оказался участок Беджелек в месте перехода Бестяхской поверхности в Тюнгюлюнскую. На участке Улу-Кюель содержание $C_{орг}$ зарегистрировано как самое низкое, что во многом связано с составом горной породы, которая представлена песком, положением участка в ландшафте и преобладанием соснового леса с низкой продуктивностью живой фитомассы. Влияние растительности на содержание органического углерода в исследуемых участках отчетливо проявляется в верхних горизонтах почвы, что следует из описания общей характеристики ключевых участков в разделе «Объекты и методы исследования» и табл. 1, за счет подстилочного компонента и залегания основной массы корней до 94 % в двух верхних горизонтах почвы. Отметим, что леса Лено-Амгинского междуречья разнообразны подлеском и травяно-кустарничковым ярусом. Отличительным признаком растительности является развитие лугово-лесостепных и лугово-болотно-лесных ландшафтов [24], сформированных в замкнутых понижениях на мерзлом основании с резко выраженной переменностью увлажнения и сухостью климата [25].

С изменением глубины фиксируется резкое падение содержания углерода на всех участках независимо от состава горной породы и постпирогенного состояния растительного покрова. Наличие корней в нижних минеральных горизонтах почвы не оказало заметного и сопутствующего повышения количества органического углерода, напротив, заметна тенденция к уменьшению. Это видно при сопоставлении соотношения $C_{орг}$ между органическими и минеральными горизонтами профильных разрезов, так в подстилочном и органо-аккумулятивном горизонтах (0–0,10 м) сосредоточено от 87 до 99 % $C_{орг}$ и всего лишь малая часть в минеральных горизонтах, что свойственно для каждого отдельного исследованного участка Центральной Якутии. Аналогичные наблюдения зафиксированы под еловыми лесами на Аляске [26] и на альпийских лугах Цинхай-Тибетского плато [27].

При рассмотрении данных с позиции постпирогенного состояния участков Майя-2 и Беджелек за 19 лет самовосстановления верхних горизонтов почвы, в том числе и лесной подстилки, содержание $C_{орг}$ по сравнению с неподверженным пожаром участком Майя-1 сократилось в 2 и 5 раз соответственно. Прогретая после пожара до 150–500 °С почва определяет степень потери углерода за счет высокой доступности органических остатков для микроорганизмов после выгорания растительности. В начальный период происходит интенсивное потребление субстрата микроорганизмами с последующим его истощением и ослаблением физико-химических процессов [28, 29]. Ряд исследователей указывают [30, 31], что после прохождения пожара происходит перераспределение углерода живой фитомассы в углерод отмерших частей растений. При этом процесс накопления биомассы и аккумулирования углерода в первые после пожара годы в значительной степени зависит от интенсивности горения, определяющей степень воздействия на надземные и подземные компоненты экосистемы. По мере отпада деревьев и поступления на поверхность почвы отмершей растительности происходит накопление запасов подстилки, которое наиболее интенсивно идет в первые годы после пирогенного воздействия.

Неорганический углерод – один из показателей содержания карбонатов в почве. Результаты определения показали, что $C_{неорг}$ имеет меньшую изменчивость по сравнению с $C_{орг}$, что отражается в его плавном распределении по почвенному профилю за исключением на участках Бёкё и Беджелек. Основное ядро $C_{неорг}$ приближается к значению 0,29 % на участке Майя-1 в верхних горизонтах почвы, прежде чем снижаться до 0,16 % на глубине 0,12–0,15 м. Так же, как и с органическим углеродом, высокая концентрация $C_{неорг}$ расположена в горизонтах от 0,0 до 0,10 м, что составляет 62 % от общей доли содержания в профиле почвы. Подобная закономерность наблюдается на участках Майя-2 – 68 %. Почвенный профиль участка Улу-Кюель полностью состоит из песка, поэтому в нем это значение составляет 86 %, причем максимальное содержание $C_{неорг}$ найдено только в интервале первого горизонта (0,01–0,03 м) – 0,10 %, затем с резким снижением на глубине 0,05–0,10 м до 0,03 % и следовыми значениями в слое 0,35–0,40 м.

На участках Бёкё и Беджелек залегание $C_{неорг}$ в деятельном слое неравномерное со значительным возрастанием в середине профиля от 1,95 до 2,22 % в пределах 0,25–0,30 и 0,35–0,40 м со-

ответственно, тогда как в горизонте 0,0–0,08 м среднее значение составило 0,27 % $С_{неорг}$. В среднем в минеральных горизонтах (0,10–0,60 м) участка Бёкё сконцентрировано 80 % $С_{неорг}$, а в Беджелек – 56 % $С_{неорг}$. Доля неорганического углерода от общего углерода на Тюнгюлюнской поверхности изменяется в узких пределах от 2 до 5 %. При переходе Тюнгюлюнской террасы в Бестяхскую имеет более свободные границы, варьирующие от 28 до 39 %. На участках Майя-1, Майя-2 и Улу-Кюель показатель отношения массовой доли компонентов в экосистеме составляет 28–83. Высокое отношение $С_{орг}$ к $С_{неорг}$ свойственно поверхностным горизонтам почв со значительным содержанием органического углерода и низкой долей неорганического углерода. В нижних (минеральных) горизонтах этот параметр сужается до 1–9. На участках Бёкё и Беджелек отношение $С_{орг}$ к $С_{неорг}$ равно 19 вследствие преобладания неорганической формы углерода в нижних горизонтах. Возможно, разносторонний характер образования и распределения неорганического углерода в Лено-Амгинском междуречье связан с геоморфологическими особенностями и развитием террас, при том, что чехол четвертичных отложений гомогенный, состоящий в основном из супеси.

На постпирогенных участках состояние органического углерода после 19 лет самовосстановления находится на высоком уровне за счет обновления и накопления подстилочного растительного материала. Возможно, решающее значение в образовании углерода и его восстановлении на нарушенных участках имеет масштабная деятельность почвенных микроорганизмов. Естественная изменчивость содержания углерода в условиях территориального развития многолетней мерзлоты взаимообусловлена компонентами природной среды, которые могут существенно изменяться под антропогенной или природной нагрузкой, и региональными особенностями: положением в ландшафте, типом почвы, термическим режимом, криолитологической спецификой и криогенных процессов, превышающими критические пределы экосистемы, независимо от того, действуют ли почва и мерзлота как источники углерода или все еще его накапливают.

Заключение

Данные, представленные в этой статье, указывают на высокое содержание органического углерода в слое почвы 0,0–0,10 м, практически для всех рассмотренных разрезов, варьирующее от 5,21 до 17,7 %, что составляет 87 и 99 % всего органического углерода, хранящегося в верхней части деятельного слоя. В минеральных горизонтах концентрация $С_{орг}$ резко падает и приближена к минимальному критическому уровню – от 1 до 13 % от общего его содержания в деятельном слое. Изучаемая территория покрыта мощным чехлом супеси, что является превалирующей причиной низкого содержания органического углерода в минеральных горизонтах, чего нельзя сказать о неорганическом углероде. Очевидно, что наличие кварца в супеси имеет большее значение для содержания неорганического углерода и его неравномерного залегания в разрезе. При этом трансформация неорганического углерода наглядно проявляется в различных рельефных условиях на участках Бёкё Тюнгюлюнской поверхности и Беджелек при сочленении Бестяхской и Тюнгюлюнской поверхностей, что подтверждается преобладанием от 56 до 80 % неорганического углерода в минеральных горизонтах.

В наших исследованиях использованный подход изучения углерода в отложениях ледового комплекса Лено-Амгинского междуречья выявил существенные различия в изменении содержания органического и неорганического углерода в естественных нетронутых ландшафтах и под влиянием пожаров спустя 19 лет после их завершения и восстановления растительного покрова. По сей день процесс образования и наслоения органических остатков продолжается и имеет колоссальную роль для сохранения многолетней мерзлоты и увеличения запасов органического углерода. Вероятнее всего, после окончания пожара и принесенного ущерба в виде потерь наземного и углерода верхних горизонтов почвы были компенсированы новым его накоплением за счет поступления живой фитомассы вновь возобновившейся растительности.

Литература

1. *Kaufman D., McKay N., Routson C. et al.* Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach // Sci Data. Vol. 201, No. 7. 2020. P. 1–13. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7.

2. *Varney R.M., Chadburn S.E., Friedlingstein P. et al.* A spatial emergent constraint on the sensitivity of soil carbon turnover to global warming // Nat. Commun. 2020. Vol. 11, No. 5544. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19208-8.

3. *Randers J., Goluke U.* An earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all

man-made GHG emissions stop in 2020 // Sci. Rep. 2020. No. 10.18456. P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75481-z.

4. *Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G. et al.* Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // Earth-Science Reviews. 2017. Vol. 172. P. 75–86. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007.

5. *Schuur E.A.G., Mack M.C.* Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2018. Vol. 49, No. 1. P. 279–301. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349.

6. *de Vrese P., Brovkin V.* Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios // Nat. Commun. 2021. Vol. 12, No. 2688. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5.

7. *Lindgren A., Hugelius G., Kuhry P.* Extensive loss of past permafrost carbon but a net accumulation into present-day soils // Nature. 2018. Vol. 560. P. 219–222. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0371-0.

8. *van Huissteden J.* Thawing permafrost. Permafrost carbon in a warming Arctic. Springer, Cham, 2020. 508 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31379-1.

9. *Wild B., Gentsch N., Capek P. et al.* Plant-derived compounds stimulate the decomposition of organic matter in arctic permafrost soils // Sci. Rep. 2016. No. 6, 25607. https://doi.org/10.1038/srep25607.

10. *Wild B., Andersson A., Broder L., Vonk J., Hugelius G., McClelland J.W., Song W., Raymond P.A., Gustafsson O.* Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost // Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. 2019. Vol. 116, No. 21. P. 10280–10285. https://doi.org/10.1073/pnas.1811797116.

11. *Walter A.K., Schneider von Deimling T., Nitze I. et al.* 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nat. Commun. 2018. Vol. 9, No. 3262. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9.

12. *Schadel C., Koven C.D., Lawrence D.M. et al.* Divergent patterns of experimental and model-derived permafrost ecosystem carbon dynamics in response to Arctic warming // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13, No. 10. P. 105002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae0ff.

13. *Meredith M., Sommerkorn S., Cassotta C. et al.* Polar Regions // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019. P. 203–320.

14. *Heffernan L., Estop-Aragones C., Knorr K., Talbot J., Olefeldt D.* Long-term impacts of permafrost thaw on carbon storage in peatlands: deep losses offset by surficial accumulation // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2020. Vol. 125, Is. 3. https://doi.org/10.1029/2019JG005501.

15. *Koven C., Arora V. K., Cadule P. et al.* 23rd Century surprises: Long-term dynamics of the climate and carbon cycle under both high and net negative emissions scenarios // Earth Syst. Dynam. Discuss. 2021. https://doi.org/10.5194/esd-2021-23.

16. *Ma W., Zhai L., Pivovaroff A. et al.* Assessing climate change impacts on live fuel moisture and wildfire risk using a hydrodynamic vegetation model // Biogeosciences. 2021. Vol. 18, Is. 13. P. 4005–4020. https://doi.org/10.5194/bg-18-4005-2021.

17. *Соловьев П.А.* Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 143 с.

18. *Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I. et al.* Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1,500,000 // Geosciences. Vol. 8, No. 12 (465). 2018. P. 1–17. https://doi.org/10.3390/geosciences8120465.

19. *Федоров А.Н., Константинов П.Я.* Реакция мерзлотных ландшафтов Центральной Якутии на современные изменения климата и антропогенные воздействия // География и природные ресурсы. 2009. № 2. С. 56–62.

20. *Катасонов Е.М., Иванов М.С., Пудов Г.Г. и др.* Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979. 95 с.

21. *Почвенно*-географическое районирование СССР (в связи с сельскохозяйственным использованием земель). М., 1962. 422 с.

22. *Blok D., Faucherre S., Banyasz I. et al.* Contrasting above- and belowground organic matter decomposition and carbon and nitrogen dynamics in response to warming in High Arctic tundra // Global Change Biology. 2018. Vol. 24, Is. 6. P. 2660–2672. https://doi.org/10.1111/gcb.14017.

23. *Dodds W., Whiles M.* Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology. 2nd Edition, Amsterdam: Elsevier, 2010. P. 829.

24. *Бысыгина М.Ф.* Систематическая структура локальных флор Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия) // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 322. С. 232–234.

25. *Андреев В.Н., Галактионова Т.Ф., Михалева В.М. и др.* Луга Якутии. М.: Наука, 1975. 176 с.

26. *Noguchi K., Matsuura Y., Sparrow S.D. et al.* Fine root biomass in two black spruce stands in interior Alaska: effects of different permafrost conditions // Trees. 2016. Vol. 30. P. 441–449. https://doi.org/10.1007/s00468-015-1226-z.

27. *Mu C., Li L., Zhang F. et al.* Impacts of permafrost on above- and belowground biomass on the northern Qinghai-Tibetan Plateau // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2018. Vol. 50, is. 1. e1447192. https://doi.org/10.1080/15230430.2018.1447192.

28. *Masyagina O.V., Tokareva I.V., Prokushkin A.S.* Post fire organic matter biodegradation in permafrost soils: Case study after experimental heating of mineral horizons // Science of the Total Environment. 2016.

Vol. 573. P. 1255–1264. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.195.

29. *Masyagina O.V.* Carbon dioxide emissions and vegetation recovery in fire-affected forest ecosystems of Siberia: recent local estimations // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2021. Special issue. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100283.

30. *Иванова Г.А., Кукавская Е.А., Жила С.В.* Воздействие пожаров на параметры баланса углерода и компоненты экосистемы в светлохвойных лесах средней Сибири // Гео-Сибирь. 2010. Т. 4, № 2. С. 54–58.

31. *Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S. et al.* Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 652. P. 314–319. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124

Поступила в редакцию 24.06.2021
Принята к публикации 29.07.2021

Об авторах

ЧЕРЕПАНОВА Александра Михайловна, младший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, магистрант, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия, https://orcid.org/0000-0002-4638-4770, alexandra_587@mail.ru;

СПЕКТОР Валентин Владимирович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, https://orcid.org/0000-0002-7791-0972, Researcher ID: J-9015-2018, vvspektor@mpi.ysn.ru;

ШЕПЕЛЕВ Андрей Геннадиевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; магистрант Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия,
https://orcid.org/0000-0002-8836-2123, Researcher ID: M-7299-2016, carbon-shag@yandex.ru.

Информация для цитирования

Черепанова А.М., Спектор В.В., Шепелев А.Г. Поверхностный органический и неорганический углерод в ландшафтах Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 3. С. 52–63. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-52–63

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-3-52–63

Surface organic and inorganic carbon in the landscapes of the Lena-Amga interfluve (Central Yakutia)

A.M. Cherepanova[1,2,*], V.V. Spektor[1], A.G. Shepelev[1,2]

[1]*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia*
[2]*Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

**alexandra_587@mail.ru*

Abstract. *The content of organic and inorganic carbon was evaluated in the upper part of the active layer of the Holocene sediments, represented mainly by sandy loam formed at the Bestyakh and Tyungyulyun terraces in the Lena-Amga interfluve. A clear pattern of organic carbon decrease from south to north in relation to the structural features of terraced landscapes is observed. On average, this parameter is 7.70 % C_{org} at the southern margin of the Tyungyulyun pseudo-terrace, 1.64 % C_{org} in the central part of the Tyungyulyun surface (the Byokyo region) , while to the north, at the joint of the Tyungyulyun and*

Bestyuakh surfaces, the content of organic carbon decreases to the minimal value, which is 0.99 % C_{org}. Inorganic carbon exhibits a more complicated scattered distribution between the terraces. in the central part of the Tyungyulyun surface, its average content is 1.03 % C_{inorg}, with a sudden decrease at the Tyungyulyun pseudo-terrace to 0.19 % C_{inorg} and at the highland of the Ulu-Kyuel region to 0.03 % C_{inorg}. The effect of the post-pyrogene past at the Maya-2 and Bedzhelek sites is depicted in the depletion and loss of the noticeable content of organic carbon from the upper soil horizons in comparison with the Maya-1 region by 55 % and 80 %, respectively. At the same time, an increase in the content of carbon of plant origin up to the initial level is outlined during self-recovery for 19 years.

Keywords: organic carbon, inorganic carbon, active layer, the Lena-Amga interfluve, Central Yakutia.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the base project of SB RAS «Structure and key stages of the evolution of continental cryolithozone in the Neopleistocene and Holocene» (Project number AAAA-A20-120122290035-5).*

References

1. *Kaufman D., McKay N., Routson C. et al.* Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach // Sci Data. Vol. 201, No. 7. 2020. P. 1–13. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0530-7.

2. *Varney R.M., Chadburn S.E., Friedlingstein P. et al.* A spatial emergent constraint on the sensitivity of soil carbon turnover to global warming // Nat. Commun. 2020. Vol. 11, No. 5544. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19208-8.

3. *Randers J., Goluke U.* An earth system model shows self-sustained thawing of permafrost even if all man-made GHG emissions stop in 2020 // Sci. Rep. 2020. No. 10.18456. P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75481-z.

4. *Strauss J., Schirrmeister L., Grosse G. et al.* Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability // Earth-Science Reviews. 2017. Vol. 172. P. 75–86. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007.

5. *Schuur E.A.G., Mack M.C.* Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. 2018. Vol. 49, No. 1. P. 279–301. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349.

6. *de Vrese P., Brovkin V.* Timescales of the permafrost carbon cycle and legacy effects of temperature overshoot scenarios // Nat. Commun. 2021. Vol. 12, No. 2688. https://doi.org/10.1038/s41467-021-23010-5.

7. *Lindgren A., Hugelius G., Kuhry P.* Extensive loss of past permafrost carbon but a net accumulation into present-day soils // Nature. 2018. Vol. 560. P. 219–222. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0371-0.

8. *van Huissteden J.* Thawing permafrost. Permafrost carbon in a warming Arctic. Springer, Cham, 2020. 508 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31379-1.

9. *Wild B., Gentsch N., Capek P. et al.* Plant-derived compounds stimulate the decomposition of organic matter in arctic permafrost soils // Sci. Rep. 2016. No. 6, 25607. https://doi.org/10.1038/srep25607.

10. *Wild B., Andersson A., Broder L., Vonk J., Hugelius G., McClelland J. W., Song W., Raymond P.A., Gustafsson O.* Rivers across the Siberian Arctic unearth the patterns of carbon release from thawing permafrost // Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A. 2019. Vol. 116, No. 21. P. 10280–10285. https://doi.org/10.1073/pnas.1811797116.

11. *Walter A.K., Schneider von Deimling T., Nitze I. et al.* 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes // Nat. Commun. 2018. Vol. 9, No. 3262. https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9.

12. *Schadel C., Koven C.D., Lawrence D.M. et al.* Divergent patterns of experimental and model-derived permafrost ecosystem carbon dynamics in response to Arctic warming // Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13, No. 10. P. 105002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae0ff.

13. *Meredith M., Sommerkorn S., Cassotta C. et al.* Polar Regions // IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2019. P. 203–320.

14. *Heffernan L., Estop-Aragones C., Knorr K., Talbot J., Olefeldt D.* Long-term impacts of permafrost thaw on carbon storage in peatlands: deep losses offset by surficial accumulation // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2020. Vol. 125, Is. 3. https://doi.org/10.1029/2019JG005501.

15. *Koven C., Arora V. K., Cadule P. et al.* 23rd Century surprises: Long-term dynamics of the climate and carbon cycle under both high and net negative emissions scenarios // Earth Syst. Dynam. Discuss. 2021. https://doi.org/10.5194/esd-2021-23.

16. *Ma W., Zhai L., Pivovaroff A. et al.* Assessing climate change impacts on live fuel moisture and wildfire risk using a hydrodynamic vegetation model // Biogeosciences. 2021. Vol. 18, Is. 13. P. 4005–4020. https://doi.org/10.5194/bg-18-4005-2021.

17. *Solovev P.A.* Kriolitozona severnoy chasti Leno-Amginskogo mezhdurechya. M.: Izd-vo AN SSSR, 1959. 143 p.

18. *Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I. et al.* Permafrost-Landscape Map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1,500,000 // Geosciences. Vol. 8, No. 12 (465). 2018. P. 1–17. https://doi.org/10.3390/geosciences8120465.

19. *Fedorov A.N., Konstantinov P.Ya.* Reaktsiya merzlotnykh landshaftov Tsentralnoy Yakutii na sovremen-

nye izmeneniya klimata i antropogennye vozdeystviya // Geografiya i Prirodnye Resursy. 2009. No. 2. P. 56–62.

20. *Katasonov Ye.M., Ivanov M.S., Pudov G.G. i dr.* Stroenie i absolyutnaya geokhronologiya alasnykh otlozheniy Tsentralnoy Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 1979. 95 p.

21. *Pochvenno-geograficheskoe* rayonirovanie SSSR (v svyazi s selskokhozyaystvennym ispolzovaniem zemel). M., 1962. 422 p.

22. *Blok D., Faucherre S., Banyasz I. et al.* Contrasting above- and belowground organic matter decomposition and carbon and nitrogen dynamics in response to warming in High Arctic tundra // Global Change Biology. 2018. Vol. 24, Is. 6. P. 2660–2672. https://doi.org/10.1111/gcb.14017.

23. *Dodds W., Whiles M.* Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology. 2nd Edition, Amsterdam: Elsevier, 2010. P. 829.

24. *Bysyina M.F.* Sistematicheskaya struktura lokalnykh flor Leno-Amginskogo mezhdurechya (Tsentralnaya Yakutiya) // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2009. No. 322. P. 232–234.

25. *Andreev V.N., Galaktionova T.F., Mikhaleva V.M. i dr.* Luga Yakutii. M.: Nauka, 1975. 176 p.

26. *Noguchi K., Matsuura Y., Sparrow S.D. et al.* Fine root biomass in two black spruce stands in interior Alaska: effects of different permafrost conditions // Trees. Vol. 30. 2016. P. 441–449. https://doi.org/10.1007/s00468-015-1226-z.

27. *Mu C., Li L., Zhang F. et al.* Impacts of permafrost on above- and belowground biomass on the northern Qinghai-Tibetan Plateau // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2018. Vol. 50, is. 1. e1447192. https://doi.org/10.1080/15230430.2018.1447192.

28. *Masyagina O.V., Tokareva I.V., Prokushkin A.S.* Post fire organic matter biodegradation in permafrost soils: Case study after experimental heating of mineral horizons // Science of the Total Environment. 2016. Vol. 573. P. 1255–1264. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.195.

29. *Masyagina O.V.* Carbon dioxide emissions and vegetation recovery in fire-affected forest ecosystems of Siberia: recent local estimations // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2021. Special issue. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100283.

30. *Ivanova G.A., Kukavskaya Ye.A., Zhila S.V.* Vozdeystvie pozharov na parametry balansa ugleroda i komponenty ekosistemy v svetlokhvoynykh lesakh sredney Sibiri // Geo-Sibir. 2010. Vol. 4. No. 2. P. 54–58.

31. *Knorre A.A., Kirdyanov A.V., Prokushkin A.S. et al.* Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // Science of the Total Environment. 2019. Vol. 652. P. 314–319. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.124

About the authors

CHEREPANOVA, Alexandra Mikhaylovna, junior researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia; master's student, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovsky st., Yakutsk 677013, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-4638-4770, alexandra_587@mail.ru;

SPEKTOR, Valentin Vladimirovich1, Cand. Sci. (Geography), leading researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-7791-0972, Researcher ID: J-9015-2018, vvspektor@mpi.ysn.ru;

SHEPELEV, Andrei Gennadievich, Cand. Sci. (Biology), senior researcher Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia; master's student, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovsky st., Yakutsk 677013, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-8836-2123, Researcher ID: M-7299-2016, e-mail: carbon-shag@yandex.ru.

Citation

Cherepanova A.M., Spektor V.V., Shepelev A.G. Surface organic and inorganic carbon in the landscapes of the Lena-Amga interfluve (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021. Vol. 26, No. 3. pp. 52–63. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-52–63

УДК 551.89
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-64–74

Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений и его применение для реконструкции палеогеографической обстановки в криолитозоне

А.А. Куть*, А.Е. Мельников

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
**ann.urban@mail.ru*

Аннотация. *В статье приведены сведения об истории развития метода микроморфологического анализа рыхлого материала. Описаны существующие методики диагностики отложений, рассмотрены основные проблемы, связанные с их применением и корреляцией результатов. Проанализировано современное положение микроморфологического анализа в комплексе литолого-фациальных исследований. Подчеркнуто, что становлению метода способствовал технический прогресс в XX в. Применение электронной микроскопии вывело рассматриваемый метод на совершенно новый уровень. Метод в свое время был разработан для реконструкции обстановки переноса и накопления четвертичных отложений вне области криолитозоны. Однако с 1970-х годов исследование поверхности зерен начали применять для изучения особенностей проявления криогенеза в осадочных отложениях. На современном этапе начинают внедрять современные методы исследований поверхности частиц с использованием компьютерной томографии. Это значительно расширяет область применения метода микроморфологического анализа рыхлых отложений для различных целей. Приводится набор диагностических элементов, выделенных в результате применения данного метода для Кызыл-Сырского дюнного массива в бассейне р. Вилюй и разреза Абалахской поверхности в среднем течении р. Лена.*

Ключевые слова: микроморфологический анализ, исторический обзор, становление метода, обстановка осадконакопления, криогенез.

Благодарности. *Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-53006 «Криогипергенез грунтовых массивов Южной Якутии России и Северо-Восточного Китая: механизм и особенность».*

Введение

Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений широко используют специалисты в различных областях геологии и географии. Цель исследований заключается в анализе обстановки осадконакопления, определении генезиса отложений, способа и дальности транспортировки образуемого материала для реконструкции истории преобразования рельефа. Метод основан на утверждении, что каждая среда, через которую проходит материал, оставляет на поверхности частицы характерные следы воздействия механических и химических процессов, различающиеся формой, степенью окатанности зерен и набором диагностических элементов поверхности. В криолитогенных отложениях в условиях распространения многолетнемерзлых пород помимо набора специфических текстурных элементов, получаемых в результате многократных циклов промерзания-протаивания, характерно перераспределение гранулометрического и минералогического состава, количественная оценка которого является прямым индикатором условий формирования криолитозоны. Статья раскрывает особенности применения метода для рыхлых отложений, в том числе и в области развития многолетнемерзлых пород. Описание различных направлений применения этого метода показывает обширность его применения и для практических целей в том числе.

К истории развития метода

Первое упоминание об изучении морфологии песчаных частиц относится к в 1880 г. Г. Сорби в своей публикации обратил внимание на особенности строения поверхности зерен [1]. Чуть по-

© Куть А.А., Мельников А.Е., 2021

зже П.С. Марсланд установил, что при длительном нахождении в условиях воздушного переноса изменяется размер и степень окатанности частиц [2]. Результаты его исследований показали, что кварцевые зерна имеют достаточную твердость, чтобы подвергаться воздействиям окружающей обстановки, но при этом сохранять черты среды в течение продолжительного времени. Это подтолкнуло многих исследователей заняться изучением взаимосвязи формы и окатанности частиц и условий их переноса и накопления. Такие крупные зарубежные ученые, как В.С. Крумбейн [3], А. Кайе [4, 5], Д. Кринслей [6], В.С. Марголис [7], Р. Хигс [8], Ф.Дж. Петтиджон [9], П. Булл [10], В.С. Махоуни [11], и, конечно же, отечественные исследователи А.В. Хабаков [12], В.П. Батурин [13], В.П. Чичагов [14], Л.Б. Рухин [15], Е.В. Рухина [16], Н.Л. Артемова[17], Тимирева С.Н. [18], В.Н. Конищев [19], В.В. Рогов [20] и многие другие внесли большой вклад в развитие и становление метода. Одним из значимых достижений считается классификация зерен по степени окатанности и заматованности поверхности [4]. С годами эта классификация была доработана [21] и ею продолжают пользоваться в настоящее время. Д. Кринслей и В.С. Махоунина на основании огромного объема материала составили атласы текстур поверхности кварцевых зерен [11, 22]. Авторы наглядно показали,как изменяются форма и поверхность зерен при передвижении рыхлых отложений в речном потоке, при их накоплении в условиях застойного водоема, при переносе ветром, ледником и т. д. В.П. Чичагов, изучая ледниковые отложения, выделил пять наиболее встречающихся видов поверхностей песчаных зерен [14]. А.В. Хабаков [12] разработал метод расчета коэффициента окатанности и заматованности частиц, широко применяемый российскими учеными в настоящее время. Особенности проявления процессов криогенеза минерального вещества и основные положения теории селективного разрушения минералов при фазовых переходах вода–лед были изучены В.В. Роговым и В.Н. Конищевым [20, 23, 24].

Расширение знаний в области изучения микростроения частиц произошло благодаря развитию методов исследований. В 40-х годах XX в. исследования формы и поверхности частиц в полевых условиях проводились под лупой, а в лабораториях – под бинокулярным микроскопом [14]. Форма зерен в то время определялась по микрографиям с помощью палетки с нанесенными концентрическими окружностями. Это, несомненно, было весьма трудоемко и не давало возможности обрабатывать большой объем получаемого материала. Микрографии получали с помощью светового микроскопа (рис. 1). Однако

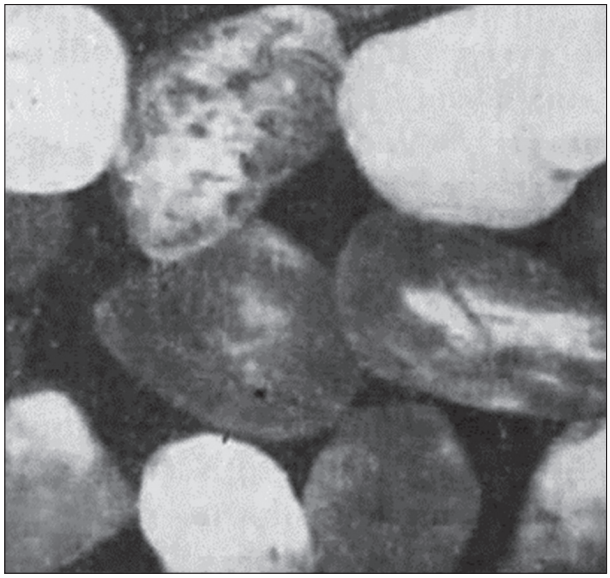


Рис. 1. Микрография эоловых песчаных зерен, выполненная световым микроскопом [14].

Fig. 1. Light micrograph of aeolian sand grains [14].

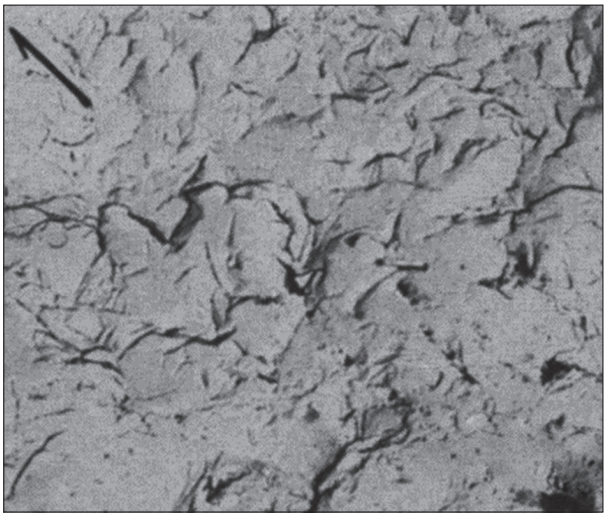


Рис. 2. Реплика поверхности зерна, подготовленная для анализа на ТЭМ [31].

Fig. 2. Replica of grain surface prepared for TEM analysis [31].

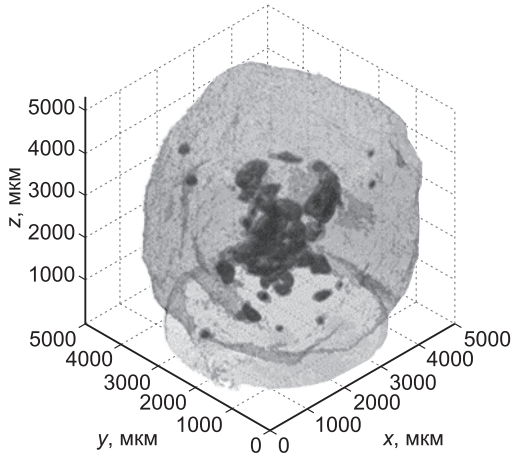


Рис. 3. Реконструкция трехмерной модели песчаной частицы методом рентгеновской компьютерной томографии [26].

Fig. 3. 3D computer tomography reconstruction of sand grain [26].

его применение было возможно лишь для зерен диаметром не менее 1 мм. Значительный прорыв произошел благодаря появлению электронной микроскопии. В 1951 г. геологами Р. Фолком и К. Вевером [25] впервые был использован трансмиссионный электронный микроскоп (ТЭМ). У этого микроскопа (просвечивающего типа) было более высокое разрешение по сравнению со световым, но все же он имел ряд недостатков. Один из них заключался в том, что для исследования зерен необходимо было изготовлять точную копию поверхности – реплику (рис. 2). По этой причине получаемые результаты носили приближенный характер из-за появления искажений. На изготовление 12 реплик уходило около 12 ч, т. е. это было очень сложно и трудоемко. Еще один недостаток заключался в очень высоком разрешении, не позволяющем изучать зерно целиком. По сравнению со сканирующим электронным микроскопом и растровым электронным микроскопом увеличение ТЭМ было в 50 раз меньше [22]. На сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) поверхность зерен можно исследовать напрямую, без предварительного изготовления реплик. Поэтому зерна можно было исследовать целиком или по частям, выбирая необходимое увеличение. К 1968 г. использование СЭМ прочно вошло в практику исследований поверхности зерен и избавило ученых от указанных выше проблем. В настоящее время, наряду с широким применением СЭМ, на фоне значительного технологического прорыва внедряют более современные методы исследований, такие как рентгеновская томография (микротомография) и компьютерные программные обеспечения, использующие методы 3D-визуализации (рис. 3) [26–28].

В России изучение частиц методом компьютерной томографии впервые было проведено в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, и метод показал эффективность [29]. Основное преимущество заключается в возможности изучения отложений без механических повреждений структуры и свойств отложений [30]. Это дает возможность изучения различных процессов, происходящих в породе.

Использование метода для реконструкции палеоусловий осадконакопления

Микроморфологическое изучение поверхности частиц имеет несколько аспектов. Во-первых, изучение формы и окатанности частиц. Взаимосвязь этих параметром с условиями среды, их переноса и накопления была подтверждена многими исследователями [31]. Установлено, что форма и размер частиц – это результат воздействия окружающей среды, но процессы транспортировки и накопления частиц, как правило, их изменяют. Окатанность – это степень сглаженности очертаний частиц при их транспортировке и переотложении. Степень окатанности показывает обстановку, дальность и длительность переноса. Осадки ледниковых отложений, например, характеризуются угловатыми очертаниями и острыми краями, а ветер шлифует частицы до идеально окатанной формы и делает их поверхность матовой. Для оценки степени окатанности зерен были разработаны классификации, где также используется понятие «заматованность» поверхности. Одна из классификаций была разработана А. Кайе [4] с доработками [21]. Они выделяют следующие классы зерен (рис. 4, *а*): *RM* – эоловые, очень идеально окатанные, поверхность матовая; *EM/RM* – эоловые, хорошо окатанные, матовые; *EL* – зерна водной среды, хорошо окатанные глянцевые; *EL/EM* – зерна водной среды, слабо окатанные; *NU* – зерна со свежими сколами и острыми ребрами и гранями, без следов химического выветривания и следов транспортировки; *C* – зерна с развитыми поверхностями расколов; *O* – поверхность зерен очень сильно затронута следа-

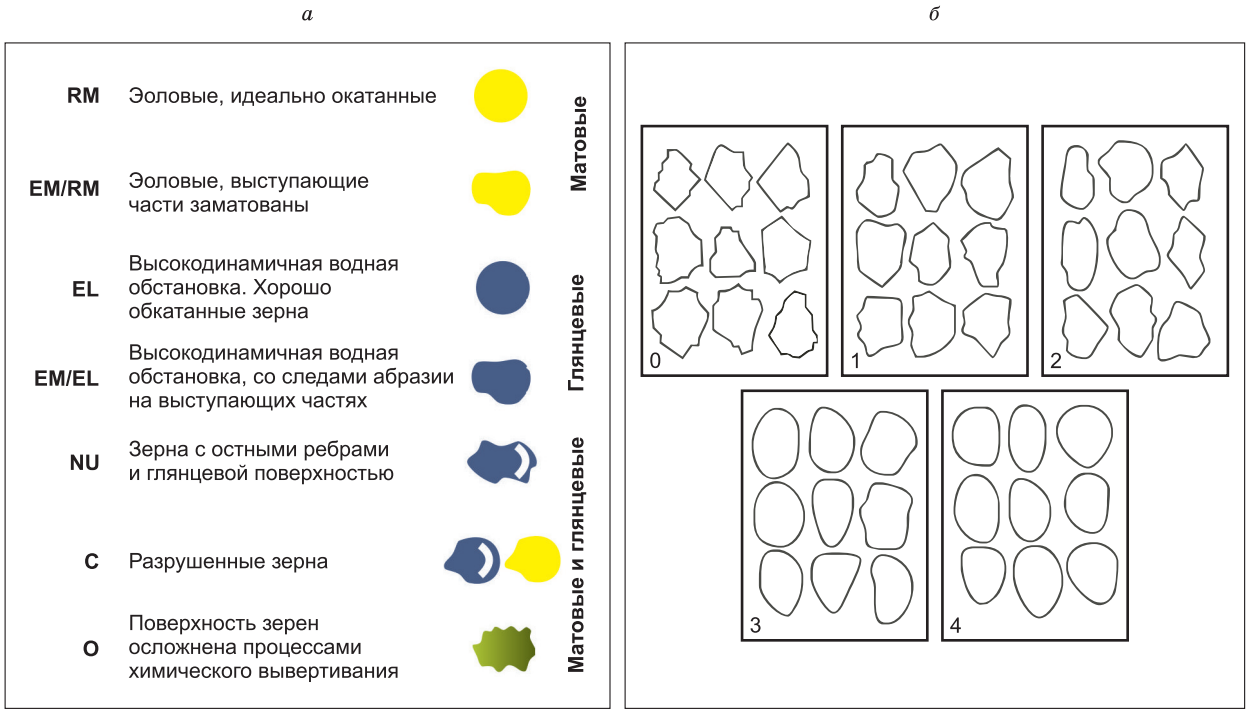


Рис. 4. Классификация зерен согласно: *а* – А. Кайе; *б* – А.В. Хабакову.

Fig. 4. Grain classification according to: *а* – Kaye A.; *б* – Khabakov A.V.

ми химического выветривания или растворения *in situ*.

В России А.В. Хабаков [12] зерна разделяет по степени окатанности, которая оценивается им по пятибалльной шкале: неокатанные обломки получают нулевой балл, прекрасно окатанные – 4 балла (рис. 4, *б*). Отдельно он делит зерна на глянцевые, ¼ матовые, ½ матовые и матовые.

За более чем вековые исследования была установлена взаимосвязь характера поверхности частиц с генезисом рыхлых отложений [11, 22]. Различными исследователями был собран огромный материал по диагностическим признакам, характерным для флювиальных, эоловых, морских, озерных и ледниковых отложений. Доказано, например, что при переносе в динамичном водном потоке во взвешенном состоянии частицы приобретают расчлененный рельеф со сглаженными очертаниями, глянцевую поверхность и образуются мелкоямчатый микрорельеф на выступающих частях, раковистые сколы, параллельная полосчатость, блоки расклинивания.

Описанные выше элементы часто встречаются на поверхности зерен, отобранных из отложений на различных геоморфологических уровнях в среднем течение долины р. Лена в пределах Лено-Алданского междуречья [32]. Автором были отмечены диагностические элементы, соответствующие различным режимам водной обстановки, от динамичного водного потока до условий застойного водоема в пределах Центральной Якутии. Перемещаясь в водном потоке во взвешенном состоянии, частицы практически не контактируют между собой, и контуры их сглаживаются водным потоком. Для таких зерен характерны развитие мелкоямчатого микрорельефа на выступающих частях (рис. 5, *а* и *б*) и процессы растворения на поверхности углублений. При сальтации в более динамичном водном потоке частицы соударяются и поверхность вследствие этого осложняется блоками расклинивания (рис. 5, *в*), аркообразными ступенями (рис. 5, *г*), раковистыми сколами и V-образными микроуглублениями. В условиях застойного водоема на поверхности зерен происходит образование глинистой корочки, которая маскирует элементы, приобретенные в процессе переноса и накопления (рис. 5, *д*). Изменение скорости водного потока часто приводит к интенсивному размыву берегов и увеличению объема поступающего материала. Недавно освобожденные из коренных пород зерна характеризуются угловатыми очертаниями, острыми краями и гранями (рис. 5, *е*), ярко выраженной параллельной

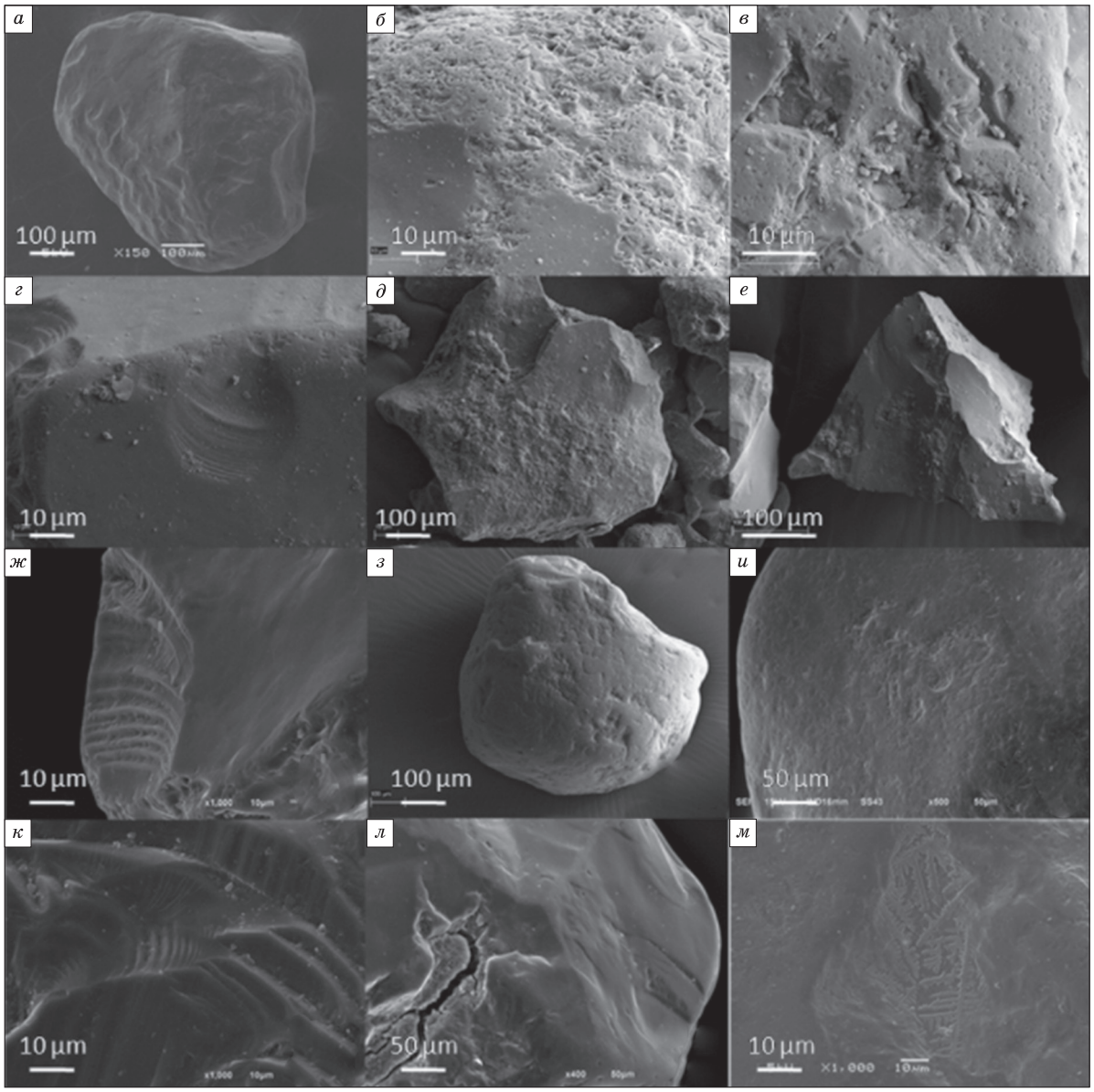


Рис. 5. Микроморфология кварцевых зерен: *а* – зерно кварца, прошедшее обработку в водной среде; *б* – мелкоямчатый микрорельеф на выступающих частях частицы, характерный для водной среды; *в* – блоки расклинивания, указывающие на перенос сальтацией в динамичном водном потоке; *г* – аркообразные ступени; *д* – кварцевое зерно с развитой на поверхности глинистой корочкой; *е* – угловатые очертания и острые ребра зерна, освобожденные из массива коренных пород; *ж* – параллельная полосчатость на поверхности скола; *з* – эоловое зерно; *и* – серпообразные трещины на поверхности, образованные в результате соударения частиц при ветровом переносе; *к* – параллельная полосчатость на плоских поверхностях расколов; *л* – трещина растворения, осложняющая поверхность скола; *м* – локализация хлоридов в коллоидном стяжении.

Fig. 5. Micromorphology of quartz grains: *а* – fluvial environment grain; *б* – mechanically formed upturned plates indicating aquatic environment; *в* – wedging blocks indicating saltation transfer in dynamic water flow; *г* – arc-shaped steps; *д* – coated quartz grain; *е* – angular outlines and sharp edges of grain released from bedrock massif; *ж* – parallel striations on grain surface; *з* – aeolian grain; *и* – crescentic gouges indicating concussion under wind transportation; *к* – parallel striations on flat cleavage face; *л* – solution-precipitation crack on cleavage face; *м* – chloride localizationin colloidal contraction.

полосчатостью на поверхности сколов (рис. 5, *ж*). Подобные зерна были отмечены автором в отложениях среднего течения р. Лена и р. Вилюй [32].

В бассейне р. Вилюй, где широким распространением пользуются дюнные массивы (туканы), автором был детально изучен Кысыл-

Сырский криогенно-эоловый комплекс [33] и реконструирована обстановка его формирования. В составе отложений были выделены три группы зерен: 1) зерна со следами преимущественно водной обработки; 2) зерна со следами эоловой обработки; 3) исходные зерна. Первая группа представлена как окатанными, так и угловатыми зернами с различной степенью сглаженности рельефа. Отмеченные на поверхности V-образные микроуглубления, мелкие сколы, прямые и серпообразные желобки указывают на аккумуляцию отложений в динамичном водном потоке, где перенос происходил сальтацией. Зерна второй группы имеют изометричную форму и матовую поверхность (рис. 5, *з*).

Для зерен с эоловой обработкой характерно развитие мелкоямчатого микрорельефа, серпообразных трещин (рис. 5, *и*) и блюдцеобразных углублений. Для зерен, прошедших водную и эоловую обработку, набор диагностических элементов будет схожим, но для водных зерен характерна глянцевая поверхность, а зерна, прошедшие эоловую обработку имеют матовую поверхность, так как в речном потоке ветер заменяется водой. Третья группа в отличие от вышеописанных первых двух представлена угловатыми зернами с острыми краями и глянцевой поверхностью. Для них характерно развитие сколов и плоских поверхностей расколов, прямых трещин, царапин, ступеней и параллельнойполосчатости (рис. 5, *к*).

Все описанные выше элементы относятся к сформированным механическим путем. На поверхности остаются также следы химического воздействия среды. Широким распространением пользуются трещины растворения (рис. 5, *л*), которые формируются в процессе диагенеза при выщелачивании. Также могут формироваться аутигенные минералы, процесс образования которых включает в себя осаждение коллоидных и аморфных фаз. В отложениях Центральной Якутии нами была отмечена локализация хлоридов в коллоидном стяжении, присутствие которого является признаком морской обстановки (рис. 5, *м*) [34].

Еще одним аспектом является экспериментальное изучение изменения поверхности частиц в различных обстановках переноса. Ф. Куенен и В. Дж. Пердок в 1950–1960-х годах изучали влияние природных химических растворов и накопление отложений в специфических условиях: в пустынях, в прибрежной зоне, при промерзании и оттаивании пород [35, 36]. Эти исследования экспериментально доказали, что в водном потоке главную роль в образовании хорошо окатанных зерен с блестящей поверхностью играет химическое воздействие. В результате моделирования эоловых и пляжевых условий Д. Кринслеем и Т. Такахаши были установлены элементы поверхности, характерные для столкновения частиц в воздушном потоке, размер которых соотносится со скоростью ветра и увлажненностью [37]. Ими также было выполнено сравнение ледниковых зерен из естественной обстановки и зерен, полученных путем перетирания смеси льда и обломков чистого дробленого кварца под гидростатическим давлением, что имитировало ледниковые условия [38]. Также экспериментальные исследования показали, что следы, характерные для субаквальной среды, появляются на зернах после 50 ч пребывания в водном потоке. После 400 ч зерна приобретают основные признаки водной обработки [39]. А.А. Величко [40] было выполнено моделирование эоловой обработки песчаных зерен. Им было установлено, что после 700 ч (30 дней) обработки зерен при скорости ветра 8,6 м/с окатанность их существенно возрастала.

Применение метода для отложений в условиях криолитозоны

Одно из направлений анализа – изучение влияния процесса криогенеза, прежде всего циклов промерзания-оттаивания, и исследование поверхности разрушенных зерен минералов и определение наиболее характерных деформаций [20, 24]. Цель таких исследований заключается в выделении диагностических критериев для оценки криогенного воздействия и восстановлении условий формирования криолитозоны. Изучению этого явления долгое время не уделялось должного внимания. Морфологические исследования отложений, прошедших криогенную переработку, в естественных условиях и в условиях экспериментов позволили установить диагностические признаки криогенного элювия [34].

Разрушение частиц при криогенном выветривании происходит при формировании льда в микротрещинах некриогенного происхождения, при замерзании растворов, содержащихся в полостях частицы, при изменении поверхности под воздействием сил физико-химического и химического взаимодействия поверхности с водой [41]. Эти процессы оставляют на поверхности характерные следы в виде борозд, трещин и сколов. Бо-

розды могут быть как прямые, так и ломаные, а трещины радиальные, расщепления, в виде зигзагообразных или ломаных линий. Сколы, имеющие криогенную природу образования, имеют раковистый облик, разрушают частицу на несколько частей, связаны с полостями в частице и отщепляют от частиц клинообразные фрагменты. Диагностическим признаком также служит форма частиц, которая при криогенном выветривании приобретает сложную сильнорасчлененную форму. Также при криогенном преобразовании дисперсных отложений образуются агрегаты, которые представляют собой ассоциации глинистых и тонкопесчаных частиц, не распадающиеся в воде при отсутствии химических соединений, способствующих их разрушению, или механического воздействия.

Полученные результаты основываются на субъективном визуальном анализе. Одни и те же признаки могут встречаться на поверхности зерен различных генетических групп. Поэтому важным направлением стала разработка количественной оценки степени криогенной переработки отложений [19, 20, 23]. Было установлено, что многократное промерзание-оттаивание приводит к значительному изменению состава и строения рыхлых отложений. Экспериментальные исследования показали, что в условиях резких переходов температуры через 0 °С гранулометрический состав рыхлых отложений существенно меняется. Как правило, более крупные частицы разрушаются и накапливается фракция 0,05–0,01 мм [42]. Кроме изменения гранулометрического состава при криогенном выветривании происходит перераспределение минерального состава отложений. Это связано с тем, что криогенная устойчивость кварца меньше по сравнению с полевым шпатом. Все это определяет криогенную специфику преобразования отложений в области криолитозоны. На основании этих закономерностей был предложен коэффициент криогенной контрастности (ККК), который представляет собой показатель распределения кварца и полевых шпатов по фракциям 0,05–0,01 и 0,1–0,05 мм и отражает специфическую криогенную организацию:

$$\text{ККК} = \frac{Q_1/F_1}{Q_2/F_2},$$

где Q_1 и F_1 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,05–0,01 мм; Q_2 и F_2 – содержание кварца и полевых шпатов во фракции 0,05–0,01 мм.

Особенность коэффициента криогенной контрастности заключается в том, что его значения не зависят от литологии, фациально-генетических факторов формирования, а определяются мерзлотно-климатическими условиями осадконакопления [43]. Была установлена зависимость интенсивности криогенной дезинтеграции от температурного режима, при котором происходили процессы промерзания-протаивания. Криолитогенные отложения имеют значения ККК больше 1. Для отложений, возникших в условиях умеренной и теплой климатических зон с незначительной ролью криогенных факторов и литогенеза, значения ККК меньше 1 [41]. Далее была выполнена корреляция значений этого коэффициента со среднегодовой температурой современных отложений деятельного слоя, что дает возможность определения палеотемпературных условий формирования криолитогенных отложений, которые прошли стадию криогипергенеза [44].

Заключение

За более чем вековую историю своего развития метод микроморфологического анализа рыхлых отложений основательно вошел в комплекс литолого-фациальных исследований и инженерно-геологических изысканий. Метод доказал свою состоятельность, а получаемые результаты имеют большое значение при реконструкции обстановки осадконакопления, оценке степени разрушения частиц при криогенезе и анализе степени изменения свойств грунтов, в строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. К настоящему времени собран обширный материал о форме зерен и их поверхности как индикаторах среды транспортировки и накопления отложений. Была проделана большая работа по идентификации микротекстур на поверхности кварцевых частиц и зерен тяжелых минералов, выделены и классифицированы механические и химические элементы, соответствующие ледниковым, эоловым, озерным, флювиальным, моренным и морским условиям седиментации, а также криогенному преобразованию осадков. В последние годы форма и микростроение поверхности частиц изучаются для оценки влияния этих параметров на строительные свойства грунтов оснований инженерных сооружений (плотность, угол внутреннего трения, водонасыщенность, влагоемкость, строение порового пространства и т. д.) [42, 43]. Метод позволяет по-новому взглянуть на процесс формирования отложений.

Литература

1. *Sorby H.C.* On the structures and origin of noncalcareous stratified rocks // Quart. J. Geol. Soc. London. 1880. Vol. 36. P. 46–92.

2. *Wadell H.* Volume, shape, and roundness of rock particles // Jour. Geol. 1932. Vol. 40. P. 443–451.

3. *Krumbein W.C.* Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles // J. Sed. PetroI. 1941. Vol. 11. P. 64–72.

4. *Cailleux A.* Les actionnes éoliennes périglaciaires en Europe // Mémoires de la Société Géologique de France. 1942. Vol. 41. 176 p.

5. *Cailleux A*. Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und Ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie // Geologische Rundau. 1952. Bd. 40. P. 11–19.

6. *Crinsley D.H., McCoy F.* Aeolian quartz sand and silt // Scanning Electron Microscopy in the Study of Sediments / (Ed. by W.B. Whalley), Geo Abstracts. Norwich, UK, 1978. P. 249–259.

7. *Margolis S.V., Krinsley D.H.* Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains // Am. J. Sci. 1974. Vol. 274, No. 5. P. 449–464.

8. *Higgs R.* Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoik sands from the Labrador and western Greenland continental margins // Journal of sedimentary petrology. 1979. Vol. 49, No. 2. P. 599–610.

9. *Петтиджон Ф.* Дж. Осадочные породы: Пер. с англ. М., Недра, 1981. 751 с.

10. *Bull P.A.* Procedures in environmental reconstruction by SEM analysis // The Scientific Study of Flint and Chert. Fourth International Flint Symposium. Brighton, 1986. P. 221–226.

11. *Mahaney, W.C.* Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002. 237 p.

12. *Хабаков А.В.* Об индексах окатанности галечников // Советская геология. 1946. № 10. С. 98–99.

13. *Батурин В.П.* Петрографический анализ геологического прошлого по терригенным компонентам. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.

14. *Чичагов В.П.* К методике изучения поверхности песчаных зерен и ее значение для определения генезиса четвертичных отложений // Материалы по генезису и литологии четвертичных отложений (К V Конгрессу ИНКВА). Минск: Изд. АН БССР. 1961. С. 249–262.

15. *Рухин Л.Б.* Основы общей палеогеографии. Л.: Гостоптехиздат, 1962.

16. *Рухина Е.В.* Литология ледниковых отложений. Л., 1973. 76 с.

17. *Артемова Н.Л.* Микроморфология лессовидных образований области вечной мерзлоты как показатель их генезиса: Дис ... канд. геогр. наук. М., 1988. 195 с.

18. *Тимирева С.Н.* Динамика экзогенных процессов в ледниковых и перигляциальных зонах среднего и позднего плейстоцена центра Русской равнины (на основе анализа морфоскопии и морфометрии песчаных кварцевых зерен): Дис ... канд. геогр. наук. М.: ИГ АН, 1989.

19. *Konishchev V.N., Rogov V.V*. Cryogenic processes in loess. Geography, environment, sustainability. 2017. Vol. 10(2). P. 4–14. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-4-14

20. *Рогов В.В*. Особенности морфологии частиц криогенного элювия // Криосфера Земли. 2000. Т. 4, № 3. С. 67–73.

21. *Mycielska-Dowgiałło E., Woronko B*. Analiza obtoczenia i zmatowienia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej i jej wartość interpretacyjna // Przegląd Geologiczny. 1998. Vol. 46. P. 1275–1281.

22. *Krinsley D.H., Doornkamp J.C*. Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: University Press, 1973. 92 p.

23. *Конищев В.Н., Рогов В.В.* Микростроение грунтов, испытавших многократное замораживание и оттаивание // Проблемы криолитологии. Вып. 2. М.: Изд-во МГУ, 1972. С. 90–94.

24. *Конищев В.Н.* Некоторые общие закономерности преобразования состава дисперсных пород криогенными процессами // Проблемы криолитологии. Вып. VI. М.: Изд-во МГУ, 1977.

25. *Russel R.D., Taylor R.E.* Roundness and shape of Mississippi River sand // Jour. Geology, 1937. Vol. 45. P. 225–267.

26. *Kuenen Ph.H*. Experimental abrasion. 4. Eolian action // J. Geol. 1960. Vol. 68. P. 427–449.

27. *Kuenen Ph.H., Perdok W.G*. Experimental abrasion 5. Frosting and defrosting of quartz grains // Journal of Geology. 1962. Vol. 70. P. 648–658. https://doi.org/10.1086/62686

28. *Krinsley D., Takahashi T*. Surface textures of sand grains: an application of electron microscopy // Science. 1962. Vol. 135, No. 3507. P. 923–925.

29. *Krinsley D., Takahashi T*. Surface textures of sand grains – an application of electron microscopy: glaciation // Science. 1962. Vol. 138, No. 3546. P. 1262–1264.

30. *Georgiev V.M., Khrischev K.* Experimental modelling of subaqueous mechanical abrasion of eolian quartz grains // 27th IGG Moscow, 1984. Vol. 2, P. 61–62.

31. *Величко А.А., Грибченко Ю.Н., Тимирева С.Н.* Моделирование эоловой обработки песчаных зерен // Литология и полезные ископаемые. 1997. № 4. С. 431–439.

32. *Шмелев Д.Г.* Криогенез рыхлых отложений полярных областей Земли: Дис ... канд. геогр. наук. М., 2015. 155 с.

33. *Folk R.L.* Petrology of sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill's Book Store, 1968. 170 p

34. *Фазлиахметов А.М., Стаценко Е.О., Храмченков Э.М.* О применении рентгеновской компьютер-

ной томографии при изучении песчаников // Геологический сборник № 11. Информационные материалы. 2014. С. 92–96.

35. *Курчатова А.Н., Рогов В.В.* Новые методы и подходы к изучению гранулометрического и морфологического состава криогенных грунтов // Инженерные изыскания. 2014. Вып. 5-6. С. 58–63.

36. *Wenbo Zheng, Xinli Hu, Tannant D.D.* Shape Characterization of Fragmented Sand Grains via X-Ray Computed Tomography Imaging // International Journal of Geomechanics. 2020. Vol. 20, Iss. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001599

37. *Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В.* Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 4. С. 75–81. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

38. *Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V.* The experience of applying X-ray computer tomography to the study of microstructure of frozen ground and soils // Kriosfera Zemli. 2017. Vol. XXI, No. 4. P. 63–68. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2017-4(63-68)

39. *Кунафин А.Д., Балыкова С.Д., Чернов М.С., Кузнецов Р.А.* Особенности морфологии песчаных зерен и ее влияние на свойства аллювиальных песчаных пород горных рек // Материалы второй Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов. М., 2018. С. 21–27.

40. *Cho G.C., Dodds J., Santamarina J.C.* Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. // J. Geotech. Geoenviron. 2006. Vol. 132 (5). P. 591–602. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)

Поступила в редакцию 17.03.2021
Принята к публикации 24.06.2021

Об авторах

КУТЬ Анна Алексеевна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677007, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия, http://orcid.org/0000-0001-7970-9124, Researcher ID: E-2780-2018, ann.urban@mail.ru;

МЕЛЬНИКОВ Андрей Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677007, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия,
http://orcid.org/0000-0002-7910-9441, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus ID: 57208581176, melnikowdron@mail.ru.

Информация для цитирования

Куть А.А., Мельников А.Е. Метод микроморфологического анализа рыхлых отложений и его применение для реконструкции палеогеографической обстановки в криолитозоне // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 64–74. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-64–74

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-64–74

The method of micromorphological analysis of loose sediments and its application for the reconstruction of paleogeographic settings in the cryolithozone

A.A. Kut'*, A.E. Melnikov

Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia
**ann.urban@mail.ru*

Abstract. *The data on the history of the morphological analysis of loose materials are presented. The existing procedures of sediment diagnostics are described, the major problems related to their application and correlation of the results are considered. The modern status of micromorphological analysis in the set*

of lithological-facial investigations is analyzed. The development of the method was promoted by the technological advancement in the 20th century. The application of electron microscopy has brought the method under consideration to a brand new level. The method was originally developed to recover the settings of transport and accumulation of Quaternary sediments outside the boundaries of the cryolithozone. However, since the 1970-s, investigation of grain surfaces started to be applied to study the features of cryogenesis manifestations in sedimentary deposits. At the modern stage, up-to-date methods to study particle surface with the help of computer tomography are under introduction. This broadens the area of the application of micromorphological analysis of loose sediments for various purposes. A set of diagnostic elements allocated as a result of the application of this method for the Kyzyl-Syr dune area in the basin of the Vilyuy river and for the section of the Abalakh surface in the middle reach of the Lena river is presented.

Keywords: micromorphological analysis, historical survey, establishment of the method, sedimentation environment, cryogenesis.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the Russian Foundation for Basic Research (Project number 20-55-53006 «Cryogenesis of ground massifs of Southern Yakutia, Russia, and North-Eastern China: mechanism and specificity»).*

References

1. *Sorby H.C.* On the structures and origin of noncalcareous stratified rocks // Quart. J. Geol. Soc. London, 1880. Vol. 36. P. 46–92.

2. *Wadell H.* Volume, shape, and roundness of rock particles // Jour. Geol. 1932. Vol. 40. P. 443–451.

3. *Krumbein W.C.* Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles // J. Sed. PetroI. 1941. Vol. 11. P. 64–72.

4. *Cailleux A.* Les actionnes éoliennes périglaciaires en Europe // Mémoires de la Société Géologique de France. 1942. Vol. 41. 176 p.

5. *Cailleux A*. Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und Ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie // Geologische Rundau. 1952. Bd. 40. P. 11–19.

6. *Crinsley D.H., McCoy F.* Aeolian quartz sand and silt // Scanning Electron Microscopy in the Study of Sediments / (Ed. by W.B. Whalley), Geo Abstracts. Norwich, UK, 1978. P. 249–259.

7. *Margolis S.V., Krinsley D.H.* Processes of formation and environmental occurrence of microfeatures on detrital quartz grains // Am. J. Sci. 1974. Vol. 274, No. 5. P. 449–464.

8. *Higgs R.* Quartz-grain surface features of Mesozoic-Cenozoik sands from the Labrador and western Greenland continental margins // Journal of sedimentary petrology. 1979. Vol. 49, No. 2. P. 599–610.

9. *Pettyjohn F.G.* Osadochnyie porody/ Per. s angl. M.: Nedra, 1981. 751 p.

10. *Bull P.A.* Procedures in environmental reconstruction by SEM analysis // The Scientific Study of Flint and Chert. Fourth International Flint Symposium. Brighton, 1986. P. 221–226.

11. *Mahaney W.C.* Atlas of sand grain surface textures and applications. Oxford: Oxford University Press, 2002. 237 p.

12. *Khabakov A.V.* Ob indeksah okatannosti galechnikov // Sovetskaya geologiya. 1946. No. 10. P. 98–99.

13. *Baturin V.P.* Petrographicheskiy analiz geologicheskogo proshlogo po terrigennym komponentam. M.; L.: Izd-vo AN SSSR, 1947.

14. *Chichagov V.P.* K metodike izucheniya poverhnosti peschanyh zeren I ee znachenie dlya opredeleniya genezisa chetvertichnyh otlogheniy // Materialy po genezisu I litologii chetvertichnyh otlogheniy (K V Kongressu INQUA). Minsk: Izd-vo AN BSSR. 1961. P. 249–263.

15. *Rukhin L.B.* Osnovy obshey paleogeographii. L.: Gostoptekhizdat, 1962.

16. *Rukhina E.V.* Lithologiya lednikovyh otlogeniy. L., 1973. 76 p.

17. *Artemova N.L.* Micrimorphologiya lessovidnyh obrazovaniy oblasti vechnoy merzloty kak pokazatel ih genezisa: Dis … kand. geogr. nauk. M., 1988. 195 p.

18. *Timireva S.N.* Dinamika ekzogennyh processov v lednikovyh i periglacialnyh zonah srednego i posdnego pleistocena centra Russkoi ravniny (na osnove analiza morphoskopii i morphometrii peschanyh I kvarcevyh zeren): Dis … kand. geogr. nauk. M.: IG RAN, 1989.

19. *Konishchev V.N., Rogov V.V*. Cryogenic processes in loess. Geography, environment, sustainability. 2017. Vol. 10(2). P. 4–14. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2017-10-2-4-14

20. *Rogov V.V.* Osobennosti morphologii chastic kriogennogo eluvia // Kriosphera Zemli. 2000, Vol. 4, No. 3. P. 67–73.

21. *Mycielska-Dowgiałło E., Woronko B*. Analiza obtoczenia i zmatowienia powierzchni ziarn kwarcowych frakcji piaszczystej i jej wartość interpretacyjna // Przegląd Geologiczny 1998. Vol. 46. P. 1275–1281.

22. *Krinsley D.H., Doornkamp J.C*. Atlas of quartz sand surface textures. Cambridge: University Press, 1973. 92 p.

23. *Konishev V.N., Rogov V.V.* Microstroenie gruntov, ispytavshih mnogokratnoe zamoragivanie I ottaivanie // Problemy kriolitologii. Vyp. 2. M.: Izd-vo MGU, 1972. P. 90–94.

24. *Konishev V.N.* Nekotorye obshie zakonomernosti preobrazovaniya sostava dispersnyh porod kriogennymi

processami // Problemy kriolitologii. Vyp. VI. M. Izd-vo MGU, 1977.

25. *Russel R.D., Taylor R.E.* Roundness and shape of Mississippi River sand // Jour. Geology, 1937. Vol. 45. P. 225–267.

26. *Kuenen Ph.H*. Experimental abrasion. 4. Eolian action // J. Geol. 1960. Vol. 68. P. 427–449.

27. *Kuenen Ph.H., Perdok W.G*. Experimental abrasion 5. Frosting and defrosting of quartz grains // Journal of Geology. 1962. Vol. 70. P. 648–658. https://doi.org/10.1086/62686

28. *Krinsley D., Takahashi T*. Surface textures of sand grains: an application of electron microscopy // Science. 1962. Vol. 135, No. 3507. P. 923–925.

29. *Krinsley D., Takahashi T*. Surface textures of sand grains – an application of electron microscopy: glaciation // Science. 1962. Vol. 138, No. 3546. P. 1262–1264.

30. *Georgiev V.M., Khrischev K.* Experimental modelling of subaqueous mechanical abrasion of eolian quartz grains // 27th IGG Moscow, 1984. Vol. 2, P. 61–62.

31. *Velichko A.A., Gribchenko Yu.N., Timireva S.N.* Modelirovanie eolovoy obrabotki peschanyh zeren // Litologiya i polezniy iskopaemye. 1997. No. 4. P. 431–439.

32. *Shmelev D.G.* Kriogenez ryhlyh otlogeniy polyarnyh oblastey Zemli: Dis … kand. geogr. nauk. M., 2015. 155 p.

33. *Folk R.L.* Petrology of sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill's Book Store, 1968. 170 p

34. *Fazliahmetov A.M., Stacenko E.O., Hramchenko E.M.* O primenenii rentgenovskoy komputernoy tomografii pri izuchenii peschanikov // Geologicheskiy sbornik No. 11. Informacionnie materialy. 2014. P. 92–96.

35. *Kurchatova A.N., Rogov V.V.* Novie metody i podhody k izucheniu granulometricheskogo i morphologicheskogo sostava kriogennyh gruntov // Ingenernie izyskaniya. 2014. Vyp. 5-6. P. 58–63.

36. *Wenbo Zheng, Xinli Hu, Tannant D.D*. Shape Characterization of Fragmented Sand Grains via X-Ray Computed Tomography Imaging // International Journal of Geomechanics. 2020. Vol. 20. Iss. 3. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001599

37. *Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V.* Opyt primeneiya rentgenovskoy komputernoy tomographii v issledovanii mikristroeniya merzlyh porod I pochv // Kriosphera Zemli. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 75–81. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81)

38. *Romanenko K.A., Abrosimov K.N., Kurchatova A.N., Rogov V.V.* The experience of applying X-ray computer tomography to the study of microstructure of frozen ground and soils // Kriosfera Zemli. 2017. Vol. XXI, No. 4. P. 63–68. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2017-4(63-68)

39. *Kunafin A.D., Balykova S.D., Chernov M.S., Kuznecov R.A.* Osobennosti morphologii peschanyh zeren i ee vliyanie na svoistva alluvialnyh peschanyh porod gornyh rek // Materialy vtoroy Obcherossiyskoy nauchno-practicheskoy konferencii molodyh specialistov. M., 2018. P. 21–27.

40. *Cho G.C., Dodds J., Santamarina J.C.* Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands. // J. Geotech. Geoenviron. 2006. Vol. 132 (5). P. 591–602. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)

About the authors

KUT', Anna Alekseevna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia,
http://orcid.org/0000-0001-7970-9124, Researcher ID: E-2780-2018, ann.urban@mail.ru;

MELNIKOV, Andrey Evgen'evich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-7910-9441, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus ID: 57208581176, melnikowdron@mail.ru.

Citation

Kut' A.A., Melnikov A.E. The method of micromorphological analysis of loose sediments and its application for the reconstruction of paleogeographic settings in the cryolithozone // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 64–74. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-64–74

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 579:576.8:636.036.5
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-75–85

Особенности биозаражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях

Т.А. Исакова[1,*], Е.С. Петухова[1], В.В. Павлова[1], Л.А. Ерофеевская[2]

[1]*ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия*
[2]*Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия*

**tatyana_issakova@mail.ru*

Аннотация. *Показано, что на сохранение свойств и качества бивней мамонта после добычи до художественной обработки значительное влияние оказывают условия хранения. Одним из наиболее значимых факторов сохранения сортности сырья является предотвращение возможности его биозаражения микроорганизмами окружающей среды, которые используют органические компоненты бивня в качестве источника питания и энергии, что приводит к преждевременному разрушению костного материала. Представлены результаты первичного скрининга микроорганизмов-возбудителей биозаражения образцов из бивней мамонта после длительного хранения в различных условиях. Выделены спорообразующие и мицелийобразующие группы микроорганизмов, установлена связь выделенной микрофлоры с объектами внешней среды (почва, атмосферный воздух, воздух закрытых помещений, холодильная установка). Полученные результаты будут служить основой для разработки составов для профилактики биоповреждений бивней мамонта при их длительном хранении.*

Ключевые слова: бивень мамонта, биозаражение, грибки, бактерии, сохранение ископаемой мамонтовой кости.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № АААА-А20-120011490003-9.*

Введение

На сохранность бивней мамонта (БМ) после извлечения из вмещающих пород большое влияние оказывает множество факторов, таких как длительность воздействия прямого солнечного излучения и ветра, температура и влажность окружающей среды либо помещения, в котором они хранятся, способ упаковывания, длительность хранения в заданных условиях и пр. [1, 2]. В молодежной лаборатории технологий добычи и переработки сырья мамонтовой фауны ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» ведутся исследования особенностей деградации костного сырья в различных условиях с целью разработки наиболее эффективных ресурсосберегающих методик обработки и хранения БМ и других палеонтологических костных остатков. Известно [3], что, помимо приведенных выше факторов, существенное воздействие на сохранность ископаемой мамонтовой кости (ИМК) оказывают микроорганизмы окружающей среды. В зависимости от условий и среды залегания (мерзлые породы, дно водоемов, открытые участки и т. д.) и хранения ИМК может поражаться различными видами бактерий и грибов. В процессе жизнедеятельности бактерии и микроскопические грибки используют органические компоненты бивня в качестве источника питания и энергии. При этом могут образовываться различные продукты биохимических реакций, такие как аммиак, сероводород, органические кислоты и др., которые в свою очередь способствуют изменению свойств и разрушению БМ [4–9]. Поэтому для выявления микроорганизмов-воз-

© Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А., 2021

будителей, которые способны поражать ИМК в процессе хранения, в том числе в условиях воздействия территориальных климатических факторов Якутии, были проведены микробиологические исследования экспонированных в различных условиях образцов из БМ.

Материалы и методы исследования

В качестве проб для лабораторных исследований служили смывы [10] с поверхностей образцов из БМ, экспонировавшихся в течение 4 месяцев в следующих условиях:

– на открытом испытательном полигоне, предназначенном для климатических испытаний различных материалов, обеспечивающий размещение образцов согласно ГОСТ 9.708-83; одна партия образцов экспонировалась в свободном состоянии, другая была обернута в пищевую пленку так, как обычно оборачивают БМ после добычи;

– в отапливаемом помещении (в закрытом коробе);

– в неотапливаемом помещении (ангар, расположенный вблизи испытательного полигона);

– в холодильной камере при температуре –9 °С.

Для контроля микробиологических показателей согласно методикам, описанным в [11–14], также были отобраны пробы почвы полигона климатических испытаний в пяти различных точках (ПКИ 1-5), снежного покрова, атмосферного воздуха, воздуха закрытого помещения, воздуха холодильной установки, где хранились образцы. Пробы атмосферного воздуха отбирали на уровне 0,5 и 1,5 м от поверхности почвы методом седиментации. Отбор проб проводили дважды: до формирования снежного покрова (06.09.2020 г.) и после формирования снежного покрова (27.10.2020 г.).

Всего исследовано 8 смывов, 7 проб атмосферного воздуха, 1 проба воздуха закрытого помещения, 1 проба воздуха из холодильной камеры; 5 проб почвы.

Исследование отобранных проб проводили с помощью стандартных методов: выделение в культуру, идентификация и исследование чистых культур грибов, микроскопия. В работе был использован лабораторный поляризационный микроскоп Axiolab Pol (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия) и биологический микроскоп Biomed-3 (Россия). Основными параметрами идентификации и оценки обнаруженных микроорганизмов являлись: интегральные показатели численности биомассы; индексы разнообразия сообществ; культурально-морфологические признаки колоний; биохимические характеристики выделенных культур. Идентификацию бактерий и микроскопических грибов осуществляли по известным определителям [15–20]. Влажность почвы определяли по общепринятым в почвенной микробиологии методикам [21]. Кислотность почв (pH) определяли согласно ГОСТ 26423-85.

Результаты и обсуждение

В качестве факторов биозаражения образцов БМ при их длительном хранении в условиях открытого полигона и в закрытых помещениях исследованы образцы объектов окружающей среды (почва, воздух закрытых помещений, атмосферный воздух) на микробную контаминацию.

Анализ структуры почвенных микробных сообществ показал, что в почвах открытого полигона климатических испытаний, где экспонировались образцы из БМ, доминируют бактериальные формы над грибными (рис. 1), что согласуется с результатами исследований авторов [1, 22, 23], где также было установлено преобладание бактерий над микроскопическими грибами в почвах северного мегаполиса.

Доминирование бактериальных форм микроорганизмов над грибными, вероятно, обусловлено условиями окружающей среды, поскольку почвенные грибы предпочитают теплые, сырые субстраты с влажностью более 70 % и pH около 3,0–5,5 условных единиц (усл. ед.), в то время как исследованные почвенные образцы характеризовались слабощелочной реакцией среды и недостаточной увлажненностью (рис. 2, 3).

Средняя температура воздуха в Якутске по данным сайта gismeteo.ru, в течение вегетационного периода (май–сентябрь), когда почвенная микрофлора наиболее интенсивно принимает участие в природном круговороте, в 2020 г. составила 19,9 °С, что является пограничным минимумом для развития мезофильных почвенных микроорганизмов и пограничным максимумом для криофильной микрофлоры.

В конце вегетационного сезона, когда наблюдается максимальная численность микроорганизмов, в почвах доминировали спорообразующие бактерии родов *Bacillus* и *Clostridium*; неферментирующие грамотрицательные бактерии рода *Pseudomonas*; энтеробактерии рода *Proteus*. Из микроорганизмов актинобактериальной линии доминировали *Rhodococcus, Streptomyces,*

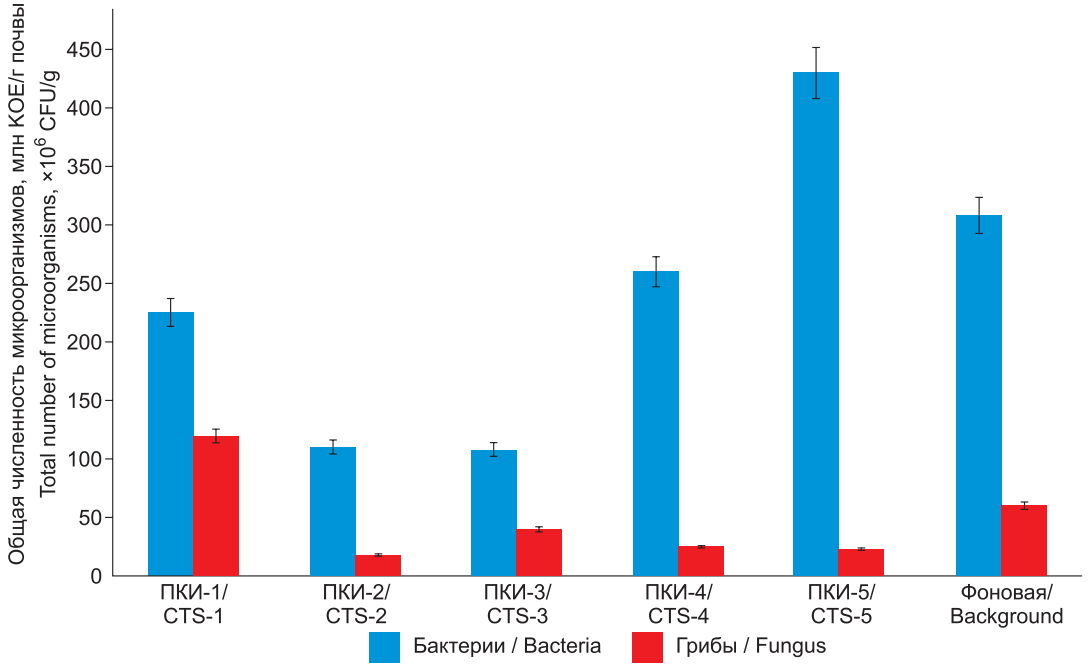


Рис. 1. Общая численность основных групп почвенных микроорганизмов в почвах полигона климатических испытаний (Якутск, 2020).

Fig. 1. The total number of the main groups of soil microorganisms in the soils of the climatic test site (Yakutsk, 2020).

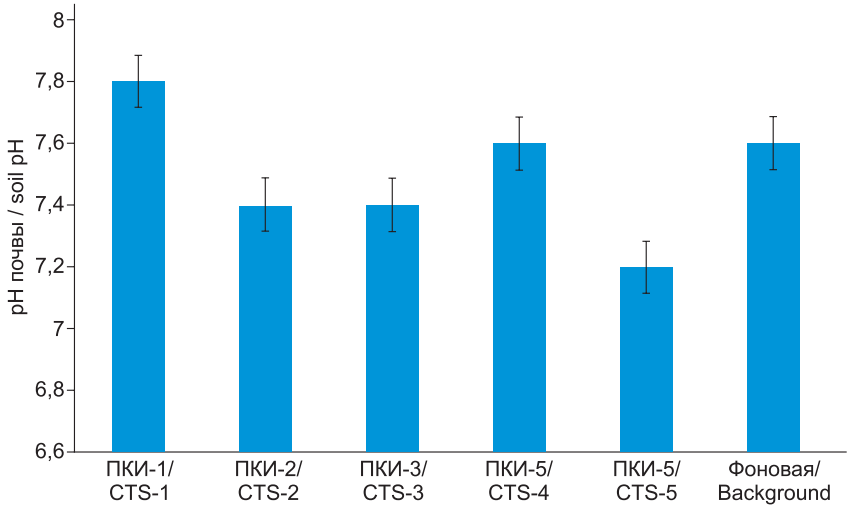


Рис. 2. Показатели pH почвенной среды территории полигона климатических испытаний, г. Якутск, ул. Автодорожная, д. 20.

Fig. 2. pH indicators of the soil environment of the climatic test site, Yakutsk, 20, St. Avtodorozhnaya.

Nocardia. В пейзаже мицелий образующих микроскопических грибов преобладали *Penicillium, Fuzarium, Aspergillus, Mucor* и *Ulokladium*. Последние представляют наибольший интерес, поскольку чаще всего являются возбудителями биопоражений различных материалов [24].

Таким образом, биологическая активность почв полигона климатических испытаний в городе Якутске снижена, а наличие в почвенном субстрате патогенных и условно-патогенных видов плесневых грибов может являться причиной контаминации атмосферного воздуха и материалов, контактирующих с почвой и атмосферным воздухом грибными спорами, которые при благоприятных условиях могут прорастать и вызывать механические и биологические повреждe-

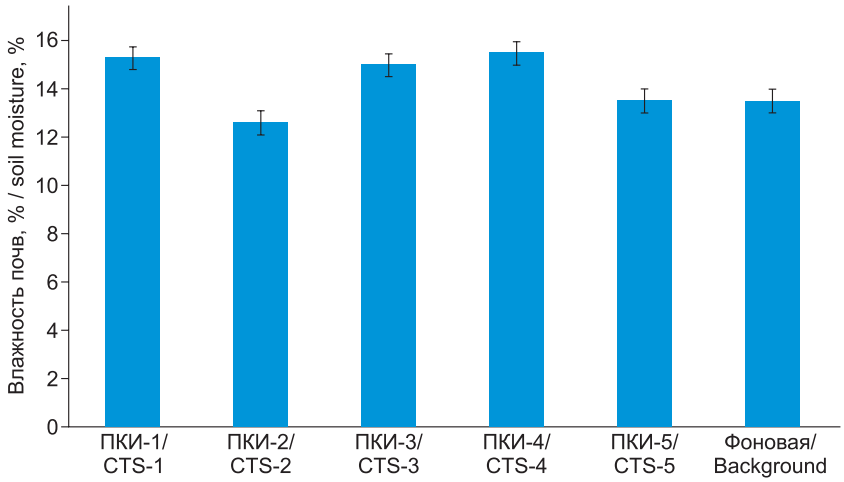


Рис. 3. Показатель влажности почв территории полигона климатических испытаний, г. Якутск, ул. Автодорожная, д. 20.

Fig. 3. Soil moisture indicator in the territory of the climatic test site, Yakutsk, 20, St. Avtodorozhnaya.

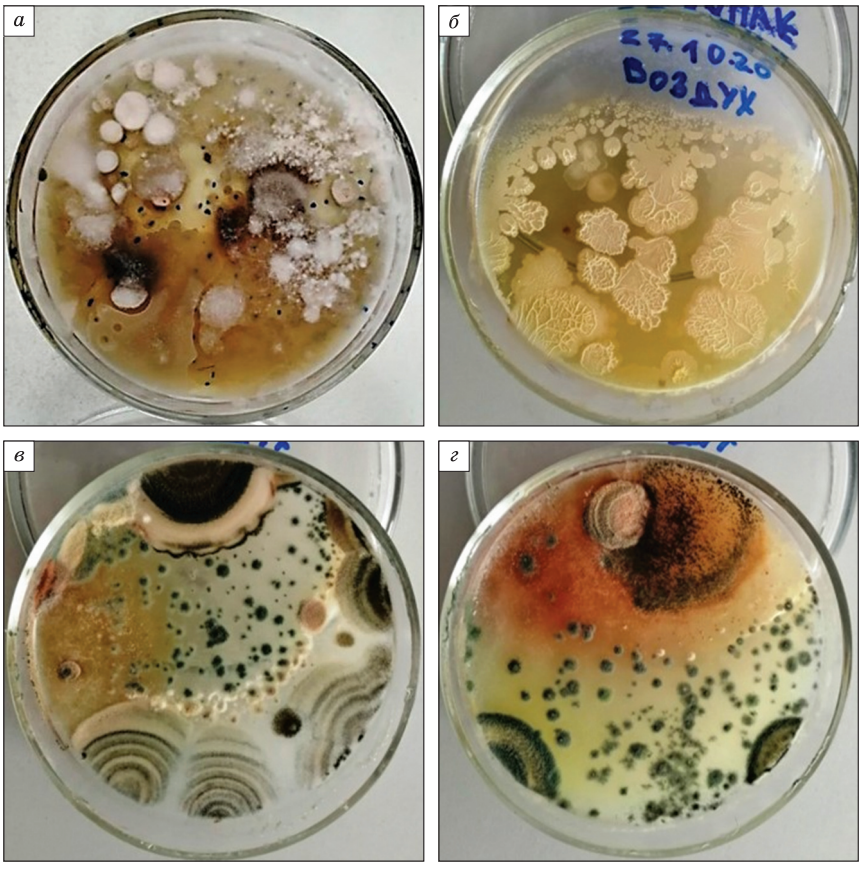


Рис. 4. Результаты микробиологических исследований внешней среды:
а – плесневые грибы, выделенные из почвенного образца; *б* – спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, выделенные из пробы атмосферного воздуха, который был взят после наступления холодов; *в* – плесневые грибы, выделенные из холодильной камеры; *г* – плесневые грибы, выделенные из воздуха помещения, где хранились образцы бивней.

Fig. 4. Results of microbiological studies of the external environment:
а – molds isolated from a soil sample; *б* – spore-forming bacteria of the genus *Bacillus*, isolated from a sample of atmospheric air, which was taken after the onset of cold weather; *в* – molds isolated from the refrigerating chamber; *г* – molds isolated from the air of the room where the tusk samples were stored.

ния экспериментальных образцов и материалов, экспонируемых на открытом полигоне.

Анализ результатов микробиологического исследования микрофлоры атмосферного воздуха показал, что в приземном слое воздуха на территории полигона климатических испытаний в конце вегетационного периода циркулировали плесневые грибы родов: *Penicillium, Fuzarium, Cladosporium, Ulokladium, Aspergillus,* и бактерии рода *Bacillus*. С наступлением холодов видовое разнообразие микрофлоры атмосферного воздуха резко снизилось. Из проб атмосферного воздуха были выделены исключительно спорообразующие бактерии рода *Bacillus*, что свидетельствует о способности данной группы бактерий выдерживать экстремально низкие температуры. В воздухе закрытого помещения и холодильной установки, где хранились образцы бивней мамонта, обнаружены одни и те же виды грибов родов *Penicillium* и *Aspergillus*.

Таким образом, по результатам микробиологических исследований можно сделать вывод, что атмосферный воздух, воздух закрытого помещения и воздух холодильной камеры содержат споры различных видов плесневых грибов, и это также может стать причиной биозаражения образцов бивней мамонта при длительном их хранении в различных условиях (на открытом воздухе, в помещении, в холодильной установке).

В ходе микробиологических исследований смывов с образцов из БМ установлено, что все исследованные образцы в той или иной степени контаминированы плесневыми грибами и спорообразующими бактериями. По культурально-морфологическим и физико-биохимическим признакам выделенные плесневые грибы принадлежат родам: *Aspergillus, Mucor, Acremonium, Penicillium*, в то время как выделенные культуры бактерий отнесены к одному роду *Bacillus*. Основные дифференциально-диагностические характеристики отдельных культур микроорганизмов, выделенных в наибольшей численности из смывов с поверхности образцов из БМ, представлены в табл. 1.

На рис. 5 представлен пейзаж микроорганизмов, выделенных из смывов, отобранных с поверхностей опытных образцов из БМ. Показано, что на родовой состав и общую численность микрофлоры, контаминирующей образцы, существенное влияние оказывают условия хранения. Наименьшей численностью микроорганизмов, выделенных с одинаковой площади поверхности исследуемых объектов, характеризуются образцы из БМ, хранившиеся в отапливаемом (см. рис. 5, *а*) и не отапливаемом (см. рис. 5, *в*) помещениях, а также в холодильной камере (см. рис. 5, *б*). Наибольшее количество микроорганизмов выявлено после хранения образов на открытом испытательном полигоне (см. рис. 5, *д*), а также образцов, экспонировавшихся на полигоне и обернутых в пленку (см. рис. 5, *г*). Вероятно, полученный результат обусловлен тем, что качественный и численный состав микроорганизмов существенно зависит от состояния воздуха в выбранных условиях экспонирования. Так, оборачивание образцов в пленку приводит к парниковому эффекту с повышенной влажностью и более высокой температурой под пленкой, что вызывает более интенсивное размножение микроорганизмов.

Изученные свойства и краткая характеристика выделенных микроорганизмов представлены ниже.

Бактерии рода *Bacillus* представляют собой грамположительные, спорообразующие, подвижные палочки, обладающие свойством криофильности и характеризующиеся сходством биохимических свойств: продуцируют фермент каталазу, редуцируют нитраты, гидролизуют крахмал, разжижают желатиназу, утилизируют цитрат и малонат натрия, ферментируют до газа глюкозу, лактозу, сахарозу и мальтозу, не обладают орнитиндекарбоксилазной и лизиндекарбоксилазной активностью. Растут при температуре +5…+40 °С.

Грибы рода *Aspergillus* относятся к высшим плесневым грибам. Колонии преимущественно белые, пушистые, в течение трех суток наблюдается образование спор темного цвета. Мицелий состоит из переплетающихся между собой бесцветных гиф диаметром 3–6 мкм. При поверхностном росте возвышаются органы плодоношения – конидиеносцы, представляющие собой утолщенные не септированные гифы длиной до 2000 мкм. Растут при температуре +5…+40 °С.

Penicillium – род сапрофитных плесневых грибов, толерантных к засолению, обладающих способностью разлагать органические вещества с образованием простых соединений углерода, которые поглощаются гифами и используются самими же грибами в качестве продуктов для своего питания. Имеют конидиеносцы с многочислен-

Таблица 1

Основные дифференциально-диагностические свойства доминантных микроорганизмов, выделенных из смывов с поверхности образцов из БМ

Table 1

Main differential diagnostic properties of dominant microorganisms isolated from mammoth tusk samples

Свойства / Properties	*Bacillus*	*Mucor*	*Acremonium*	*Aspergillus*
Окраска по Граму / Gram stain	+	+	+	+
Подвижность / Mobility	+	–	–	–
Наличие спор / Spores	+	+	+	+
Наличие капсул / Capsules	–	–	–	–
Рост аэробно / Growth aerobically	+	+	+	+
Рост анаэробно / Growth anaerobically	+	(+)	–	–
Продуцирование каталазы / Catalase production	+	–	–	–
Разжижение желатиназы / Liquefaction of gelatinase	+	–	–	–
Образование лецитиназы / Lecithinase formation	+	–	–	+
Редукция NO_3 до NO_2 / Reduction of NO_3 to NO_2	+	+	+	+
Гидролиз крахмала / Starch hydrolysis	+	–	–	–
Кислота из: / Acid from:				
глюкозы / glucose	+	–	+	+
лактозы / lactose	+	–	+	–
мальтозы / maltose	+	–	+	+
маннита / mannitol	–	–	+	–
ксилозы / xylose	–	–	+	–
глицерина / glycerin	+	–	+	–
арабинозы / arabinose	–	–	+	–
сорбита / sorbitol	–	+	+	–
сахарозы / sucrose	+	–	+	+
Реакция Фогеса–Проскауэра / Voges-Proskauer reaction	–	–	–	–
Утилизация цитрата натрия / Disposal of sodium citrate	+	–	+	–
Утилизация малоната натрия / Disposal of sodium malonate	+	–	+	–
β-галактозидаза / β-galactosidase	–	–	–	–
Образование уреазы / Urease formation	–	–	+	–
Образование индола / Indole formation	–	–	–	–
Сероводород / Hydrogen sulfide	–	–	–	–
Лизин / Lysine	–	–	–	–
Орнитин / Ornithine	–	–	–	–

Примечание: «+» тест положительный; «–» – тест отрицательный; (+) – тест слабоположительный.
Note: «+» test is positive; «–» test is negative; (+) – test is weakly positive.

ными разветвлениями размером 250–500 мкм. Конидии имеют эллиптическую форму, диаметром 2,5–3,5 мкм. Колонии выпуклые, складчатые от серого до кремового цвета. Растут при температуре +5…+37 °С. Обладают ксерофильностью, что позволяет им развиваться в сухих условиях.

Acremonium – широко распространенный в окружающей среде вид сапротрофов, обнаруживаемый в почве, растительных остатках и гниющих грибах. Колонии плоские с бархатистой текстурой розовато-кремового цвета, по морфологии клеток – гифы разделены на перегородки,

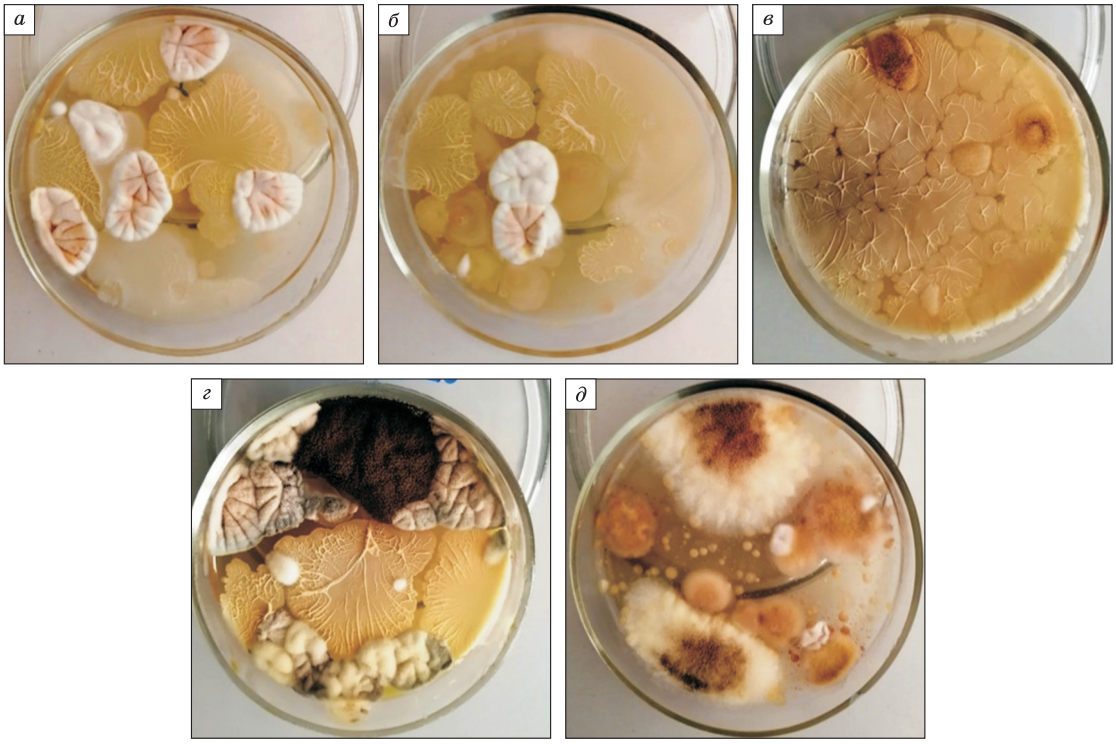


Рис. 5. Формирование колоний плесневых грибов родов *Acremonium* (*а*, *б*), *Aspergillus* (*в–д*), *Penicillium* (*г*) и бактерий рода *Bacillus* (рис. *а–д*), выделенных из образцов бивня мамонта, экспонированных:
а – при комнатной температуре; *б* – при температуре –10 °С; *в* – в условиях неотапливаемого помещения; *г* – в пленке, на открытом воздухе; *д* – на открытом воздухе.

Fig. 5. Formation of colonies of mold fungi of the genus *Aspergillus* and *Penicillium* and bacteria of the genus *Bacillus* isolated from mammoth ivory specimens exposed:
а – at room temperature; *б* – at a temperature of –10 °С; *в* – in an unheated room; *г* – in a film, in the open air; *д* – in the open air.

конидии в виде скоплений. Ферментирует большинство изученных сахаров до кислоты и газа, утилизирует малонат и цитрат натрия, редуцирует нитраты, не гидролизует крахмал, не разжижает желатиназу, не обладают орнитиндекарбоксилазной и лизиндекарбоксилазной активностью. Растут при температуре +5…+37 °С.

Mucor – род низших плесневых грибов класса зигомицетов. Колонии белые пушистые, спорангии темные, со временем белые колонии плесени становится темными. Гифы не разделены перегородками с множеством ядер. Редуцируют нитраты. Из других изученных биохимических тестов положительную реакцию культура дала только с сорбитом. Растет при температуре +5…+37 °С.

Таким образом, в результате проведенных микробиологических исследований установлены особенности биозаражения образцов, полученных из БМ при экспонировании в различных условиях, имитирующих как условия окружающей среды (при извлечении из вмещающих пород), так и наиболее распространенные способы хранения – упакованные в пленку (данный способ хранения распространен непосредственно после добычи, при транспортировке и до продажи), в отапливаемом и неотапливаемом помещениях, в холодильной камере. Установлена связь выделенной микрофлоры с контаминацией объектов внешней среды (почва, атмосферный воздух, воздух закрытых помещений, холодильные установки) микроорганизмами, что может привести к биозаражению и повреждению образцов БМ при длительном хранении. Ассимилируя на образцах бивней, микроорганизмы выделяют экстраполимерные вещества, что позволяет им прочно укрепиться на поверхности образцов. При благоприятных условиях (температура, влажность, pH) грибной мицелий способен проникать в микротрещины или кракелюрные трещины, накапливать там свою биомассу, в результате чего может произойти расширение и разветвление трещин. Это важнейший этап биоповреждения

ископаемых костных тканей. Протекающие во время развития микроорганизмов процессы ранее не учитывались в результатах исследований. Информация о подобных исследованиях в настоящее время отсутствует в открытых литературных источниках. Можно предполагать, что данное исследование проведено впервые. Встает вопрос: имеем ли мы дело с древними ископаемыми формами или это биозаражение палеонтологических образцов современными бактериями и грибами, адсорбированными на бивнях с частицами пыли из атмосферного воздуха или из почвы, или вовсе – это антропогенное загрязнение. Тем не менее, между существующими на поверхности бивней микроорганизмами уже возникают новые связи, в результате которых формируются взаимно функционирующие ассоциации (грибы–бактерии; бактерии–грибы), обеспечивающие выживание и адаптацию отдельных видов микроорганизмов. Функциональные взаимосвязи между микроорганизмами могут существенно влиять на процесс повреждения ценных образцов при их длительном хранении или при их экспозиции в музеях.

Считаем целесообразным проведение дальнейших микробиологических исследований, что позволит сформировать базу по микробиологическим агентам биоповреждений БМ при их длительном хранении в различных условиях окружающей среды. Результаты полученных микробиологических исследований будут в дальнейшем служить основой для разработки составов для профилактики биоповреждений БМ и других костных палеонтологических остатков при их длительном хранении и для инактивации патогенной микрофлоры, которая может храниться сотни лет в недрах земли, вызывая биозаражение костных тканей, которые длительное время находятся в погребенном состоянии. Кроме того, палеонтологическая микрофлора может быть потенциально опасной для добытчиков и переработчиков БМ, а также исследователей фауны позднего плейстоцена (мамонтовой фауны).

Заключение

Таким образом, в результате проведенных микробиологических исследований установлено, что наиболее вероятным способом биозаражения БМ является адсорбция микроорганизмов из окружающего воздуха. Однако проведение дальнейших микробиологических исследований свежедобытых БМ и на местах их залегания позволит сформировать базу по микробиологическим агентам биоповреждений ИМК ископаемыми формами микроорганизмов и выявить возможно новые, ранее не изученные виды.

Полученные результаты микробиологических исследований будут служить основой для разработки составов для профилактики биоповреждений БМ при их длительном хранении и для инактивации патогенной микрофлоры, что будет способствовать более длительному хранению ценного биогенного сырья.

Литература

1. *Хлопачев Г.А., Гиря Е.Ю.* Секреты древних косторезов Восточной Европы и Сибири: приемы обработки бивня мамонта и рога северного оленя в каменном веке (по археологическим и экспериментальным данным). СПб.: Наука, 2010. 144 с.

2. *Керемясов Н.В.* Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости // Прикладные исследования. Вестник СВФУ. Сер. Науки о Земле. 2018. № 2. С. 5–18.

3. *Тарабукина Н.П., Неустроев М.П., Скрябина М.П., Степанова А.М., Парникова С.И., Былгаева А.А., Неустроев М.М.* Роль бактерий рода *Bacillus* в сохранении останков мамонтовой фауны в многолетних мерзлых грунтах // Проблемы региональной экологии. 2018. № 6. С. 21–23. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-16021

4. *Albéric M., Gourrier A., Müller K., Zizake I., Wagermaier W., Fratzl P., Reiche I.* Early diagenesis of elephant tusk in marine environment // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2014. Vol. 416. P. 120–132. DOI: 10.1016/j.palaeo.2014.09.006

5. *Child A.M.* Towards an understanding of the microbial decomposition of archaeological bone in the burial environment // Journal of Archaeological Science. 1995. Vol. 22. P. 165–174. DOI: 10.1006/jasc.1995.0018

6. *Doménech-Carbó M.T., Buendía-Ortuño M., Pasies-Oviedo T., Osete-Cortina L.* Analytical study of waterlogged ivory from the Bajo de la campana site (Murcia, Spain) // Microchemical Journal. 2016. Vol. 126. P. 381–405. DOI: 10.1016/j.microc.2015.12.022

7. *Jackes M., Sherburne R., Lubell D., Barker C., Wayman M.* Destruction of the microstructure in archaeological bone: a case study from Portugal // International Journal of Osteoarchaeology. 2001. Vol. 11, No. 6. P. 387–399. DOI: 10.1002/oa.583

8. *Marchiafava V., Bonucci E., Ascenzi A.* Fungal osteoclasia: a model of dead bone resorption // Calcified Tissue Research. 1974. Vol. 14. P. 195–210. DOI: 10.1007/BF02060295

9. *Godfrey I.M., Ghisalberti E.L., Beng E.W., Byrne L.T., Richardson G.W.* The Analysis of Ivory from a Marine Environment // Studies in Conservation. 2002. Vol. 47, No. 1. P. 29–45. DOI: 10.1179/sic.2002.47.1.29

10. *МУК* 4.2.2942-11 Методы санитарно-бактериологических исследований объектов окружающей среды, воздуха и контроля стерильности в лечебных организациях.

11. *ГОСТ* 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.

12. *ГОСТ* 17.4.4.02-2017 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализов.

13. *ГОСТ* 17.1.5.05-85 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков.

14. *ГОСТ* ИСО 14698-1-2005 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Контроль биозагрязнений. Часть 1. Общие принципы и методы.

15. *Билай В.И., Курбацкая З.А.* Определитель токсинообразующих микромицетов. Киев: Наукова думка, 1990. 236 с.

16. *Благовещенская Е.Ю.* Фитопатогенные микромицеты. Учебный определитель. М.: URSS, 2015. 240 с.

17. *Виноградов Н.Н.* Микромицеты почв. М.: Медиа, 1984. 265 с.

18. *Лугаускас Л.Ю., Микульскене Л.И., Шляужене Д.Ю.* Каталог микромицетов – биодеструкторов полимерных материалов. М.: Наука, 1987. 344 с.

19. *Хоулт Дж., Крига Н., Снита П., Стейли Дж., Уилльямсá С.* Определитель бактерий Берджи в 2-х томах. Пер. с англ. М.: Мир, 1997. 368 с.

20. *Саттон Д., Фотергилл А., Ринальди М.* Определитель патогенных и условно патогенных грибов. М.: Мир, 2001. 469 с.

21. *ГОСТ* 17.4.4.02-84 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.

22. *Кычкин А.А., Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К.* Исследование выделенных микроорганизмов на полимерных композиционных материалах в условиях холодного климата // Естественные и технические науки. 2019. № 5 (131). С. 24–31. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.11

23. *Чернявский В.Ф., Ерофеевская Л.А., Антонов Н.А., Софронова О.Н., Никифоров О.И.* О бактериях, выделенных из останков мамонтовой фауны и мерзлых толщ в Якутии // Наука и техника в Якутии. 2013. № 2 (25). С. 28–37.

24. *Кычкин А.К., Ерофеевская Л.А., Кычкин А.А.* Микробиологическая диагностика биозаражений текстолитов, экспонируемых в природно-климатических условиях Якутии // Инновации и инвестиции. 2020. № 9. С.144–148.

Поступила в редакцию 03.06.2021
Принята к публикации 23.07.2021

Об авторах

ИСАКОВА Татьяна Александровна, научный сотрудник, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677000, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия,
https://orcid.org/0000-0003-3961-087X, Researcher ID: A-9005-2019, tatyana_issakova@mail.ru;

ПЕТУХОВА Евгения Спартаковна, кандидат технических наук, и.о. зав. лаб., ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677000, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия,
https://orcid.org/0000-0002-2091-725X, Researcher ID: A-5453-2014, evgspar@rambler.ru;

ПАВЛОВА Валерия Валериевна, младший научный сотрудник, ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677000, Якутск, ул. Петровского, 2, Россия,
https://orcid.org/0000-0001-5390-5186, Researcher ID: G-1242-2017, pavvaleriya-55@mail.ru;

ЕРОФЕЕВСКАЯ Лариса Анатольевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геохимии каустобиолитов, Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, Якутск, ул. Автодорожная, 20, Россия,
https://orcid.org/0000-0001-6864-7984, Researcher ID: H-2086-2017, lora-07.65@mail.ru.

Информация для цитирования

Исакова Т.А., Петухова Е.С., Павлова В.В., Ерофеевская Л.А. Особенности биозаражения бивней мамонта при длительном хранении в различных условиях // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 75–85. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75–85

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-75–85

Features of biological contamination of mammoth tusks during long-term storage in various conditions

T.A. Isakova[1,*], E.S. Petukhova[1], V.V. Pavlova[1], L.A. Erofeevskaya[2]

[1]*FRC Yakut Scientific Centre SB RAS, Yakutsk, Russia*
[2]*Institute of Oil and Gas Problems, SB RAS, Yakutsk, Russia*

**tatyana_issakova@mail.ru*

Abstract. *The storage conditions have a significant effect on the preservation of the properties and quality of mammoth tusk (MT) after extraction prior to artistic processing. One of the most significant factors in preserving the quality of the raw material is prevention of its biocontamination by environmental microorganisms. They use the organic components of the tusks as a source of nutrition and energy, leading to its early destruction. This paper describes the results of the primary screening of microorganisms-pathogens causing biocontamination of MT samples after long-term storage under various conditions. The spore-forming and mycelium-forming groups of microorganisms were identified. The connection of the detected microflora with the external environment (soil, atmospheric air, indoor air, refrigeration unit) was established. The results will serve as a basis for formulation development to prevent biological damage to mammoth tusk during long-term storage.*

Keywords: mammoth tusk, biocontamination, fungi, bacteria, preservation of fossil mammoth tusk.

Acknowledgements. *The research was carried out under the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ AAAA-A20-120011490003-9).*

References

1. *Hlopachev G.A., Girya E.Yu.* Sekrety drevnih kostorezov Vostochnoj Evropy i Sibiri: priyomy obrabotki bivnya mamonta i roga severnogo olenya v kamennom veke (po arheologicheskim i eksperimental'nym dannym). SPb.: Nauka, 2010. 144 p.

2. *Keremyasov N.V.* Metody i tekhnologii poiska iskopaemoj mamontovoj kosti // Prikladnye issledovaniya. Vestnik SVFU. Ser. Nauki o Zemle. 2018. No. 2. P. 5–18.

3. *Tarabukina N.P., Neustroev M.P., Skryabina M.P., Stepanova A.M., Parnikova S.I., Bylgaeva A.A., Neustroev M.M.* Rol' bakterij roda *Bacillus* v sohranenii ostankov mamontovoj fauny v mnogoletnih merzlyh gruntah // Problemy regional'noj ekologii. 2018. No. 6. P. 21–23. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-16021

4. *Albéric M., Gourrier A., Müller K., Zizake I., Wagermaier W., Fratzl P., Reiche I.* Early diagenesis of elephant tusk in marine environment // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2014. Vol. 416. P. 120–132. DOI: 10.1016/j.palaeo.2014.09.006

5. *Child A.M.* Towards an understanding of the microbial decomposition of archaeological bone in the burial environment // Journal of Archaeological Science. 1995. Vol. 22. P. 165–174. DOI: 10.1006/jasc.1995.0018

6. *Doménech-Carbó M.T., Buendía-Ortuño M., Pasies-Oviedo T., Osete-Cortina L.* Analytical study of waterlogged ivory from the Bajo de la campana site (Murcia, Spain) // Microchemical Journal. 2016. Vol. 126. P. 381–405. DOI: 10.1016/j.microc.2015.12.022

7. *Jackes M., Sherburne R., Lubell D., Barker C., Wayman M.* Destruction of the microstructure in archaeological bone: a case study from Portugal // International Journal of Osteoarchaeology. 2001. Vol. 11, No. 6. P. 387–399. DOI: 10.1002/oa.583

8. *Marchiafava V., Bonucci E., Ascenzi A.* Fungal osteoclasia: a model of dead bone resorption // Calcified Tissue Research. 1974. Vol. 14. P. 195–210. DOI: 10.1007/BF02060295

9. *Godfrey I.M., Ghisalberti E.L., Beng E.W., Byrne L.T., Richardson G.W.* The Analysis of Ivory from a Marine Environment // Studies in Conservation. 2002. Vol. 47, No. 1. P. 29–45. DOI: 10.1179/sic.2002.47.1.29

10. *MUK* 4.2.2942-11 Metody sanitarno-bakteriologicheskih issledovanij ob'ektov okruzhayushchej sredy, vozduha i kontrolya steril'nosti v lechebnyh organizaciyah.

11. *GOST* 17.4.3.01-2017 Ohrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob.

12. *GOST* 17.4.4.02-2017 Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analizov.

13. *GOST* 17.1.5.05-85 Ohrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob poverhnostnyh i morskih vod, l'da i atmosfernyh osadkov.

14. *GOST* ISO 14698-1-2005 Chistye pomeshcheniya i svyazannye s nimi kontroliruemye sredy. Kontrol' biozagryaznenij. Chast' 1. Obshchie principy i metody.

15. *Bilaj V.I., Kurbackaya Z.A.* Opredelitel' toksinoobrazuyushchih mikromicetov. K.: Naukova dumka, 1990. 236 p.

16. *Blagoveshchenskaya E.Yu.* Fitopatogennye mikromicety. Uchebnyj opredelitel'. M.: URSS, 2015. 240 p.

17. *Vinogradov N.N.* Mikromicety pochv. M.: Media, 1984. 265 p.

18. *Lugauskas L.Yu., Mikul'skene L.I., Shlyauzhene D.Yu.* Katalog mikromicetov – biodestruktorov polimernyh materialov. M.: Nauka, 1987. 344 p.

19. *Hoult Dzh., Kriga N., Snita P., Stejli Dzh., Uill'yamsa S.* Opredelitel' bakterij Berdzhi v 2-h tomah. Per. s angl. M.: Mir, 1997. 368 p.

20. *Satton D., Fotergill A., Rinal'di M.* Opredelitel' patogennyh i uslovno patogennyh gribov. M.: Mir, 2001. 469 p.

21. *GOST* 17.4.4.02-84 Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza.

22. *Kychkin A.A., Erofeevskaya L.A., Kychkin A.K.* Issledovanie vydelennyh mikroorganizmov na polimernyh kompozicionnyh materialah v usloviyah holodnogo klimata // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2019. No. 5 (131). P. 24–31. DOI: 10.25633/ETN.2019.05.11

23. *Chernyavskij V.F., Erofeevskaya L.A., Antonov N.A., Sofronova O.N., Nikiforov O.I.* O bakteriyah, vydelennyh iz ostankov mamontovoj fauny i merzlyh tolshch v Yakutii // Nauka i tekhnika v Yakutii. 2013. No. 2 (25). P. 28–37.

24. *Kychkin A.K., Erofeevskaya L.A., Kychkin A.A.* Mikrobiologicheskaya diagnostika biozarazhenij tekstolitov, eksponiruemyh v prirodno-klimaticheskih usloviyah Yakutii // Innovacii i investicii. 2020. No. 9. P. 144–148.

About the authors

ISAKOVA, Tatyana Aleksandrovna, researcher, Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre SB RAS», 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia,
https://orcid.org/0000-0003-3961-087X, Researcher ID: A-9005-2019, tatyana_issakova@mail.ru;

PETUKHOVA, Evgeniia Spartakovna, Cand. Sci. (Engineering), head Laboratory, Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre SB RAS», 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-2091-725X, Researcher ID: A-5453-2014, evgspar@rambler.ru;

PAVLOVA, Valeriya Valerievna, junior researcher, Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre SB RAS», 2 Petrovskogo st., Yakutsk 677000, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-5390-5186, Researcher ID: G-1242-2017, pavvaleriya-55@mail.ru;

EROFEEVSKAYA, Larisa Anatolyevna, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 20 Avtodorozhnaya st., Yakutsk 677007, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-6864-7984, Researcher ID: H-2086-2017, lora-07.65@mail.ru.

Citation

Isakova T.A., Petukhova E.S., Pavlova V.V., Erofeevskaya L.A. Features of biological contamination of mammoth tusks during long-term storage in various conditions // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 75–85. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-75–85

УДК 551.515.9:556.535.2
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-86–99

Генезис, сценарии и особенности прогнозирования наводнений в среднем течении р. Амга (Центральная Якутия)

Н.И. Тананаев[1,2,*], Н.А. Находкин[3], А.О. Голованов[2]

[1]*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия*
[2]*Институт естественных наук, СВФУ им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*
[3]*Якутское региональное отделение РОССОЮЗСПАС, Якутск, Россия*

**TananaevNI@mpi.ysn.ru*

Аннотация. *Ледовые явления внесли значимый вклад, более 0,5 м, в формирование максимального уровня воды р. Амга в створе с. Амга в 41 половодье из 76 (1938–2018). Средняя величина заторной составляющей максимального уровня воды составила 1,6 м, в годы с наводнениями – 2,4 м, максимальная – превысила 5 м. По генезису наводнения на р. Амга относятся преимущественно к стоково-заторным – 14 случаев, или стоковым – 5 случаев за период с 1938 по 2018 г. Сценарии развития стоковых и заторных наводнений различаются. Заторные наводнения случаются в среднем на четыре дня раньше и при меньших влагозапасах в снеге, чем стоковые. В годы с поздней затяжной весной наводнения случаются крайне редко. Синоптические показатели могут использоваться для предположений относительно характера будущего половодья, однако необходимо развитие более точных количественных методов прогноза вероятности наводнений и их ожидаемого уровня. Такие методы должны учитывать нестационарность основных синоптических факторов возникновения наводнений. Повторяемость наводнений за период наблюдений остается неизменной, что указывает на неэффективность противозаторных мероприятий, активно проводимых в бассейне реки в последние два десятилетия.*

Ключевые слова: наводнения, Центральная Якутия, река Амга, климатический реанализ, генезис наводнений, заторные наводнения, нестационарность климата, прогноз наводнений.

Благодарности. *Исследование выполнено при поддержке Программы комплексных научных исследований Академии наук РС(Я).*

Введение

Катастрофические наводнения – редко повторяющиеся события, оказывающие быстрое и массивное воздействие на общественную жизнь и экономическую активность [1]. Современные подходы к снижению ущерба и минимизации последствий наводнений предполагают переход от принятия реактивных мер и финансирования ликвидации последствий наводнений к проактивному управлению гидрологическими рисками [2]. Разработка адекватных мер реагирования на угрозу наводнений и снижения их опасности – шаги, требующие научной поддержки, информации об источниках рисков и возможных стратегиях их минимизации [3].

В Республике Саха (Якутия) основной ущерб в результате наводнений наносится сельским поселениям. После наводнений 1998 и 2001 гг. крупные города РС(Я) – Якутск, Олекминск, Ленск – были полностью или частично защищены от затопления инженерными сооружениями. Сельские поселения остаются уязвимыми, что определяется рядом факторов. Во-первых, особенности традиционного хозяйствования требуют близости к воде и затопляемым угодьям. Во-вторых, муниципалитеты финансово ограничены в выборе методов защиты от наводнений и снижения гидрологических рисков. Строительство защитных дамб затратно, существующие сооружения нередко возведены хозяйственным способом, без проекта и документального оформления, не оформлены в собственность муниципальных образований. В-третьих, ведение самостоятельной земельной политики на уровне муниципалитетов также сталкивается с определенными сложностями [4].

Сельским поселениям РС(Я) необходимы локальные схемы и планы мероприятий по минимизации гидрологических рисков. Их разработка и принятие, в свою очередь, должны опираться

© Тананаев Н.И., Находкин Н.А., Голованов А.О., 2021

на гидрологические данные, включая понимание причин возникновения высоких наводнений и основанные на таком понимании прогностические модели. Наиболее актуальна разработка таких схем и планов для территории Лено-Алданского междуречья. Это наиболее заселенный и освоенный сельскохозяйственный район Якутии, регулярно страдающий от наводнений. Основной ущерб приходится на среднее течение р. Амга. В 2018 г. заявленный суммарный прямой ущерб от исторического наводнения в с. Амга и окрестностях превысил 1 млрд рубл.

В данной работе решены следующие задачи: (1) рассмотрен генезис наводнений в среднем течении этой реки; (2) выделены типичные сценарии развития половодий с наводнениями различного генезиса; (3) рассмотрены перспективные методики прогнозирования наводнений; (4) сделана оценка современных климатических изменений в бассейне реки и их влияния на возможность предсказания наводнений. Наше исследование создает научно-аналитическую базу для разработки схемы минимизации гидрологических рисков на уровне поселений и района в целом.

Работа продолжает ранее опубликованное исследование [5], поэтому в ней содержатся только самые краткие сведения о бассейне р. Амга и использованных в работе материалах и методах.

Участок исследований

Водосбор р. Амга втиснут между двух крупнейших речных бассейнов региона, рек Лена и Алдан, и по этой причине крайне вытянут в направлении с юго-запада на северо-восток. Длина бассейна по оси долины превышает 900 км при наибольшей ширине не более 150 км, форма его асимметрична, преобладают левые притоки. Верхнее течение реки пересекает полугорные области Алданского нагорья, среднее – выположенное Приленское плато, нижнее – Центральноякутскую низменность.

Село Амга располагается на границе среднего и нижнего течения реки, в левобережной части долины. Русло реки извилистое, в нем изобилуют отмели, резко сужающие живое сечение реки. Пойма реки левосторонняя, изобилует старичными озерами и прирусловыми валами, маркирующими былое положение русла.

Исходные данные и методы исследования

В работе использованы многолетние данные наблюдений на трех гидрологических постах (г.п.) в бассейне р. Амга: г.п. Буяга (с. Верхняя Амга), г.п. Амга (с. Амга) и г.п. Терють (с. Харбалах). Источники многолетних данных – открытая база данных AHYST.Lena [6] и АИС ГМВО [7], в которых приведены официальные данные ФГБУ “Якутское УГМС”. Автоматизированный сбор, хранение и обработка гидрометеорологической информации, подготовка графических материалов организованы в RStudio [8], графическом интерфейсе пользователя для языка R [9], на основе набора функций пакета **‘tidyverse’** [10]. Доступ к данным климатического реанализа NCEP/NCAR [11] и их агрегация выполнены с помощью базовых функций, входящих в пакет **‘RNCEP’** [12]: *NCEP.gather()* и *NCEP.aggregate()*.

Авторские скрипты были написаны для пакетной обработки полей температуры воздуха, расчета значений температуры воздуха в двух узлах модели: точка T1, 62°30′ с.ш., 132°30′ в.д., соответствует среднему и нижнему течению реки; T2, 60° с.ш., 120° в.д., соответствует верхнему течению реки. Для двух точек рассчитывали: сумму температур ΣT_{Ti}, K, и среднюю температуру T_{Ti}, °C, по декадам в апреле и мае; разницу средних декадных температур между точками T1 и T2, $\Delta T = T_{\mathrm{T1}} - T_{\mathrm{T2}}$, °C; число дней с отрицательной температурой $D(-)$. Исследование тенденций в рядах переменных выполняли с помощью теста Манна–Кендалла, функция *mk.test()*, расчет критерия Вальда–Вольфовица для проверки рядов на случайность и однородность – с помощью функции *ww.test()* пакета **‘trend’** [13].

Качество простой бинарной классификации для прогнозирования вероятности наводнений по метеоданным оценивалось по тремя метрикам:

(1) точность (precision) $P = TP/(TP + FP)$;

(2) полнота (recall) $R = TP/(TP + FN)$;

(3) F-мера $= (1 + \beta^2) \cdot [(P \cdot R)/(\beta^2 \cdot P) + R]$.

Точность показывает, какова доля лет с наводнениями среди лет, для которых наводнение было предсказано, полнота – какова доля правильно предсказанных наводнений среди всех лет с наводнениями. Полнота, как метрика, в прогнозировании наводнений имеет большее значение, чем точность, поскольку цена ошибки второго рода, ложно-отрицательного прогноза, намного выше цены ошибки первого рода.

Типизация наводнений по генезису

Генезис наводнений определяется происхождением максимального уровня воды [14]. На-

воднение в контексте данной работы рассматривается как гидрологическое событие, при котором уровень воды превысил установленную отметку опасного гидрологического явления (ОГЯ). Уровень начала затопления поймы в районе г.п. Амга равен 900 см над «0» графика, отметка ОГЯ – 925 см.

Основные колебания уровня воды связаны с изменениями расхода воды, к которым может добавляться влияние ледовых явлений. *Стоковые наводнения* возникают в условиях открытого русла. Ледовые явления в створе или ниже створа поста приводят к возникновению *заторных* и *стоково-заторных наводнений*. Различие между ними условное: считается, что стоково-заторные наводнения приурочены к периоду максимального стока – половодью или паводку, тогда как чисто заторные – к межени [15]. На заторных участках рек генетическая роль заторов в формировании уровня воды может превышать 70 % [16].

Сценарии развития гидрологической обстановки во время наводнений, а также подходы к их прогнозированию различаются в зависимости от их генезиса. Для этого необходимо оценить вклад заторной составляющей в подъем уровня воды периода весеннего половодья за период наблюдений.

Оценка заторной составляющей максимальных уровней р. Амга

В условиях открытого русла связь между расходом и уровнем воды однозначна. Поэтому в случае стокового наводнения максимальный расход Q_{max} и уровень воды H_{max} наблюдаются в одну дату, и на графике связи этих величин образуют однозначную связь (рис. 1, штриховая линия), что свидетельствует об отсутствии вклада ледовых явлений в формирование максимального уровня воды. При заторных наводнениях максимальный уровень воды формируется под влиянием ледовой плотины и избыточной шероховатости подводной поверхности льда. Как следствие, на графике связи максимального расхода и уровня воды виден дополнительный подъем уровня (см. рис. 1). Максимальный уровень воды в случае заторного или стоково-заторного наводнения наблюдается, как правило, на несколько дней раньше максимального расхода.

Вклад ледовых заторов в формирование наводнений в створе р. Амга – с. Амга оценили по данным о максимальном уровне воды H_{max} и расходе в дату, когда он наблюдался: $Q(H_{max})$, максимальном расходе воды Q_{max} и уровне в дату, когда он наблюдался: $H(Q_{max})$. При отсутствии заторов даты наступления H_{max} и Q_{max} совпадают, связь $Q_{max} \sim H(Q_{max})$ имеет степенной вид

$$H(Q_{max}) = 3{,}5846 \cdot Q_{max}^{0{,}6655}. \quad (1)$$

Использование уравнения (1) позволяет для заданного года рассчитать заторную составляющую максимального уровня воды. Для этого выбирается пара значений H_{max} и $Q(H_{max})$; затем для $Q(H_{max})$ по уравнению (1) рассчитывается соответствующий ему уровень воды H^*, наблюдающийся при условии свободного русла. Разница между H_{max} и H^* – вклад заторных явлений в значение H_{max}. Если он близок к 0, то наводнение относится к стоковым, если значительно больше 0 – к заторным либо стоково-заторным.

Расчетный $H(Q_{max})$ в створе р. Амга – с. Амга за период с 1938 по 2007 г. получили с помощью уравнения (1) по данным о Q_{max}, наблюденных в нижерасположенном створе р. Амга – г.п. Терють, поскольку для г.п. Амга данных о расходе воды за этот период в нашем распоряжении нет. Такое допущение возможно для приблизительных расчетов, поскольку на участке протяженностью около 300 км между г.п. Амга и г.п. Терють отсутствуют крупные притоки, а впадение мелких притоков компенсируется распластыванием волны половодья. За период с пересекающимися рядами гидрологических данных (2008–2018 гг.) регрессионная модель равенства Q_{max} на двух постах лишь незначительно хуже описывает взаимодействие между переменными, чем оптимальная модель линейной регрессии; в обоих случаях коэффициент корреляции $r > 0{,}95$ на уровне значимости $p < 0{,}01$. С другой стороны, наш подход представляет значительное упрощение, поскольку использует для исторического периода не расход воды в дату максимального уровня, а максимальный расход. Полученные результаты, следовательно, следует воспринимать как минимальную оценку генетической роли заторов.

За период с 1938 по 2018 г. ледовые явления внесли значимый вклад, более 0,5 м, в величину максимального уровня в 41 половодье из 76 (рис. 2, *а*). Наибольший вклад ледовых заторов, свыше 5 м, отмечен в 2011 и 2014 гг. В первом случае это произошло в крайне маловодный год,

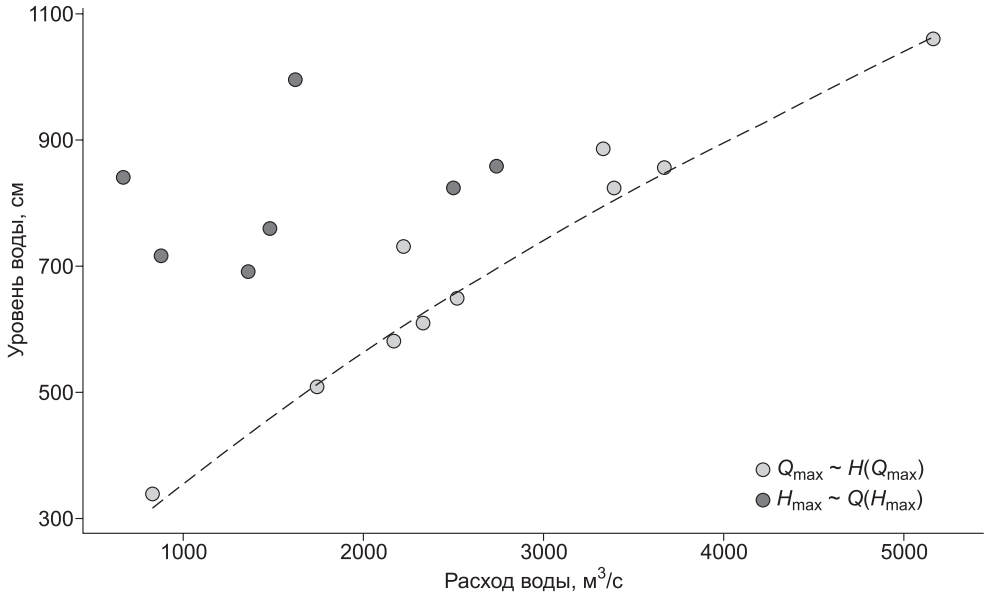


Рис. 1. Связь максимальных уровней воды H_{max} и максимальных расходов воды Q_{max}, р. Амга – с. Амга, 2008–2018 гг.

Fig. 1. Highest annual water stage H_{max} plotted against highest annual water discharge Q_{max}, the Amga River, at settlement Amga, 2008–2018.

но привело к подъему уровня на 0,8 м ниже отметки ОГЯ. Во втором случае водность года была больше, и ледовый затор привел к подъему уровня воды выше отметки ОГЯ до H_{max} = 993 см и к наводнению в с. Амга.

Средняя величина дополнительного заторного подъема уровня воды составила 1,61 м, и в подавляющем большинстве случаев, в 30 лет из 41, находилась в диапазоне от 0,5 до 2,0 м и не была связана с величиной H_{max} (рис. 2, *б*). В годы с наводнениями вклад заторной составляющей больше среднего – 2,4 м. Для лет с наводнениями характерна обратная зависимость заторной составляющей H_{max} от расхода воды (рис. 2, *в*).

Генезис наводнений в среднем течении р. Амга

Выполненные расчеты позволили установить, что из 19 наводнений, случившихся в с. Амга в период с 1938 по 2018 г., 5 относятся к стоковым, и 14 – к стоково-заторным. Стоковые наводнения редки: они наблюдались в 1962, 1983, 1998, 2007 и 2008 гг. Средний максимальный уровень стоковых наводнений – 1012±20 см над «0» графика г.п. Амга, стоково-заторных наводнений – 1002±43 см (табл. 1), различия в H_{max} статистически незначимы.

Каждому типу наводнений соответствует свое типичное сочетание климатических и синоптических факторов, определяющих наибольшую вероятность их возникновения. Известно, что метеорологические условия перед началом ледохода играют определяющую роль в вероятности заторообразования на территории Якутии [16, 17]. Очевидно, что в данном районе именно заторы представляют основную опасность и чаще всего приводят к наводнениям.

Возникновение заторов предсказуемо, поскольку они случаются почти каждый год. Одна из причин – в том, что в южной части водосбора уже активно происходит снеготаяние, перемещение волны половодья и сопровождающего его ледохода, тогда как в северных районах лед по-прежнему прочен и нередко сохраняется отрицательная температура воздуха [16, 18]. Нижняя кромка ледохода, особенно при быстром движении, упирается в относительно более прочный ледяной покров, что приводит к интенсивному торошению, подсову ледяных полей друг под друга, и в итоге – к образованию головы затора. В случае стоковых наводнений ведущую роль играют иные факторы – дружность половодья, влагозапас в снеге.

В среднем течении р. Амга стоково-заторные наводнения в среднем случаются раньше, чем стоковые (см. табл. 1): начало подъема уровня наблюдается раньше на два дня, максимальный уровень воды – на четыре дня, следовательно, больше и интенсивность подъема уровня воды. Влагозапас

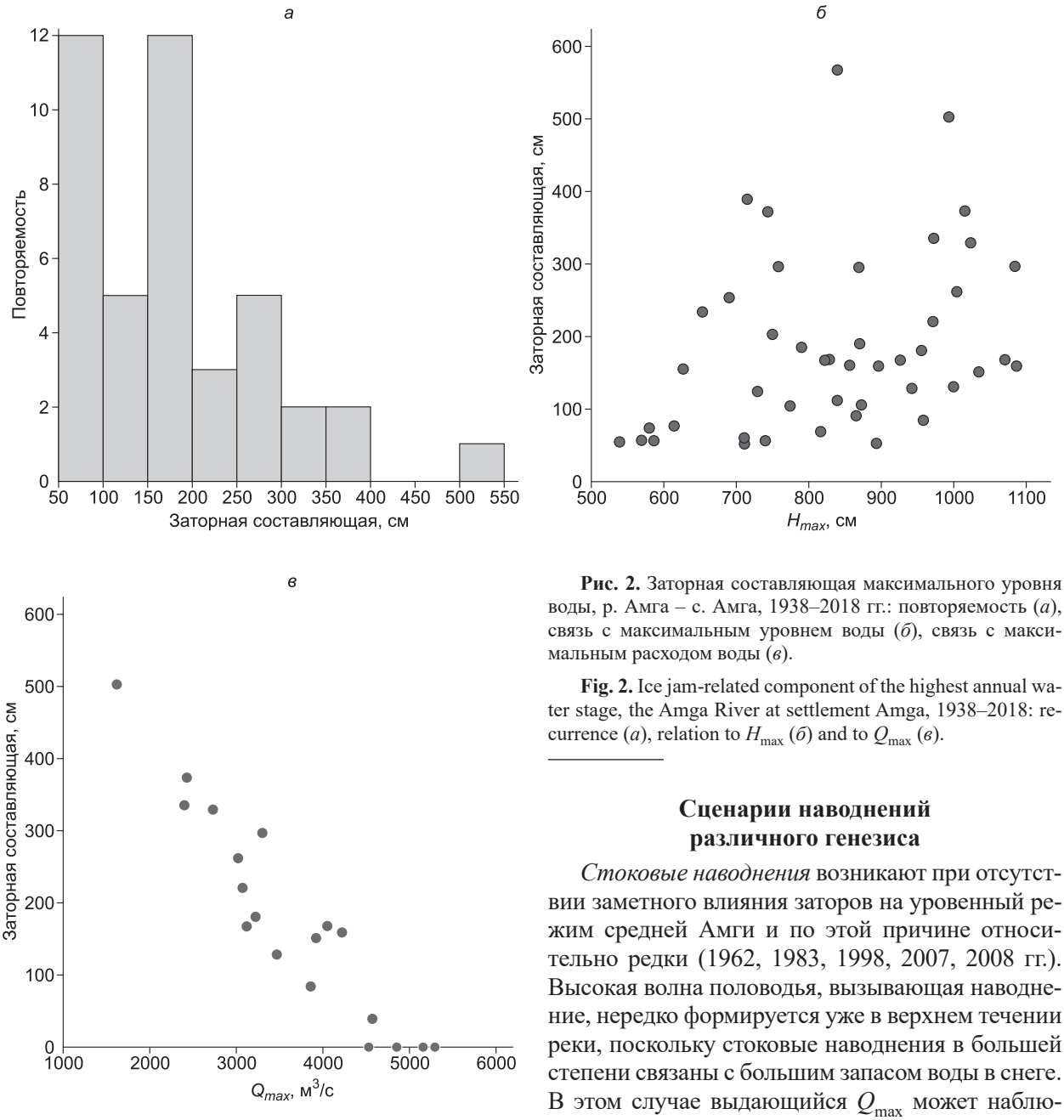


Рис. 2. Заторная составляющая максимального уровня воды, р. Амга – с. Амга, 1938–2018 гг.: повторяемость (*а*), связь с максимальным уровнем воды (*б*), связь с максимальным расходом воды (*в*).

Fig. 2. Ice jam-related component of the highest annual water stage, the Amga River at settlement Amga, 1938–2018: recurrence (*а*), relation to H_{max} (*б*) and to Q_{max} (*в*).

в снеге ожидаемо больше в годы со стоковыми наводнениями, майские осадки – в годы с заторными наводнениями. Основной фактор риска наводнения в районе с. Амга – величина заторной составляющей максимального уровня, для которой фактически не существует методов прогноза. Стоковое наводнение, в свою очередь, предсказать относительно просто: предпосылки для его возникновения складываются уже в верхнем течении, где сосредоточены значительные влагозапасы в снеге. В целом, для каждого типа наводнений характерен свой сценарий развития.

Сценарии наводнений различного генезиса

Стоковые наводнения возникают при отсутствии заметного влияния заторов на уровенный режим средней Амги и по этой причине относительно редки (1962, 1983, 1998, 2007, 2008 гг.). Высокая волна половодья, вызывающая наводнение, нередко формируется уже в верхнем течении реки, поскольку стоковые наводнения в большей степени связаны с большим запасом воды в снеге. В этом случае выдающийся Q_{max} может наблюдаться уже в створе г.п. Буяга, как в наводнение 1962 г. (рис. 3). Характерно, что стоковые наводнения хронологически совпадают с крупными наводнениями на других реках региона. Так, 1983 г. был самым многоводным за период исторических наблюдений на большинстве рек бассейна р. Лена, в 1998 г. крупное наводнение наблюдалось на средней Лене, в 2007 и 2008 гг. наводнения затронули бассейны малых рек центральной Якутии, а также Северо-Востока России, в первую очередь р. Алазея. Стоковые наводнения развиваются по схожему сценарию: для них характерно раннее начало снеготаяния, большая его продолжитель-

Таблица 1

Характеристики наводнений различного генезиса на гидрологических постах в бассейне р. Амга

Table 1

Spring flood features on gauging stations in the Amga River basin

Тип наводнений/ Flood type	Дата H_{max}/ H_{max} date	Дата начала подъема уровня/ Stage increase start day	Влагозапас в снеге, мм/ Snow water equivalent, mm	Осадки за май, мм/ May precipitation, mm
Стоковые /Discharge flood	18/V	9/V	133	29
Заторные /Discharge-jamming flood	14/V	7/V	121	38

ность и небольшое количество дней с отрицательной температурой воздуха в верховьях.

Для средней Амги опасность стоковых наводнений в том, что предотвратить их наступление не представляется возможным: расход воды, превышающий 4200 м^3/с, гарантирует подъем уровня воды на г.п. Амга выше отметки ОГЯ (см. рис. 1). С другой стороны, поскольку пик стокового наводнения формируется в верхнем течении реки, его возможно предсказать с заблаговременностью от 2 до 3 дней, во время его прохождения в створе вышерасположенного г.п. Буяга, и своевременно принять меры к эвакуации жителей и защите домохозяйств. Этим стоковые наводнения отличаются от заторных, прогноз которых сопряжен со значительными сложностями.

Стоково-заторные наводнения формируются при различных сочетаниях внешних условий и развиваются по различным сценариям, однако чаще всего – во время быстрого и дружного половодья, при сравнительно небольшом расходе воды. В большинстве случаев для них типично очень раннее начало половодья, в последнюю декаду апреля или первые числа мая, что более чем на неделю раньше нормы. К примеру, в 2014 г. в верховьях Амги положительная температура воздуха установилась уже в первой декаде апреля, и весь месяц держалась на 1,5…2,0 °С выше, чем в центральной Якутии. В результате дружной весны половодье началось рано, по г.п. Буяга – уже 26 апреля, что на 11 дней раньше среднего срока. В результате 4 мая 2014 г. ниже г.п. Амга наблюдался затор, приведший к подъему уровня на 503 см до отметки 993 см.

Заторные наводнения в позднее, затянувшееся половодье, случаются редко. Подъем воды, вызванный заторами, может превышать 3 м, однако позднее и растянутое половодье с возвратами холодов не могут обеспечить водность, достаточную для подъема уровня выше отметки ОГЯ. Наводнение в такие годы также связано с резким потеплением, пусть и отложенным.

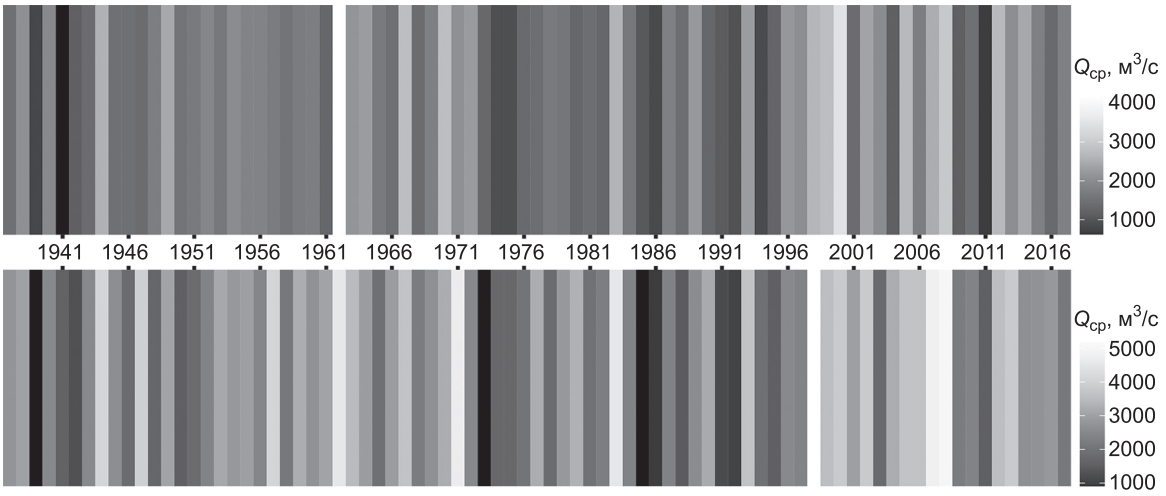


Рис. 3. Максимальные расходы воды р. Амга в створах г.п. Буяга (вверху) и г.п. Терють (внизу), 1937–2017 гг.

Fig. 3. Highest annual water discharge, the Amga River at Buyaga (above) and Teryut (below) gauging stations, 1937–2017.

В 1960 г. отрицательные температуры в бассейне Амги устойчиво держались до середины мая, что случается крайне редко, и затем резко перешли через 0 °С. Половодье на г.п. Буяга началось 14 мая 1960 г., максимальный уровень в с. Амга наблюдался 24 мая, заторный подъем уровня составил 3,3 м при H_{max} = 1023 см.

В ряде случаев стоково-заторные наводнения происходят в годы с ранней, но недостаточно дружной весной, когда резкие оттепели начинаются по всему бассейну реки уже во второй декаде апреля, но всякий раз прерываются резкими возвратами холодов (2000, 2018). В отдельные годы, прежде всего в середине XX в., значимую роль играли дождевые осадки в верхнем течении реки. Так, в наводнение 1963 г. при затяжной прохладной весне слой майских осадков составил 74 мм, в два раза больше среднего, что привело к резкому подъему уровня воды до 942 см в створе г.п. Амга.

Такие наводнения сложнее всего прогнозировать в силу отсутствия единого ведущего фактора. При низком расходе воды наибольшая вероятность стоково-заторного наводнения приурочена, как видно, к крайне ранней весне в верхнем течении Амги, когда продвижение волны ледохода встречает сопротивление прочного ледяного покрова, недостаточно ослабленного оттепелями, и максимально вероятно возникновение мощных заторов именно на пике половодья или за один-два дня до него. При достаточно большом расходе воды величина заторного подъема уровня, необходимого для начала наводнения, меньше.

Использование метеоданных для приблизительного прогноза вероятности наводнений

Как показано выше и в нашей предыдущей работе [5], существование температурного «диполя», с теплым полюсом в верховьях р. Амга и холодным – в ее среднем течении, может считаться одной из основных предпосылок возникновения заторов в районе г.п. Амга. Косвенно, отрицательная разница среднедекадной температуры воздуха между средним и верхним течениями реки в конце апреля–начале мая $\Delta T < 0$ может служить индикатором повышенной вероятности наводнений на средней Амге. Этот фактор нельзя считать единственным определяющим, необходим учет других факторов, набор которых зависит от генезиса наводнения.

Анализ имеющихся гидрометеорологических данных (табл. 2) показал, что за период с 1948 по 2018 г., для которого есть данные реанализа NCEP/NCAR и опубликованные данные Росгидромета по осадкам на м/с Дикимдя в верховьях реки, всего произошло 17 наводнений, при этом в пяти случаях условие $\Delta T < 0$ не выполнялось (ошибка второго рода, p = 0,29). Кроме того, условие $\Delta T < 0$ выполнялось при отсутствии наводнений в 10 годах из оставшихся 55 (ошибка первого рода, p = 0,18). Точность (precision) такой простой модели равна 0,55, полнота (recall) равна 0,71, что неплохо для модели, основанной на единственном косвенном показателе. F-меру оценим дважды, сбалансированно, при β = 1, и субъективно, при β = 10, в предположении, что полнота в 10 раз важнее точности, т. е. правильное определение наводнения намного «дороже», чем цена ошибки первого рода. Величина F-меры меняется от 0,62 при β = 1 до 0,71 при β = 10, что указывает на удовлетворительное качество модели.

Ошибки первого рода более часты в последние два десятилетия – 5 случаев из 10 в период с 2002 по 2018 г. Ошибки второго рода в 4 случаях из 5, напротив, относятся к периоду до 1990 г. В отношении ошибок первого рода следует также сказать, что в 4 случаях из 10 (1967, 2002, 2004 и 2011 гг.), тем не менее, максимальный уровень воды поднимался до относительно высоких отметок – между 825 и 925 см над «0» графика поста, т. е. существовала объективная вероятность наводнения.

Точность такого однофакторного синоптического прогноза относительна, но в первом приближении это направление выглядит перспективным для прогноза вероятности опасного наводнения в среднем и нижнем течении р. Амга, с учетом типа наводнения. Так, для *стоковых наводнений* необходимы влагозапас в снеге на конец апреля свыше 130 мм, раннее начало снеготаяния в верховьях, устойчивые холода в конце апреля/начале мая. Кроме того, в динамическом прогнозировании максимальный расход воды по г.п. Буяга свыше 4000 м^3/с гарантирует наводнение в с. Амга в ближайшие 5–7 дней, а расход в диапазоне от 3000 до 4000 м^3/с резко увеличивает вероятность стоково-заторного наводнения.

Стоково-заторные наводнения возможно прогнозировать по совокупности признаков, среди которых влагозапас в снеге (свыше 120 мм), раннее начало половодья и небольшое количество

Таблица 2

Разница среднедекадной температуры воздуха в точках Т1 (Центральная Якутия) и Т2 (Южная Якутия), Δ*T*, °С, в 1948–2018 гг. Приведены данные для лет с наводнениями (H_{max} > 925 см) и лет без наводнений, в которые для конца апреля-начала мая выполнялось условие Δ*T* < 0

Table 2

Average 10-day air temperature in points T1 (Central Yakutia) and T2 (South Yakutia), Δ*T*, °C, 1948–2018. Data are given for years with floods (H_{max} > 925 cm), and all years on record with Δ*T* < 0 in late April and/or early May

Год/ Year	H_{max}, см*/ H_{max}, cm*	Декады/ 10-day intervals			Дата/ Date	Год/ Year	H_{max}, см/ H_{max}, cm*	Декады/ 10-day intervals			Дата/ Date
		3-IV	1-V	2-V				3-IV	1-V	2-V	
Годы с наводнениями, H_{max} > 925 см											
1952	1015	1,24	–0,08	3,19	7/V	**1983**	*969*	*1,92*	*1,68*	*3,56*	*21/V*
1953	926	–0,54	4,2	0,32	17/V	**1984**	*972*	*5,01*	*2,06*	*2,14*	*6/V*
1957	1070	2,59	1,35	–0,19	13/V	**1998**	1007	–0,34	–1,02	1,07	17/V
1960	1023	–0,42	3,56	0,20	23/V	***2000***	*958*	*1,87*	*1,02*	*0,90*	*16/V*
1961	971	0,35	–0,79	0,68	17/V	**2007**	1010	–3,62	0,03	1,12	11/V
1962*	*1071*	*0,43*	*2,75*	*2,73*	*21/V*	**2008**	1057	–1,29	2,01	2,56	16/V
1963	*942*	*2,01*	*1,83*	*1,65*	*23/V*	**2014**	993	–1,77	–2,29	–4,47	4/V
1977	955	1,36	–0,25	1,91	13/V	**2018**	1104	–2,14	2,73	0,09	11/V
1980	1084	–0,58	1,02	2,43	13/V						
Годы без наводнений, H_{max} < 925 см											
1964	743	–1,44	2,55	0,26	25/V	**2002**	873	0,31	–2,07	–1,46	15/V
1967	893	–2,40	–0,30	–0,13	4/V	**2004**	865	–0,84	–0,73	0,39	16/V
1978	586	–2,54	–2,23	2,83	25/V	**2009**	729	–0,79	1,24	1,25	12/V
1981	579	–1,54	0,17	0,63	22/V	**2011**	839	–1,10	–2,49	1,50	10/V
1997	667	–1,33	0,65	–0,65	19/V	**2015**	758	–1,72	–0,79	0,62	5/V

* ***H*max** – максимальный годовой уровень воды, см над «0» графика поста; **дата** – дата наблюдения максимального уровня.

* ***H*max** – maximum annual water level, sm above «0»; date - date of observation of the maximum level.

** Курсивом выделены ошибки второго рода (ложные отрицательные результаты).

** Errors of the second type (false negative results) are italicized.

дней с отрицательной температурой в верховьях реки. В случае позднего половодья спровоцировать наводнение способно резкое повышение температуры. Кроме того, в динамическом прогнозировании любое падение температуры воздуха ниже 0 °С во время прохождения ледохода в среднем течении реки повышает вероятность заторообразования. В годы с поздней и затяжной весной наводнения не случаются.

С точки зрения заблаговременности прогноза, использование синоптических показателей позволяет делать первые предположения о вероятности наводнения уже в третьей декаде апреля на основании декадных прогнозов погоды в южных и центральных районах Якутии. Однако для того чтобы рассмотренный подход стал полноценной прогнозной методикой, необходима дальнейшая работа. Интересно, что в годы, когда существовали предпосылки возникновения наводнений на средней Амге, происходили мощные заторные наводнения на средней Лене – 2010 и 2013 гг., как примеры. Возможно, построенная на изложенных выше подходах расчетная методика может применяться, после адаптации, и для средней Лены.

Основная сложность, с которой может столкнуться такая прогнозная модель, как и другие модели, нестационарность климата. Наводнения

в 1960-х и 1980-х гг. происходили по определенным причинам и в результате определенных сочетаний погодных условий (температуры воздуха, количества дней с положительной температурой). С начала XXI в. климат Якутии изменился, и наводнения последних лет возникают в результате других сочетаний погодных условий, которые раньше не наблюдались.

Стационарность синоптических факторов наводнений

Прогнозирование наводнений упирается в проблему нестационарности климата и рядов гидрометеорологических характеристик, используемых в прогнозах, поскольку соотношение значимых факторов может меняться со временем. В бассейне р. Амга климатические изменения отмечаются с середины 1990-х гг. Начиная с этого времени, наблюдается резкое уменьшение количества дней с отрицательной температурой в конце апреля–начале мая, рост средней температуры воздуха в начале весны.

Большинство метеорологических рядов не проходит проверку на стационарность и случайность по критерию Вальда–Вулфовица WW (табл. 3). Кроме того, наблюдаются более раннее начало весны и более высокая температура воздуха, уменьшается число дней с отрицательной температурой в конце апреля–начале мая. Для оценки значимости этих трендов использован стандартный критерий Манна–Уитни *U** (см. табл. 3).

Максимальный годовой уровень воды за период наблюдений остается стабильным ($p = 0{,}56$), неизменна и повторяемость наводнений, несмотря на активно проводимые в последние десятилетия противозаторные меры ($p = 0{,}50$), что говорит о неэффективности, в долгосрочной перспективе, таких мер. Дата наступления максимального уровня воды сместилась на более ранние сроки и наблюдается в 1999–2019 гг. на шесть дней раньше, 11 мая, чем в период с 1938 по 1998 г.

Наблюдаемые изменения, с точки зрения условий возникновения наводнений, в чем-то компенсируют друг друга. Так, с одной стороны, слой зимних осадков в верхнем течении реки уменьшается, с другой – увеличивается температура воздуха, причем в верхнем течении реки – больше, чем в среднем. Этим объясняется увеличение числа «ошибок первого рода» в табл. 2: большая разница температур между верхним и нижним течением, раннее таяние снега с меньшей вероятностью приводят к наводнениям, поскольку слой стока половодья в среднем становится меньше и уже недостаточен для возникновения стоково-заторных наводнений. С другой стороны, в таких условиях катастрофическое наводнение может произойти в любой год со снегозапасами больше среднемноголетних либо в многоводный год с холодной весной в центральной Якутии.

Прогнозирование наводнений в среднем течении р. Амга

Выше мы показали, что даже простая однофакторная прогнозная модель, основанная на рутинно прогнозируемых показателях (температура воздуха), может достигать некоторого успеха в бинарном прогнозе возможности наводнения. Полученные нами полнота модели и *F*-мера больше 0,7 в задаче с такой постановкой оцениваются

Таблица 3

Уровень значимости тенденций современных климатических изменений в бассейне р. Амга

Table 3

Statistical significance of climatic trends in the Amga River basin

T1			T2			Бассейн/ Amga R. basin		
	WW	*U**		*WW*	*U**		*WW*	*U**
$T_{3\text{-IV}}$	$p < 0{,}05$	$p < 0{,}01$	$T_{3\text{-IV}}$	$p < 0{,}05$	$p < 0{,}001$	$\Delta T_{3\text{-IV}}$	$p < 0{,}1$	$p < 0{,}05$
$T_{1\text{-V}}$	$p < 0{,}001$	$p < 0{,}001$	$T_{1\text{-V}}$	$p < 0{,}001$	$p < 0{,}001$	$\Delta T_{1\text{-V}}$	–	$p < 0{,}05$
$T_{2\text{-V}}$	–	$p < 0{,}001$	$T_{2\text{-V}}$	–	$p < 0{,}001$	$\Delta T_{2\text{-V}}$	–	$p < 0{,}05$
$D(-)_{3\text{-IV}}$	–	$p < 0{,}01$	$D(-)_{3\text{-IV}}$	$p < 0{,}05$	$p < 0{,}001$	$P_{\text{IV-X}}$	$p < 0{,}1$	$p < 0{,}1$
$D(-)_{1\text{-V}}$	$p < 0{,}05$	$p < 0{,}01$	$D(-)_{1\text{-V}}$	$p < 0{,}001$	$p < 0{,}001$	P_{V}	–	–
$D(-)_{2\text{-V}}$	–	$p < 0{,}05$	$D(-)_{2\text{-V}}$	–	$p < 0{,}001$	$H_{\max}$	$p < 0{,}05$	–

как удовлетворительные, особенно в прогнозировании заторных наводнений. В перспективе, однако, следует исследовать возможность применения и других моделей прогноза наводнений. Важный вопрос: какой именно параметр планируется прогнозировать? От ответа на этот вопрос зависит выбор оптимальной прогностической модели.

Бинарный прогноз наводнения может быть построен на любой модели бинарного выбора, например классической множественной логит- или пробит-регрессии или более сложных моделях нечеткой логистической регрессии [19]. Системы нечеткой логики, вероятно, оптимально использовать для вероятностного прогноза распределения максимального уровня воды по высотным диапазонам. В данном случае решается задача о том, с какой вероятностью максимальный уровень воды попадет в тот или иной диапазон отметок. Искусственные нейронные сети (ИНС) ранее использовали для прогноза заторной составляющей максимального уровня воды и максимальных заторных уровней воды для рек в бассейне р. Северная Двина [20]. В состав предикторов входили осенние условия (осенние уровни воды, характеристики осеннего шугохода), данные о толщине льда, весенние условия (даты вскрытия и расходы воды перед вскрытием). Качество модели авторы оценивают как удовлетворительное, однако они отмечают также требовательность моделей ИНС к объему исходных данных. Опыт прогноза вскрытия р. Атабаска в створе Форт Макмюррэй показывает, однако, что простые системы с нечеткой логикой способны давать качественные бинарные прогнозы, а смешанные прогнозные модели с нечеткой логикой и ИНС – также и количественные прогнозы максимального уровня воды [21].

Заключение

Масштаб наводнений определяется природными причинами, а также социально-экономическими последствиями, которые они влекут, в первую очередь – материальным ущербом. С другой стороны, у наводнений есть определенные социально-экономические причины: низкий уровень управления территориями, как следствие – несвоевременные и недостаточные управленческие решения, особенности хозяйствования на затопленных территориях. В этом же контексте можно говорить и о природных последствиях наводнений, например, снижении биоразнообразия и потере качества экосистемных услуг.

Работа по минимизации гидрологических рисков и ущербов от наводнений включает в себя пять основных этапов: прогноз, предупреждение, подготовка, реагирование и ликвидация последствий. Превентивные мероприятия, направленные на предупреждение наводнений, как показывают статистические данные [16, 20], не оказывают никакого влияния на частоту заторных наводнений. Косвенно подтверждают эти выводы и данные наблюдений в Республике Саха (Якутия), где только взрывные работы на этапе реагирования оказывают крайне ограниченный положительный эффект, и то локально. Противозаторные мероприятия не смогли предотвратить ни одно крупное наводнение на р. Лена и притоках за последние два десятилетия, однако способствовали образованию крупных заторов и наводнениям в Ленске в 2001 г. и в Амге в 2018 г. Как следствие, впустую тратится финансирование, которое могло бы в ином случае пойти на реализацию инфраструктурных проектов, связанных с безопасным освоением речных долин – расчистку русел малых рек, дноуглубление на средних и крупных реках, берегоукрепительные работы, а также разработку методов прогнозирования наводнений.

Современная практика работы по снижению ущербов от наводнений должна быть пересмотрена, акцент должен переместиться с технических мер, которые не эффективны, на развитие инструментов страхования рисков [22], на разработку программ психологической поддержки пострадавших от наводнений [23].

Среднее и нижнее течение р. Амга – важный сельскохозяйственный регион, постоянное население которого сосредоточено в долине реки. Наводнения наносят этому региону значительный ущерб, поэтому их прогноз – необходимое звено в стратегической работе по снижению гидрологических рисков. Полученные в данной результаты предполагают, что такая прогнозная методика может быть разработана, опираясь на данные о слое зимних осадков, сроках весеннего перехода через 0 °С в верхнем и среднем течении реки, а также вероятном типе ожидаемого наводнения.

При разработке прогнозных подходов необходимо учитывать влияние изменений климата на соотношение значимых прогнозных факторов. Большее внимание следует уделять оценкам влагозапаса в снеге в верхнем течении Амги, а также организации структурных и неструктурных мер

защиты от наводнений и предупреждения негативных последствий: расчистку русла реки на потенциально заторных участках, улучшение коммуникации с населением, страхование риска затопления как на уровне домовладений, так и на уровне отдельных муниципалитетов, улучшение коммуникации с местным населением. Необходимо разработать прогнозную методику, которая, видимо, будет общей для средней и нижней Амги и средней Лены, учитывающей типизацию наводнений, изменение во времени основных факторов и возможности динамического прогнозирования – с меньшей заблаговременностью, но опирающегося на информацию в реальном времени.

Статья подготовлена в рамках программы Комплексных научных исследований Академии наук РС(Я).

Литература

1. *de Ville de Goyet C., Zapata Marti R., Osorio C.* Natural disaster mitigation and relief. // Disease control priorities in developing countries. 2nd Ed. / The World Bank. London, UK. 1401 p.

2. *Wright J.M.* The nation's responses to flood disasters: A historical account / Association of State Floodplain Managers, 2000. 102 p.

3. *Сендайская* рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. UNISDR, Женева, Швейцария, 2015. 38 с.

4. *Козлова С.В.* Современная государственная земельная политика // Федерализм. 2017. № 3(87). С. 33–48.

5. *Tananaev N., Efremova V., Gavrilyeva T., Parfenova O.* Assessment of the community vulnerability to spring floods: the case of the Amga River, Central Yakutia, Siberia // Hydrology Research. Vol. 52, №1. P. 125–141. DOI: 10.2166/nh.2020.124

6. *AHYST.Lena*. Arctic hydrology and statistics data or the Lena River basin. Compilative dataset on mean annual and extreme flows in the Lena River basin (compiled by Makarieva O., Tananaev N., Lebedeva L.), figshare, version 1.2 (12 August 2019). DOI: 10.6084/m9.figshare.3206962.

7. *Автоматизированная* информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Адрес доступа: https://gmvo.skniivh.ru.

8. *RStudio Team*. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. URL: http://www.rstudio.com/.

9. *R Core Team*. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: https://www.R-project.org/

10. *Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Grolemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H.* Welcome to the tidyverse // Journal of Open Source Software. 2019. Vol. 4(43). P. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.

11. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471.

12. *Kemp M.U., van Loon E.E., Shamoun-Baranes J., Bouten W.* RNCEP: global weather and climate data at your fingertips // Methods in Ecology and Evolution. 2012. No. 3. P. 65–70., R package version 1.0.9.

13. *Pohlert T.* trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. 2020. https://CRAN.R-project.org/package=trend.

14. *Самохин М.А.* Особенности изменения уровней воды в реках в различных регионах России: Автореф. дисс. … канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2006. 26 с.

15. *Магрицкий Д.В., Иванов А.А.* Наводнения в дельте р. Кубани // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 4. С. 387–406.

16. *Бузин В.А.* Заторы и зажоры на реках России. СПб.: ГГИ, 2016. 240 с.

17. *Кильмянинов В.В.* Влияние метеорологических условий перед началом ледохода на масштаб заторных наводнений на Лене // Метеорология и гидрология. 2012. № 4. С. 86–89.

18. *Lindenschmidt K.-E., Huokuna M., Burrell B.C., Beltaos S.* Lessons learned from past ice-jam floods concerning the challenges of flood mapping // International Journal of River Basin Management. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 457–468.

19. *Chukhrova N., Johannssen A.* Fuzzy regression analysis: Systematic review and bibliography // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 84. P. 105708. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105708.

20. *Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л.* Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2016. № 2. С. 82–90.

21. *Mahabir C., Hicks F., Fayek A.R.* Neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system // Cold Regions Science and Technology. 2006. Vol. 46, Is. 2. P. 100–112. DOI: j.coldregions.2006.08.009.

22. *Ermolieva T., Filatova T., Ermoliev Y., Obersteiner M., de Bruijn, K.M., Jeuken A.* Flood catastrophe model for designing optimal flood insurance program: Estimating location-specific premiums in the Netherlands //

Risk Analysis. 2017. Vol. 37, Is. 1. P. 82–89. DOI: 10.1111/risa.12589.

23. *Stanke C., Murray V., Amlôt R., Nurse J., Williams R.* The effects of flooding on mental health: Outcomes and recommendations from a review of the literature // PLOS Currents Disasters. 2012. Edition 1. DOI: 10.1371/4f9f1fa9c3cae.

Поступила в редакцию 02.05.2021
Принята к публикации 01.06.2021

Об авторах

ТАНАНАЕВ Никита Иванович, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; Институт естественных наук, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677004, Якутск, ул. Кулаковского, 46, Россия,
https://orcid.org/0000-0003-2997-0169, TananaevNI@mpi.ysn.ru;

НАХОДКИН Николай Александрович, кандидат биологических наук, руководитель, Якутское региональное отделение РОССОЮЗСПАС, 677901, Якутск, мкрн Марха, ул. Экспериментальная, 4А, Россия,
nakhodkin@mail.ru;

ГОЛОВАНОВ Алексей Олегович, старший преподаватель, Институт естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, 677013, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия,
shedansan@mail.ru.

Информация для цитирования

Тананаев Н.И., Находкин Н.А., Голованов А.О. Генезис, сценарии и особенности прогнозирования наводнений в среднем течении р. Амга (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 86–99. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-86–99

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-86–99

Genesis, scenarios and features of flood prediction in the middle reach of the Amga River (Central Yakutia)

N.I. Tananaev[1,2,*], N.A. Nakhodkin[3], A.O. Golovanov[2]

[1]*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia*
[2]*Institute of natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
[3]*Yakut Regional Branch of ROSSOYUZSPAS, Yakutsk, Russia*

**TananaevNI@mpi.ysn.ru*

Abstract. *Ice-related phenomena made a significant contribution, more than 0.5 m, into the formation of the maximal water level on the Amga River in the cross section near Amga settlement during 41 high water episodes out of 76 (1938–2018). The average value of the ice jamming input into the maximal water level was 1.6 m, during the years with floods – 2.4 m, and the maximal value exceeded 5 m. With respect to the genesis, floods on the Amga River belong mainly to discharge-jamming type – fourteen cases, or to discharge type – five cases during the years 1938 to 2018. The scenarios of the development of discharge and ice-jamming floods differ from each other. Ice-jamming floods occur four days earlier on average and involve lower moisture content in the snow than that in the case of discharge floods. During the years with late expanded springs, floods occur very rarely. Synoptical parameters may be used to make assumptions concerning the type of forthcoming floods, but it is necessary to develop more accurate quantitative*

methods to predict the probability of the floods and their expected levels. These methods should take into account the non-stationary nature of the main synoptical factors leading to waterfloods. The rate of flood repetition during the time of observation remains unchanged, which points to inefficiency of the measures against jamming that were carried out in the river basin during the two recent decades.

Keywords: spring floods, Central Yakutia, Amga River, climatic reanalysis, flood genesis, ice-jamming floods, climate unsteadiness, flood prediction.

Acknowledgements. *The research was carried out with support from the Program of Integrated Research of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia).*

References

1. *de Ville de Goyet C., Zapata Marti R., Osorio C.* Natural disaster mitigation and relief. // Disease control priorities in developing countries. 2nd Ed. / The World Bank. London, UK. 1401 p.

2. *Wright J.M.* The nation's responses to flood disasters: A historical account / Association of State Floodplain Managers, 2000. 102 p.

3. *Sendai* Reduction Framework disaster risk 2015–2030 UNISDR, Geneva, Switzerland. 2015.38 p.

4. *Kozlova S.V.* Sovremennaya gosudarstvennaya zemel'naya politika // Federalizm. 2017. No. 3(87). P. 33–48.

5. *Tananaev N., Efremova V., Gavrilyeva T., Parfenova O.* Assessment of the community vulnerability to spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia // Hydrology Research. Vol. 52, №1. P. 125–141. DOI: 10.2166/nh.2020.124

6. *AHYST.Lena*. Arctic hydrology and statistics data or the Lena River basin. Compilative dataset on mean annual and extreme flows in the Lena River basin (compiled by Makarieva O., Tananaev N., Lebedeva L.), figshare, version 1.2 (12 August 2019). DOI: 10.6084/m9.figshare.3206962.

7. *Avtomatizirovannaya* informatsionnaya sistema gosudarstvennon monitoringa vodnykh objektov (AIS GMVO) : https://gmvo.skniivh.ru.

8. *RStudio Team*. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. URL: http://www.rstudio.com/.

9. *R Core Team*. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL: https://www.R-project.org/

10. *Wickham H., Averick M., Bryan J., Chang W., McGowan L., François R., Grolemund G., Hayes A., Henry L., Hester J., Kuhn M., Pedersen T.L., Miller E., Bache S.M., Müller K., Ooms J., Robinson D., Seidel D.P., Spinu V., Takahashi K., Vaughan D., Wilke C., Woo K., Yutani H.* Welcome to the tidyverse // Journal of Open Source Software. 2019. Vol. 4(43). P. 1686. DOI: 10.21105/joss.01686.

11. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bulletin of the American Meteorological Society. 1996. Vol. 77, No. 3. P. 437–471.

12. *Kemp M.U., van Loon E.E., Shamoun-Baranes J., Bouten W.* RNCEP: global weather and climate data at your fingertips // Methods in Ecology and Evolution. 2012. No. 3. P. 65–70., R package version 1.0.9.

13. *Pohlert T.* trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. R package version 1.1.2. 2020. https://CRAN.R-project.org/package=trend.

14. *Samokhin M.A.* Osobennosti izmeneniya urovney vody v rekakh v razlichnykh regionakh Rossii: Avtoref. diss. … kand. geogr. nauk. Moscow: MSU, 2006. 26 p.

15. *Magritskiy D.V., Ivanov A.A.* Navodneniya v del'te r. Kubani // Vodnye resursy. 2011. Vol. 38, No. 4. P. 387–406.

16. *Buzin V.A.* Zatory i zazhory na rekakh Rossii. SPb: GGI. 2016. 240 p.

17. *Kil'myaninov V.V.* Vliyanie meteorologicheskikh usloviy pered nachalom ledokhoda na masshtab zatornykh navodneniy na Lene // Meteorologiya i gidrologiya. 2012. No. 4. P. 86–89.

18. *Lindenschmidt K.-E., Huokuna M., Burrell B.C., Beltaos S.* Lessons learned from past ice-jam floods concerning the challenges of flood mapping // International Journal of River Basin Management. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 457–468.

19. *Chukhrova N., Johannssen A.* Fuzzy regression analysis: Systematic review and bibliography // Applied Soft Computing. 2019. Vol. 84. P. 105708. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105708.

20. *Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L.* Faktory obrazovaniya ledovykh zatorov na rekakh basseyna Severnoy Dviny v sovremennykh usloviyakh // Moscow University Bulletin. Series 5. Geography. 2016. No. 2. P. 82–90.

21. *Mahabir C., Hicks F., Fayek A.R.* Neuro-fuzzy river ice breakup forecasting system // Cold Regions Science and Technology. 2006. Vol. 46, Is. 2. P. 100–112. DOI: j.coldregions.2006.08.009.

22. *Ermolieva T., Filatova T., Ermoliev Y., Obersteiner M., de Bruijn, K.M., Jeuken A.* Flood catastrophe model for designing optimal flood insurance program: Estimating location-specific premiums in the Netherlands // Risk Analysis. 2017. Vol. 37, Is. 1. P. 82–89. DOI: 10.1111/risa.12589.

23. *Stanke C., Murray V., Amlôt R., Nurse J., Williams R.* The effects of flooding on mental health: Outcomes and recommendations from a review of the literature // PLOS Currents Disasters. 2012. Edition 1. DOI: 10.1371/4f9f1fa9c3cae.

About the authors

TANANAEV, Nikita Ivanovich, Cand. Sci. (Geography), leading researcher, P.I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia; leading researcher, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk, 677004, Russia,
https://orcid.org/0000-0003-2997-0169, TananaevNI@mpi.ysn.ru;

NAKHODKIN, Nikolay Aleksandrovich, Cand. Sci. (Biology), head, Yakutian regional office, ROSSOYUZSPAS, 4A Eksperimentalnaya st., Markha District, Yakutsk 67790, Russia,
nakhodkin@mail.ru;

GOLOVANOV, Aleksey Olegovich, senior lecturer, Institute of Natural Sciences, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk 677013, Russia,
shedansan@mail.ru.

Citation

Tananaev N.I., Nakhodkin N.A., Golovanov A.O. Genesis, scenarios and features of flood prediction in the middle reach of the Amga River (Central Yakutia) // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 86–99. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-86–99

УДК 574.3
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-100–111

Поливариантность репродуктивного развития *Betula czerepanovii* Orlova в условиях техногенного стресса

Н.В. Василевская

Мурманский арктический государственный университет, Мурманск, Россия
n.v.vasilevskaya@gmail.com

Аннотация. *В статье представлены результаты исследований репродуктивного развития Betula czerepanovii Orlova (береза Черепанова) в импактной зоне комбината «Североникель» Мурманской области. Методом атомно-адсорбционной спектроскопии определено содержание тяжелых металлов (Ni, Cu, Pb, Cd) в почвах пробных площадок, расположенных по градиенту загрязнения. Показано, что ингибирование репродукции берез наблюдается только в непосредственной близости к комбинату (3 км) на техногенной пустоши, где в почвах выявлены очень высокие концентрации никеля (795 мг/кг) и меди (149 мг/кг). Получены значимые коэффициенты корреляции между содержанием никеля в почвах и числом мужских и женских сережек B. czerepanovii. Показано, что в условиях хронического загрязнения среды тяжелыми металлами у берез образуется больше женских соцветий, чем мужских. На всех пробных площадках у части деревьев (20–40 %) выявлен переход от однодомности к двудомности, когда у особей развивается очень большое количество только мужских или женских соцветий. В зоне техногенного редколесья (8 км от комбината) и дефолиирующих лесов (20–30 км), при снижении содержания никеля в почвах до нескольких ПДК, ценопопуляции B. czerepanovii адаптированы к загрязнению. Показано, что береза Черепанова является металлоустойчивым видом. Высказана гипотеза поливариантности развития в условиях промышленного загрязнения.*

Ключевые слова: *Betula czerepanovii*, Субарктика, тяжелые металлы, репродукция, поливариантность развития.

Благодарности. *Автор выражает глубокую благодарность кандидату биологических наук Юлии Михайловне Лоскутовой за участие в исследованиях.*

Введение

Мониторинг развития растений в условиях антропогенного стресса является базовым исследованием для восстановления нарушенных территорий. Реакции живых организмов на промышленное загрязнение среды предприятиями горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности изучены недостаточно, несмотря на то что это направление аутэкологических исследований перспективно как в прикладном, так и в теоретическом аспекте [1].

На Кольском полуострове сформировалась особая среда с субарктическим климатом, близостью Северного Ледовитого океана, горными массивами и развитой промышленностью, которые создают потенциал для изучения адаптаций растений к различным стрессовым факторам [2]. Российскими и зарубежными учеными с 80-х годов XX века проводятся исследования воздействия выбросов медно-никелевых комбинатов Мурманской области на популяции *Betula czerepanovii*, *Salix borealis*, *Pinus sylvestris*, *Sorbus gorodkovii, Vaccinium myrtillys* L., *V. vitis-idaea* L., *V. uliginisum* L., *Empetrum hermaphoditum* [3–11]. Особую актуальность приобретает направление по изучению металлоустойчивости популяций растений промышленных зон [12]. Адаптация растений к стрессовому воздействию тяжелых металлов широко изучена и представляет собой пример быстрой эволюционной адаптации [13]. Большинство исследований проведено на травянистых растениях, возможно, это обусловлено сложностью проведения экспериментов на древесных видах, отличающихся большими размерами и длительностью жизненного цикла [14]. При этом традиционно считается, что короткоживущие травянистые виды адаптируются к загрязнению среды тяжелыми металлами, тогда

© Василевская Н.В., 2021

как деревья из-за их длительных циклов репродукции – нет [15, 16]. Однако у ряда древесных видов из загрязненных местообитаний отмечена более высокая резистентность к тяжелым металлам по сравнению с фоновыми условиями [8, 16, 17], особенно в родах *Betula* L., *Salix* L., *Sorbus* L. [11, 18–20]. В экспериментах норвежских и финских ученых с саженцами *Betula czerepanovii* [8, 16], выращенными из семян деревьев, произрастающих в импактных районах Кольского полуострова, получено, что они отличаются высокой устойчивостью к тяжелым металлам. Исследователи считают, что длительное загрязнение среды медно-никелевыми комбинатами в условиях Субарктики привело к тому, что популяции *B. czerepanovii* Кольского полуострова проявляют высокую адаптивность к тяжелым металлам [2, 8]. Это один из немногих примеров адаптации древесных растений к антропогенному стрессу. Было высказано предположение, что выживаемость долгоживущих растений в сильно загрязненных средах объясняется скорее фенотипической пластичностью и акклиматизацией, чем эволюцией резистентности [8, 14].

Род *Betula* проявляет исключительно высокую генетическую изменчивость, которая может привести к генетической дифференциации и, таким образом, к адаптации к тяжелым металлам [21]. Репродукция *B. czerepanovii* по градиентам загрязнения мало изучена [6, 10], хотя этот вид является наиболее перспективным для восстановления промышленных пустошей. Грайм [22] в свое время высказал теорию, что в условиях усиления техногенного стресса репродуктивное развитие растений должно снижаться. Кроме того, половое размножение в техногенной среде требует больших энергетических затрат, поскольку необходимы дополнительные ресурсы. Соматические затраты в условиях, когда вегетативные и генеративные органы растений конкурируют за ограниченный пул ресурсов, могут вызвать негативные последствия для будущего роста, воспроизводства и выживаемости [23].

Цель работы – изучение репродукции *Betula czerepanovii* в импактной зоне комбината «Североникель» Мурманской области.

Материалы и методы исследования

Исследования ценопопуляций *Betula czerepanovii* выполнялись в зоне техногенного воздействия комбината «Североникель» (г. Мончегорск) Мурманской области. *Betula czerepanovii* Orlova (береза Черепанова) – гипоарктический, евросибирский вид. Является одним из основных лесообразующих видов деревьев в субарктических районах северной России и Скандинавии [6]. Выдерживает экстремальные климатические условия и выживает на техногенных пустошах, где приобретает низкорослую форму с множеством стволов. Аналогичную жизненную форму *B. czerepanovii* имеет в березовых криволесьях горных массивов Кольского полуострова, где популяции демонстрируют признаки адаптации к абиотическим стрессовым факторам [8]. В зоне техногенного воздействия комбината «Североникель» *B. czerepanovii* присутствует во всех типах сообществ, вне зависимости от степени их нарушенности.

Таксономический статус северных популяций березы является вопросом дискуссионным. Морфологическая пластичность – одна из особенностей представителей рода *Betula* (*Betulaceae* S. F. Gray), что создает определенные сложности в его таксономических исследованиях [24]. В. И. Ермаков [25] высказал предположение, что *B. pubescens* и *B. pendula* представлены на Кольском полуострове северными расами. Н.И. Орлова выделила вид *Betula czerepanovii* Orlova [26]. По ее мнению, данный вид является гибридом между *B. pubescens* Ehrh. и *B. nana* L. Ряд западных ученых определяют исследуемый вид как *Betula pubescens* subsp. *czerepanovii* Orlova Hamet-Ahti. [27, 28]. Многие авторы отмечают наличие интенсивной гибридизации между видами берез, что объясняет их широкий полиморфизм [29]. В гибридизацию гораздо легче вступают виды берез, филогенетически более молодые, имеющие в настоящее время несбалансированный геном [30], именно к таким видам относятся *B. nana и B. czerepanovii*. В данном исследовании кольские популяции березы рассматриваются как *Betula czerepanovii* Orlova [26]. Благодаря большой экологической роли, которую этот вид играет в субарктических наземных экосистемах, он интенсивно изучается [31], являясь моделью для проверки ряда экологических теорий [32]. В ряде исследований показано, что в окрестностях медно-никелевых металлургических комбинатов Мурманской области появилась металлоустойчивая форма *B. czerepanovii* [6, 16].

Комбинат «Североникель» (67°56′N, 32°49′ E) расположен в центре Кольского полуострова, в окрестностях г. Мончегорск, в зоне крайней се-

верной тайги. До начала работы медно-никелевого комбината в 1938 г. преобладающим типом растительности на территориях к югу от Мончегорска был еловый лес [6]. Огромное количество серы и тяжелых металлов, выброшенных «Североникелем» в окружающую среду за более чем 80 лет деятельности, вызвали масштабное разрушение почв и уничтожение растительности вокруг медеплавильного завода. В Мончегорском районе импактная зона вытянута в форме эллипса в связи с преобладанием северных и южных ветров. Площадь зоны загрязнения в конце XX века составляла до 93 000 га, причем на площади 3,7 тыс. га хвойные леса уничтожены полностью [33]. Основными загрязняющими веществами при переработке медно-никелевой руды являются диоксид серы и пыль, содержащая тяжелые металлы (Ni, Cu, Co). В окрестностях «Североникеля» выпадения тяжелых металлов привели к образованию техногенной пустыни. Значительная часть металлов в твердом дисперсном состоянии переносится воздушным путем на большие расстояния.

Рис. 1. Техногенная пустошь в окрестностях комбината «Североникель» (по [10]).

Fig. 1. Technogenic wasteland in the vicinity of the «Severonikel» plant (after [10]).

Рис. 2. Техногенное редколесье в импактной зоне комбината «Североникель» (по [10]).

Fig. 2. Technogenic woodlands in the impact zone of the «Severonikel» plant (after [10]).

Исследования *Betula czerepanovii* проведены на четырех пробных площадках (рис. 1, 2, 3), расположенных по градиенту загрязнения от комбината «Североникель» (г. Мончегорск): $ПП_1$ – техногенная пустошь (3 км от источника загрязнения), $ПП_2$ – зона техногенного редколесья (8 км), $ПП_3$ и $ПП_4$ – зона дефолиирующих лесов (20 и 30 км) (рис. 1–3). Контрольная площадка располагалась в 60 км в направлении на юго-восток от комбината.

На экспериментальных площадках проведен отбор проб почвы в соответствии со стандартом СЭФ «Общие требования к отбору проб» на определение тяжелых металлов. Методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в почвах определено содержание ряда тяжелых металлов (Cu, Ni, Pb, Cd) на станции агрохимической службы «Мурманская».

Для проведения мониторинга репродуктивного развития *B. czerepanovii* на пробных площадках отмаркировано по 10 модельных деревьев, на каждом дереве по 5 ветвей, на которых в период цветения (середина июня) подсчитано количество мужских и женских сережек. Биологическая повторность репродуктивных побегов на каждой площадке 50-кратная. Мониторинг репродукции *B. czerepanovii* в окрестностях «Северникеля» проводился в течение 3 лет (2005–2007 гг.). Статистическая обработка данных осуществлена с помощью программы Excel 2000 (описательная статистика). Выполнен корреляционный анализ зависимости числа мужских и женских соцветий березы от концентрации никеля и меди в почвах.

Рис. 3. Дефолиирующий лес в импактной зоне комбината «Североникель» (по [10]).

Fig. 3. Defoliating forest in the impact zone of the «Severonikel» plant (after [10]).

Результаты и обсуждение

Атомно-абсорбционная спектрофотометрия почв на содержание тяжелых металлов показала, что в в окрестностях комбината «Североникель» концентрация никеля и меди превышает ПДК на всех пробных площадках (см. таблицу). Содержание никеля в почвах техногенной пустоши в окрестностях г. Мончегорск – 795 мг/кг (199 ПДК). В этой зоне наблюдается разрушение почв, вызванное значительными выбросами никеля и меди, которые вытеснили биогенные ионы [34]. По мере удаления от комбината, концентрация никеля в почвах резко снижается в зоне техногенного редколесья ($ПП_2$) и дефолиирующих лесов ($ПП_3$ и $ПП_4$) (см. таблицу).

Высокие концентрации меди выявлены в образцах почв по градиенту загрязнения комбината «Североникель», особенно техногенной пустоши ($ПП_1$) – 149 мг/кг (49,7 ПДК) и техногенного редколесья ($ПП_2$) – 222 мг/кг (74 ПДК) (см. таблицу). В зоне дефолиирующих лесов содержание меди в почвах снижается, но превышает ПДК.

Концентрации кадмия в почвах пробных площадок в пределах нормы, исключение составляет техногенная пустошь ($ПП_1$), где выявлено его высокое содержание (0,550 мг/кг). Содержание свинца в почвах всех экспериментальных площадок не превышает ПДК (см. таблицу). Распределение тяжелых металлов имеет нелинейный характер, поскольку большую роль в распространении загрязняющих веществ, помимо удаленности от источника выбросов, играют орография, особенности гидрологических условий и ветровой режим [7].

В результате исследования репродуктивного развития *B. czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» получены неожиданные результаты. В условиях высокого уровня загрязнения почв ионами никеля и меди у большого числа особей *B. czerepanovii* происходит переход от однодомности к двудомности. Березы – однодомные растения с двухлетним генеративным циклом. В первый год закладываются зачатки мужских и женских цветков. Опыление, оплодотворение и созревание семян происходят на второй год (рис. 4) [35]. По градиенту загрязнения «Североникеля» на трех экспериментальных площадках ($ПП_1$, $ПП_2$, $ПП_3$) отмечены отдельные особи берез, на которых в большом количестве развиваются только мужские или женские соцветия (см. рис. 4). На техногенной пустоши доля таких деревьев *B. czerepanovii* составила 20 %, в зоне техногенного редколесья – 30 % и дефолиирующих лесов – 40 %. В течение трех вегетационных сезонов это были одни и те же деревья. На некоторых особях берез репродуктивные органы отсутствовали, на техногенной пустоши таких деревьев было 40 %. В контроле деревьев с аномальным репродуктивным развитием не выявлено.

Содержание тяжелых металлов в почве в зоне промышленного воздействия комбината «Североникель» (мг/кг)

The content of heavy metals in the soils in the industrial impact zone of the Severonikel plant (mg / kg)

Номер площади Test plots	Cu	Ni	Pb	Cd
$ПП_1$	149	795	29,3	0,550
$ПП_2$	222	77,6	14,9	0,351
$ПП_3$	39,9	25,4	2,84	0,098
$ПП_4$	58,2	20,9	10,1	0,116
Контроль Control	20,3	11,6	6,95	0,071
ПДК * MPC	3,0	4,0	32,0	0,5–2,0

Примечание. $ПП_1$–$ПП_4$ – пробные площадки.

* ПДК – приводится по: «Федеральные санитарные правила, нормы и гигиенические нормативы. Гигиенические требования к качеству почвы населенных мест» (1999).

Note. $ПП_1$–$ПП_4$ – test plots.

* MPC – maximum permissible concentration according to «Federal Sanitary Rules, Norms and Hygienic Standards. Hygienic Requierements for the Soil Quality of Populated Areas» (1999).

Аналогичные данные получены в импактной зоне комбината «Печенганикель», расположенного на северо-западе Кольского полуострова, в лесотундровой зоне [36]. На каждой экспериментальной площадке помимо однодомных, что характерно для *B. czerepanovii*, выявлены двудомные особи. Доля таких деревьев на техногенной пустоши составила 37 %, в зоне техногенного редколесья 33 % и дефолиирующих лесов – 20 %, в контроле, на расстоянии 100 км от «Печенганикеля», двудомные особи отсутствовали. Для популяций, произрастающих на открытых пространствах, с низкой плотностью популяций и рассеянным распределением характерна высокая морфологическая изменчивость [37]. Особый интерес вызывает тот факт, что переход бе-

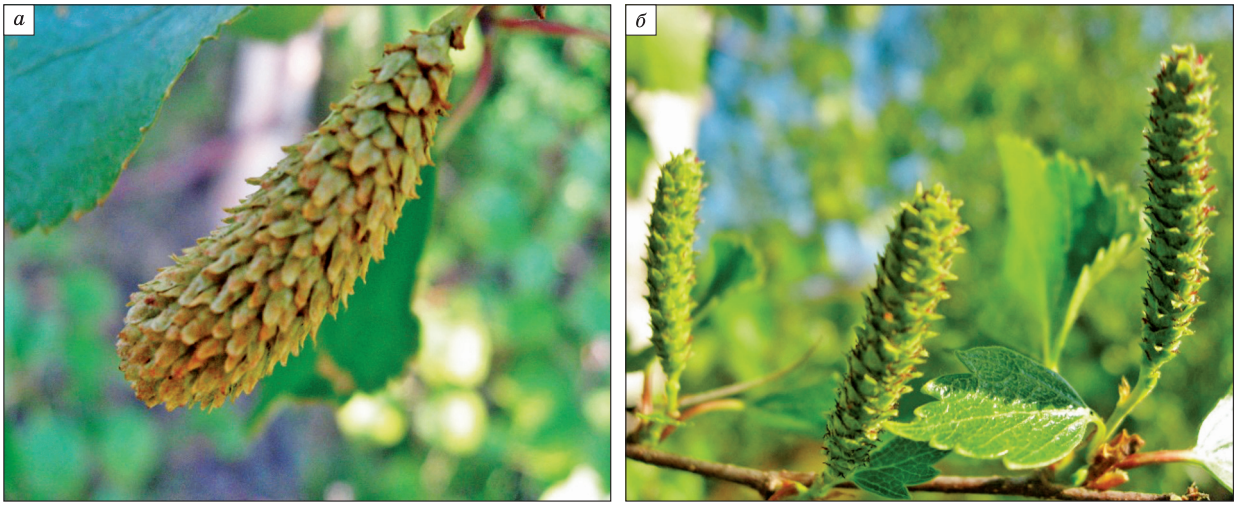


Рис. 4. Мужские (*а*) и женские (*б*) соцветия *Betula czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (по [10]).

Fig. 4. Male (*а*) and female (*б*) inflorescences *Betula czerepanovii* in the vicinity of the Severonikel plant (after [10]).

рез от однодомности к двудомности происходит не только в непосредственной близости к источникам выбросов, но и в зоне дефолиирующих лесов, на большом удалении от комбинатов (30–40 км). Аналогичные данные получены для *Betula pendula* в лесостепных районах Западной Сибири в условиях промышленного загрязнения [35].

Мониторинг репродукции *B. czerepanovii* в импактной зоне комбината «Североникель» выявил нестабильность динамики числа мужских и женских сережек на побегах по годам (рис. 5, 6). В 2005 и 2007 гг. соцветий значительно больше, чем в 2006 г. По-видимому это связано с двухлетним генеративным циклом берез, а также с тем, что в год обильного образования семян происходит слабая закладка репродуктивных почек, и наоборот, повышенная в том году, когда их образование минимально [35].

В течение 3 лет мониторинга отмечалось ингибирование репродуктивного развития *B. czerepanovii* на техногенной пустоши ($ПП_1$), наиболее загрязненной ионами никеля − 795 мг/кг (199 ПДК) и меди – 149 мг/кг (49,7 ПДК). На этой пробной площадке у берез выявлено минимальное число мужских и женских сережек на побег (рис. 5, 6). Количество мужских соцветий *B. czerepanovii* в несколько раз меньше контрольных значений, особенно в 2005 г. (в 4,5 раза). Еще более значительное ингибирование выявлено по числу женских соцветий. На техногенной пустоши их количество минимально во все годы наблюдений, в 2005 и 2007 гг. – в 5 раз меньше, чем в контроле. Получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции между содержанием никеля в почвах и числом мужских ($r = −0,66$) и женских сережек ($r = −0,81$). Чем выше концентрации ионов никеля в почве, тем меньше мужских и женских сережек образуется на побегах *B. czerepanovii*. Известно, что никель отличается особенно высокой токсичностью и большой скоростью поступления в надземные органы, оказывая сильное влияние на рост и развитие растений [38]. Корреляционный анализ между содержанием меди в почве пробных площадок и количеством мужских и женских сережек не дал статистически значимых результатов. В.П. Бессонова [39] показала, что загрязнение среды тяжелыми металлами вызывает изменение соотношения между числом генеративных и вегетативных почек. Накопление металлов в почках приводит к снижению митотической активности клеток, снижению активности фитогормонов (особенно цитокининов). Недостаток сахаров и фитогормонов может быть ограничивающим фактором перехода меристем к генеративному морфогенезу в условиях загрязнения среды тяжелыми металлами [39].

В зоне техногенного редколесья ($ПП_2$), при снижении содержания никеля в почве в 10 раз по сравнению с техногенной пустошью (19,4 ПДК), число мужских сережек увеличилось в несколько раз в 2005 и 2007 гг. (см. рис. 5, 6). Аналогичные результаты получены по женским соцветиям, в зависимости от года наблюдений. При этом

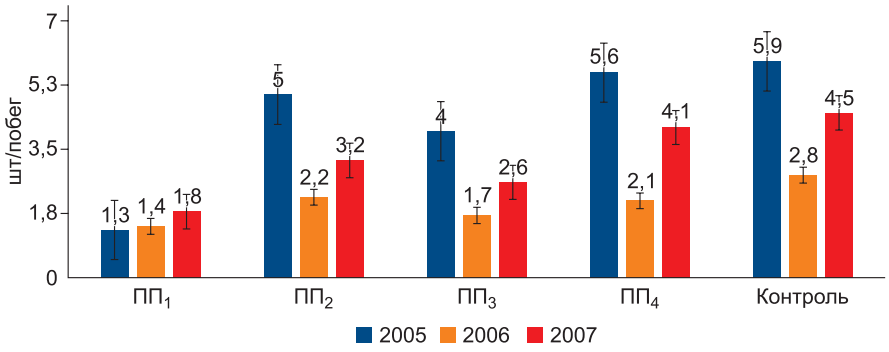


Рис. 5. Динамика числа мужских сережек *Betula czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (2005–2007 гг.).
* $ПП_1$–$ПП_4$ – пробные площадки.

Fig. 5. Dynamics of the number of male catkins of *Betula czerepanovii* (in the vicinity of the Severonikel plant (2005–2007).
* $ПП_1$–$ПП_4$ – test plots.

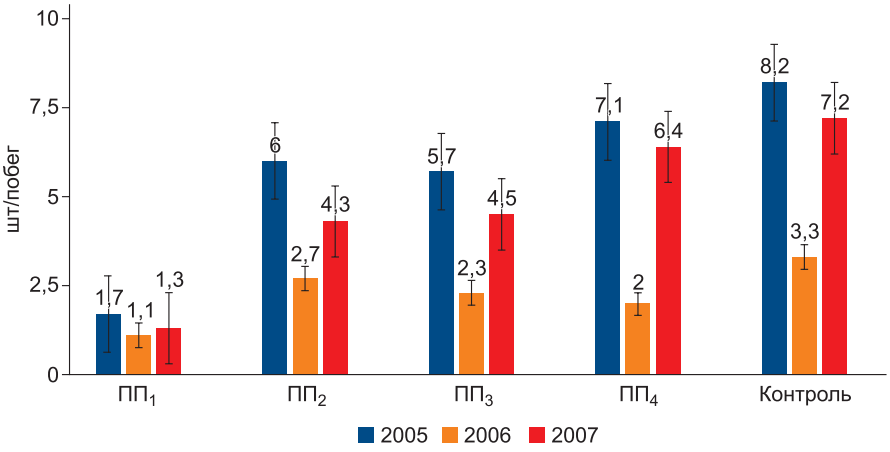


Рис. 6. Динамика числа женских сережек *Betula czerepanovii* в окрестностях комбината «Североникель» (2005–2007 гг.).
$ПП_1$–$ПП_4$ – пробные площадки.

Fig. 6. Dynamics of the number of female catkins of *Betula czerepanovii* in the vicinity of the Severonikel plant (2005–2007).
$ПП_1$–$ПП_4$ – test plots.

концентрация меди в почвах этой пробной площадки самая высокая (74 ПДК). В зоне дефолиирующих лесов ($ПП_3$, $ПП_4$), где концентрация никеля в почве составляет 6,4 и 5,3 ПДК, число мужских и женских соцветий увеличивается по сравнению с техногенной пустошью. На площадке $ПП_4$, расположенной на удалении 30 км от комбината, количество мужских и женских сережек на побег близко к контрольным значениям (см. рис. 5, 6).

В ходе исследований выявлено, что на всех пробных площадках, кроме техногенной пустоши, у *B. czerepanovii* образуется больше женских сережек, чем мужских (см. рис. 5, 6), это может быть реакцией на техногенный стресс. Аналогичные данные получены в г. Йошкар-Ола, где в окрестностях фармацевтического завода выявлено значительное увеличение количества женских сережек *Betula pendula* Roth [40].

Исследования в окрестностях «Североникеля» проводились М. Козловым и Е. Зверевой из университета г. Турку (Финляндия) [6]. Выявлено, что большая часть деревьев *B. czerepanovii* на техногенной пустоши не продуцировала ни мужских, ни женских сережек. Количество женских соцветий у берез достоверно увеличивалось на пробных площадках по мере приближения к источнику загрязнения. Корреляционный анализ показал, что число мужских и женских сережек не связано с уровнем техногенного загрязнения. По мнению авторов [6], репродуктивные процессы в популяциях *B. czerepanovii* либо обладают высокой устойчивостью к загрязнению, либо популяции, длительно находящиеся в условиях

сильного техногенного стресса, приобрели повышенную устойчивость к загрязнению вследствие элиминации в процессе естественного отбора наиболее чувствительных генотипов. Последний феномен выявлен для нескольких других видов деревьев [41, 42]. Авторы высказали гипотезу, что увеличение репродуктивных возможностей в стрессовых условиях среды может рассматриваться как адаптационная реакция растений на химическое загрязнение среды [6].

В данном исследовании получены результаты, несколько отличающиеся от данных М. Козлова и Е. Зверевой [6]. При хроническом загрязнении почв ионами никеля и меди в импактной зоне комбината «Североникель» выявлена поливариантность развития *B. czerepanovii*, что выражается в усилении репродуктивной функции у ряда особей, переходе от однодомности к двудомности и резком увеличении на них числа мужских или женских соцветий. На техногенной пустоши чрезвычайно высокие концентрации никеля и меди в почвах ингибируют репродуктивное развитие берез. В зонах техногенного редколесья и дефолиирующих лесов, при снижении концентраций ионов никеля в почвах, число мужских и женских сережек на побег увеличивается, что свидетельствует об адаптации популяций *B. czerepanovii* к загрязнению среды тяжелыми металлами.

Растения высоких широт представляют большой интерес в плане изучения феномена поливариантности развития [43, 44]. Экстремальный климат Субарктики в сочетании с высоким уровнем промышленного загрязнения создает на Кольском полуострове особые модельные территории для экологических исследований. Одним из проявлений поливариантности развития является переход растений от вегетативного размножения к половому в условиях техногенного стресса. Такие данные получены у *Castilleja lapponica* (кастиллея лапландская) – эндемичного вида Восточной Фенноскандии, в ценопопуляциях в окрестностях хвостохранилищ, где складируются отходы обогащения лопарита (пос. Ревда Мурманской области) [43]. Исследования показали, что в фоновых ценопопуляциях Ловозерских тундр и в условиях загрязнения среды развитие *C. lapponica* идет по-разному. В фоновых условиях *C. lapponica* размножается в основном вегетативно, усиление партикуляции приводит к увеличению числа вегетативных особей [45]. В условиях химического стресса и хронического облучения (30–60 мкр/ч) в ценопопуляции отмечается семенное возобновление. Увеличение полового размножения под воздействием загрязнения ранее было обнаружено у *Empetrum nigrum* [46], *Salix borealis* и *Salix caprea* [4]. Усиление полового воспроизводства в стрессовых условиях может быть адаптивным, поскольку семена могут распространяться в более благоприятные местообитания или сохраняться в почве [47]. Известный российский геоботаник Н.А. Матвеева [48] отмечает, что в высоких широтах значительно возрастает репродуктивный потенциал растений.

Заключение

В результате исследований выявлено, что высокие концентрации тяжелых металлов в почве техногенной пустоши ингибируют репродуктивное развитие березы Черепанова. По мере снижения концентраций никеля в почвах выявлена адаптация ценопопуляций березы к загрязнению среды тяжелыми металлами. Переход от однодомности к двудомности, увеличение числа женских репродуктивных органов в зоне хронического загрязнения можно рассматривать как поливариантность развития, когда в экстремальных для вида условиях среды реализуется его генетический потенциал. Поливариантность развития выявлена у многих аборигенных видов растений Субарктики. Под воздействием абиотических и антропогенных факторов среды наблюдается поливариантное прохождение онтогенеза, что выражается в изменении продолжительности его этапов, интенсивности ветвления, образования репродуктивных органов, переходе с вегетативного размножения на половое и т. д.

B. czerepanovii является металлоустойчивым видом, резистентным к высоким концентрациям тяжелых металлов, однако механизмы этой толерантности остаются неизвестными. Металлоустойчивость *B. czerepanovii*, поливариантность репродуктивного развития в условиях промышленного загрязнения имеют как теоретический, так и практический интерес и требуют проведения дальнейших исследований.

Литература

1. *Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л.* Нарушения стабильности развития организма как результат песси-

мизации среды при техногенной трансформации природных ландшафтов // Онтогенез. 2014. Т. 45, № 3. С. 151–161. DOI: 10.7868/S0475145014030057

2. *Kozlov M.V.* Pollution resistance of mountain birch *Betula pubescens* subsp. *czerepanovii* near the copper–nickel smelter: natural selection or phenotypic acclimation // Chemosphere. 2005. Vol. 59. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.010

3. *Kozlov M.V., Haukioja E.* Performance of birch seedlings replanted in heavily polluted industrial barrens of the Kola peninsula, Nortwest Russia // Restoration Ecology. 1999. Vol. 7. P. 145–154. DOI: 10.1046/j.1526-100X.1999.72005.x

4. *Zvereva E.L., Kozlov M.V.* Effects of pollution-induced habitat disturbance on the response of willows to simulated herbivory // Journal of Ecology. 2001. Vol. 89. P. 21–30. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2001.00509.x

5. *Черненькова Т.В.* Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М.: Наука, 2002. 191 с.

6. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia // Environmental Pollution. 2004. Vol. 132. P. 443–451. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.05.018

7. *Жиров В.К., Голубева Е.И., Говорова А.Ф., Хаитбаев А.Х.* Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. М.: Наука, 2007. 162 с.

8. *Eranen J.K.* Rapid evolution towards heavy metal resistance by mountain birch around two subarctic copper – nickel smelters // Journal of Evolutionary Biology. 2008. Vol. 21. P. 492–501. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2007.01491.x

9. *Лянгузова И.В., Мазная Е.А*. Динамические тренды популяций *Vaccinium myrtillus* L. в зоне воздействия медно-никелевого комбината: результаты 20-летнего мониторинга // Экология. 2012. № 4. С. 261–269.

10. *Василевская Н.В., Лукина Ю.М.* Рост и развитие древесных растений в условиях техногенного загрязнения. Биомониторинг техногенной среды. Saarbrucken: Lambert Academic press, 2012. 173 с.

11. *Василевская Н.В., Сидорчук А.В.* Воздействие промышленного загрязнения комбината «Печенганикель» на динамику роста *Sorbus gorodkovii* Pojark // Ученые записки Петрозаводского университета. 2018. № 3. С. 28–35.

12. *Дуля О.В.* Эколого-генетические механизмы устойчивости травянистых растений к промышленному загрязнению Екатеринбурга: Дис. … канд. биол. наук. Екатеринбург, 2015. 212 с.

13. *Macnair M.R.* The evolution of plants in metal-contaminated environments // Environmental Stress, Adaptation and Evolution / eds. Bijlsma R., Loeschcke V. Basel: Verlag, 1997. P. 3–24.

14. *Turner A.P.* The responses of plants to heavy metals // Toxic Metals in Soil-Plant Systems/ eds. Ross S. M. Chichester: John Wiley & Sons, 1994. P. 153–187.

15. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Does impact of point polluters affect growth and reproduction of herbaceous plants // Water Air Soil Pollution. 2007. Vol. 186. P. 183–194. DOI: 10.1007/s11270-007-9476-z

16. *Eranen J.K., Nilsen J., Zverev V.E., Kozlov M.V.* Mountain birch under multiple stressors – heavy metal-resistant populations co-resistant to biotic stress but maladapted to abiotic stress // Journal of Evolutionary Biology. 2009. Vol. 22. P. 840–851. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2009.01684.x

17. *Mengoni A., Gonelli C., Hakvoort H.W.Z., Bazzicalupo M., Gabrielli R., Schat H.* Evolution of copper tolerance and increased expression of a 2 h – type – metallothionein gene in *Silene paradoxa* L. populations // Plant and Soil. 2003. Vol. 254, No. 2. P. 451–457.

18. *Utriainen M.A., Karenlampi L.V., Karenlampi S.O., Schat H.* Differential tolerance to copper and zinc of micropropagated birches tested in hydroponics // New Phytologist. 1997. Vol. 137. P. 543–549. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1997.00840.x

19. *Алексеев А.С., Мельничук И.А., Трубачева Т.А., Пименов К.А., Крюковский А.С.* Проблемы озеленения п. Никель Мурманской области // Лесной вестник. 2010. № 1. С. 41–48.

20. *Davies A. A., Perkins W. F., Bowell R.* Geochemical assessment of mine waste cover performance post reclamation at Park mine, Worth Wales // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2016. Vol. 16. No 2. P. 127–136. DOI: 10.1144/geochem2014-320

21. *Howland D.E., Oliver R.P., Davy A.J.* Morphological and molecular variation in natural populations of Betula // New Phytologist. 1995. Vol. 130. P. 117–124. DOI:10.1111/j.1469-8137.1995.tb01821.x

22. *Grime J.P.* Plant Strategies, Vegetation Processes and Ecosystem Properties / New York: John Wiley, 2006. 456 p.

23. *Hemborg A.M., Karlsson P.S.* Somatic costs of reproduction in eight subarctic plant species // Oikos. 1998. Vol. 82. P. 149–157. DOI:10.2307/3546925

24. *Gardiner A.S.* Taxonomy of infraspecific variation in *Betula pubescens* Ehrh., with particular reference to the Scottish Highlands // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences. 1984. Vol. 85. Iss. 1-2. P. 13–26.

25. *Ермаков В.И.* Механизмы адаптации березы к условиям Севера. Л.: Наука, 1986. 144 с.

26. *Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб., Мир и семья. 1995. 990 с.

27. *Ruohomaki K., Haukioja E., Repka S., Lehtila K.* Leaf value: effect of damage to individual leaves on growth and reproduction of mountain birch shoots // Ecology. 1997. V. 78. P. 2105–2117.

28. *Valkama J., Kozlov M.V.* Variation in fluctuating asymmetry of mountain birch: is cold spring more stressful than pollution? // Journal of Applied Ecology. 2001. Vol. 38. P. 665–673.

29. *Palme A.E.* Evolutionary history and chloroplast DNA variation in plant genera: Betula, Corrylis & Salix. Upsala: Acta Universityes Upsaliensis, 2003. 50 p.

30. *Коропачинский Ю.И.* Естественная гибридизация и проблемы гибридизации берез Северной Азии // Сибирский экологический журнал. 2013. № 4. С. 459–479.

31. *Nordic* mountain birch ecosystems. Man and the biosphere/ ed. Wiegolaski F. E. Series 27. New York: The Parthenon Publishing Group, 2001.

32. *Henriksson J., Ruohomäki K.* Assessing costs of reproduction in mountain birch: the Importance of considering the modular level // Annals of Botany. 2000. Vol. 86. P. 503–510. DOI:10.1006/anbo.2000.1206

33. *Poznyakov V.Y.* The Severonikel smelter complex: history of development // Aeriyal pollution in the Kola Peninsula. Proceedings of the International workshop. Apatity, 1993. P. 16–20.

34. *Evdokimova G.A., Mozgova N.P.* Soil contamination by heavy metals in surroundings of Monchegorsk and recovering after industrial impact / Aerial pollution in Kola Peninsula. Proceedings of the Intranational Workshop, Apatity, 1993. P. 148–152.

35. *Каледа В.М.* Биология плодоношения березы повислой в лесостепных районах Западной Сибири: Автореферат дисс… канд. с/х наук. Красноярск, 1985. 22 с.

36. *Косова Д.П., Василевская Н.В.* Репродуктивное развитие *Betula czerepanovii* Orlova в зоне аэротехногенного воздействия комбината «Печенганикель»// Сохранение биологического разнообразия наземных и морских экосистем в условиях высоких широт. Мурманск: МГПУ, 2009. С. 130–133.

37. *Poljak I., Kajba D., Ljubic I., Idzojtic M.* Morphological variability of leaves of *Sorbus domestica* L. in Croatia// Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2015. Vol. 84. P. 249–259. DOI: 10.5586/asbp.2015.023

38. *Серегин И.В., Кожевникова А.Д.* Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиология растений. 2006. Т. 53. С. 285–308.

39. *Бессонова В.П.* Влияние загрязнения среды тяжелыми металлами на гормональные и трофические факторы в почках кустарничковых растений // Экология. 1993. № 2. С. 21–26.

40. *Turmukhametova N., Shadrina E.* Changes in the Fluctuating Asymmetry of the Leaf and Reproductive Capacity of Betula pendula Roth Reflect Pessimization of Anthropogenically Transformed Environment // Symmetry. 2020. Vol. 12. P. 1970. DOI:10.3390/sym12121970

41. *Karnosky D.F., Berrang P.C., Schilz F., Bennett J.P.* Variation in natural selection for air pollution tolerance in trees // Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations / Scholz F., Gregorius H.-R., Rudin, D. (Eds.). Berlin: Springer Verlag, 1989. P. 29–38.

42. *Hoffman A.A., Parsons P.A.* Evolutionary Genetics and Environmental Stress. New York: Oxford University Press. 1991. 284 p.

43. *Василевская Н.В.* Поливариантность онтогенетических процессов растений в условиях высоких широт. Мурманск: МГПУ, 2007. 230 с.

44. *Василевская Н.В.* Экология растений Арктики. Мурманск: МГПУ, 2014. 187 с.

45. *Похилько А.А.* Сем. *Scrophulariaceae* // Биологическая флора Мурманской области. Апатиты, 1993. С. 81–92.

46. *Mutikainen P., Ojala A.* Simulated herbivory and air pollution: growth and reproduction of an evergreen dwarf shrub *Empetrum nigrum* // Acta Oecologica. 1993. Vol. 14. P. 771–780.

47. *Saikkonen K., Koivunen S., Vuorisalo T., Mutikainen P.* Interactive effects of pollination and heavy metals on resource allocation in *Potentilla anserina* // Ecology. 1998. Vol. 79. P. 1620–1629. DOI: 10.1890/0012-9658(1998)079[1620:IEOPAH]2.0.CO;2

48. *Матвеева Н.В.* Зональность в растительном покрове Арктики. СПб., 1998. 218 с.

Поступила в редакцию 14.06.2021
Принята к публикации 22.07.2021

Об авторе

ВАСИЛЕВСКАЯ Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор, Мурманский арктический государственный университет, 183038, Мурманск, ул. Капитана Егорова, 15, Россия, https://orcid.org/0000-0002-6926-9353, n.v.vasilevskaya@gmail.com.

Информация для цитирования

Василевская Н.В. Поливариантность репродуктивного развития *Betula czerepanovii* Orlova в условиях техногенного стресса // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 100–111. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-100–111

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-100–111

Polyvariance of reproductive development of *Betula czerepanovii* Orlova under the conditions of technogenic stress

N.V. Vasilevskaya

Murmansk Arctic State University, Murmansk, Russia
n.v.vasilevskaya@gmail.com

Abstract. *The aim of the study is to conduct a research on reproductive development of Betula czerepanovii Orlova in the impact zone of the Severonikel plant (Murmansk region). The gross content of heavy metals (Ni, Cu, Pb, Cd) in the soil of test plots is determined by atomic absorption spectrophotometer. Inhibition of the birch trees reproduction is observed only on the technogenic wasteland (3 km from Severonikel) with very high concentrations of nickel (795 mg/kg) and copper (149 mg/kg) in the soil. Significant correlation coefficients between concentration of nickel in the soil and the number of male and female inflorescences of B. czerepanovii are obtained. The number of female catkins, formed under the conditions of chronic pollution by heavy metals, is larger than the number of male catkins. At all test sites, a transition of some birch trees (20–40 %) from monoeciousness to dioecia is demonstrated: a very large number of only male or female catkins is developing on them. Cenopopulations of B. czerepanovii are adapted to pollution in technogenic open woodland (8 km from Severonikel) and defoliating forest (20–30 km) with a decrease of Ni concentration in the soil to several MPC. It is shown that B. czerepanovii is a metal-resistant species. The hypothesis of the polyvariance of development of plants under the conditions of industrial pollution is formulated.*

Keywords: *Betula czerepanovii*, Subarctic, heavy metals, reproduction, polyvariance.

Acknowledgements. *Author expressed deep gratitude to Yulia Mikhaylovna Loskutova, Cand. Sci in Biology, for participation in the studies.*

References

1. *Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L.* Developmental Instability of the Organism as a Result of Pessimization of Environment under Anthropogenic Transformation of Natural Landscapes // Russian Journal of Developmental Biology. 2014. Vol. 45, No. 3. P. 117–126. DOI: 10.1134/S1062360414030059

2. *Kozlov M.V.* Pollution resistance of mountain birch *Betula pubescens* subsp. *czerepanovii* near the copper–nickel smelter: natural selection or phenotypic acclimation // Chemosphere. 2005. Vol. 59. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.010

3. *Kozlov M.V., Haukioja E.* Performance of birch seedlings replanted in heavily polluted industrial barrens of the Kola peninsula, Nortwest Russia // Restoration Ecology. 1999. Vol. 7. P. 145–154. DOI: 10.1046/j.1526-100X.1999.72005.x

4. *Zvereva E.L., Kozlov M.V.* Effects of pollution-induced habitat disturbance on the response of willows to simulated herbivory // Journal of Ecology. 2001. Vol. 89. P. 21–30. DOI: 10.1046/j.1365-2745.2001.00509.x

5. *Chernenkova T.V.* Reaktsiya lesnoy rastitelnosti na promyshlennoe zagryaznenie. Moskva: Nauka. 2002. 191 p.

6. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Reproduction of mountain birch along a strong pollution gradient near Monchegorsk, Northwestern Russia // Environmental Pollution. 2004. Vol. 132. P. 443–451. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.05.018

7. *Zhirov V.K., Golubeva E.I., Govorova A.F., Khaitbaev A.Kh.* Strukturno-funktsionalnye izmeneniya rastitelnosti v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya na Kraynem Severe. Moskva: Nauka, 2007. 162 p.

8. *Eranen J.K.* Rapid evolution towards heavy metal resistance by mountain birch around two subarctic copper – nickel smelters // Journal of Evolutionary Biology. 2008. Vol. 21. P. 492–501. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2007.01491.x

9. *Lyanguzova I.V., Maznaya E.A.* Dinamicheskie trendy populyatsiy *Vaccinium myrtillus* L. v zone vozdeystviya medno-nikelevogo kombinata: rezultaty 20-letnego monitoringa // Ecologiya. 2012. No. 4. P. 261–269.

10. *Vasilevskaya N.V., Lukina Yu.M.* Rost i razvitie drevesnykh rasteniy v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya. Biomonitoring tekhnogennoy sredy. Saarbrucken: Lambert Academic press, 2012. 173 p.

11. *Vasilevskaya N.V., Sidorchuk A.V.* Vozdeystvie promyshlennogo zagryazneniya kombinata Pechenganikel na dinamiku rosta *Sorbus gorodkovii* Pojark // Uchenye zapiski Petrozavodskogo Universiteta. 2018. No. 3. P. 28–35.

12. *Dulya O.V.* Ekologo-geneticheskie mekhanizmy ustoychivosti travyanistykh rasteniy k promyshlennomy zagryazneniyu Ekaterinburga: Diss… kand. biol. nauk. Ekaterinburg, 2015. 212 p.

13. *Macnair M.R.* The evolution of plants in metal-contaminated environments // Environmental Stress, Adaptation and Evolution / eds. Bijlsma R., Loeschcke V. Basel: Verlag, 1997. P. 3–24.

14. *Turner A.P.* The responses of plants to heavy metals // Toxic Metals in Soil-Plant Systems/ eds. Ross S. M. 1994. Chichester: John Wiley & Sons. P. 153–187.

15. *Kozlov M.V., Zvereva E.L.* Does impact of point polluters affect growth and reproduction of herbaceous plants // Water Air Soil Pollution. 2007. Vol. 186. P. 183–194. DOI: 10.1007/s11270-007-9476-z

16. *Eranen J.K., Nilsen J., Zverev V.E., Kozlov M.V.* Mountain birch under multiple stressors – heavy metal-resistant populations co-resistant to biotic stress but maladapted to abiotic stress // Journal of Evolutionary Biology. 2009. Vol. 22. P. 840–851. DOI: 10.1111/j.1420-9101.2009.01684.x

17. *Mengoni A., Gonelli C., Hakvoort H.W.Z., Bazzicalupo M., Gabrielli R., Schat H.* Evolution of copper tolerance and increased expression of a 2 h – type – metallothionein gene in *Silene paradoxa* L. populations // Plant and Soil. 2003. Vol. 254, No. 2. P. 451–457.

18. *Utriainen M.A., Karenlampi L.V., Karenlampi S.O., Schat H.* Differential tolerance to copper and zinc of micropropagated birches tested in hydroponics // New Phytologist. 1997. Vol. 137. P. 543–549. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1997.00840.x

19. *Alekseev A.S., Melnichuk I.A., Trubacheva T.A., Pimenov K.A., Kryukovsky A.S.* Problemy ozeleneniya poselka Nikel Murmanskoy oblasti // Lesnoy vestnik. 2010. No. 1. P. 41–48.

20. *Davies A. A., Perkins W. F., Bowell R.* Geochemical assessment of mine waste cover performance post reclamation at Park mine, Worth Wales // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2016. Vol. 16, No 2. P. 127–136. DOI: 10.1144/geochem2014-320

21. *Howland D.E., Oliver R.P., Davy A.J.* Morphological and molecular variation in natural populations of Betula // New Phytologist. 1995. Vol. 130. P. 117–124. DOI:10.1111/j.1469-8137.1995.tb01821.x

22. *Grime J.P.* Plant Strategies, Vegetation Processes and Ecosystem Properties. New York: John Wiley, 2006. 456 p.

23. *Hemborg A.M., Karlsson P.S.* Somatic costs of reproduction in eight subarctic plant species // Oikos. 1998. Vol. 82. P. 149–157. DOI:10.2307/3546925

24. *Gardiner A.S.* Taxonomy of infraspecific variation in *Betula pubescens* Ehrh., with particular reference to the Scottish Highlands // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences. 1984. Vol. 85. Iss. 1-2. P. 13–26.

25. *Ermakov V.I.* Mekhanizmy adaptatsii berezy k usloviyam Severa. Leningrad: Nauka. 1986. 144 p.

26. *Cherepanov S.K.* Sosudistye rasteniya Rossii i sopredelnykh gosudarstv. Sankt Petersburg: Mir i semya, 1995. 990 p.

27. *Ruohomaki K., Haukioja E., Repka S., Lehtila K.* Leaf value: effect of damage to individual leaves on growth and reproduction of mountain birch shoots // Ecology. 1997. V. 78. P. 2105–2117.

28. *Valkama J., Kozlov M.V.* Variation in fluctuating asymmetry of mountain birch: is cold spring more stressful than pollution? // Journal of Applied Ecology. 2001. Vol. 38. P. 665–673.

29. *Palme A.E.* Evolutionary history and chloroplast DNA variation in plant genera: Betula, Corrylis & Salix. Upsala: Acta Universityes Upsaliensis. 2003. 50 p.

30. *Koropachinskiy Yu.I.* Estestvennaya gibridizatsiya i problemy gibridizatsii berez Severnoy Azii // Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal. 2013. No. 4. P. 459–479.

31. *Nordic* mountain birch ecosystems. Man and the biosphere/ ed. Wiegolaski F. E. Series 27. New York: The Parthenon Publishing Group, 2001.

32. *Henriksson J., Ruohomäki K.* Assessing costs of reproduction in mountain birch: the Importance of considering the modular level // Annals of Botany. 2000. Vol. 86. P. 503–510. DOI:10.1006/anbo.2000.1206

33. *Poznyakov V.Y.* The Severonikel smelter complex: history of development // Aeriyal pollution in the Kola Peninsula. Proceedings of the International workshop. Apatity, 1993. P. 16–20.

34. *Evdokimova G.A., Mozgova N.P.* Soil contamination by heavy metals in surroundings of Monchegorsk and recovering after industrial impact // Aerial pollution in Kola Peninsula. Proceedings of the Intranational Workshop, Apatity, 1993. P. 148–152.

35. *Kaleda V.M.* Biologiya plodonosheniya berezy povisloy v lesostepnykh rayonakh Zapadnoy Sibiri: Avtoreferat diss… kand. selskokhoz. nauk. Krasnoyarsk. 1985. 22 p.

36. *Kosova D.P., Vasilevskaya N.V.* Reproduktivnoe razvitie *Betula czerepanovii* Orlova v zone aerotekhnogennogo vozdeystviya kombinata Pechenganikel // Sokhranenie biologicheskogo raznoobraziya nazemnykh i morskikh ecosystem v usloviyakh vysokikh shirot. Murmansk: MGPU. 2009. P. 130 – 133.

37. *Poljak I., Kajba D., Ljubic I., Idzojtic M.* Morphological variability of leaves of *Sorbus domestica* L. in Croatia// Acta Societatis Botanicorum Poloniae. 2015. Vol. 84. P. 249–259. DOI: 10.5586/asbp.2015.023

38. *Seregin I.V., Kozhevnikova A.D.* Fiziologicheskaya rol' nikelya i ego toksicheskoe deystvie na vysshie rasteniya // Fiziologiya rasteniy. 2006. Vol. 53. P. 285–308.

39. *Bessonova V.P.* Vliyanie zagryazneniya sredy tyazhelymi metallami na gormonalnye i troficheskie faktory v pochkakh kustarnikovykh rasteniy // Ekologiya. 1993. No. 2. P. 21–26.

40. *Turmukhametova N., Shadrina E.* Changes in the Fluctuating Asymmetry of the Leaf and Reproductive Ca-

pacity of Betula pendula Roth Reflect Pessimization of Anthropogenically Transformed Environment // Symmetry. 2020. Vol. 12. P. 1970. DOI:10.3390/sym12121970

41. *Karnosky D.F., Berrang P.C., Schilz F., Bennett J.P.* Variation in natural selection for air pollution tolerance in trees // Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations / Scholz F., Gregorius H.-R., Rudin, D. (Eds.). Berlin: Springer Verlag, 1989. P. 29–38.

42. *Hoffman A.A., Parsons P.A.* Evolutionary Genetics and Environmental Stress. New York: Oxford University Press. 1991. 284 p.

43. *Vasilevskaya N.V.* Polivariantnost ontogeneticheskikh protsessov v usloviyakh vysokikh shirot. Murmansk: MGPU. 2007. 230 p.

44. *Vasilevskaya N.V.* Ekologiya rasteniy Arktiki. Murmansk: MGPU. 2014. 187 p.

45. *Pokhilko A.A.* Semeystvo *Scrophulariacea* // Biologicheskaya flora Murmanskoy oblasti. Apatity, 1993. P. 81–92.

46. *Mutikainen P., Ojala A.* Simulated herbivory and air pollution: growth and reproduction of an evergreen dwarf shrub *Empetrum nigrum* // Acta Oecologica. 1993. Vol. 14. P. 771–780.

47. *Saikkonen K., Koivunen S., Vuorisalo T., Mutikainen P.* Interactive effects of pollination and heavy metals on resource allocation in *Potentilla anserina* // Ecology. 1998. Vol. 79. P. 1620–1629. DOI: 10.1890/0012-9658(1998)079[1620:IEOPAH]2.0.CO;2

48. *Matveeva N.V.* Zonalnost v rastitelnom pokrove Arktiki. Sankt Petersburg. 1998. 218 p.

About the author

VASILEVSKAYA, Natalia Vladimirovna, Dr. Sci. (Biology), professor, Murmansk Arctic State University, 15 Captain Egorov st., Murmansk, 183038, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-6926-9353, n.v.vasilevskaya@gmail.com.

Citation

Vasilevskaya N.V. Polyvariance of the reproductive development of *Betula czerepanovii* Orlova under the conditions of technogenic stress // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 100–111. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-100–111

УДК 631.535.6:633.491:631.147
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-112–119

Рост микрочеренков картофеля *in vitro* при действии мультиконверсионного биопрепарата «Эмбиота»

Г.В. Филиппова*, В.Г. Дарханова, Н.С. Строева

Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия
**nureeva@yandex.ru*

Аннотация. *Представлены результаты исследования влияния мультиконверсионного биопрепарата «Эмбиота», полученного с использованием 5 штаммов-продуцентов, выращенных на отработанном соломенном субстрате вешенки, на рост и развитие в условиях in vitro микрочеренков растений-регенерантов картофеля сорта 'Розара'. Биопрепарат вносили в концентрациях 2,5, 5, 10, 25, 50 и 100 мл/л в питательную среду, содержащую элементы по прописи Мурасиге–Скуга, с полным и половинным составом солей. Показано, что при доступности минерального питания биопрепарат во всем диапазоне исследуемых концентраций не оказывал влияния на морфологические показатели вегетативных органов. Вместе с тем, в варианте 2,5 мл/л отмечено увеличение в 1,3–1,4 раза воздушно-сухой массы надземных органов, а при 100 мл/л снижение в 1,2–1,3 раза этого показателя по сравнению с контролем. В условиях недостаточного питания ростостимулирующий эффект проявляли варианты 5 и 10 мл/л. Установлено превышение в 1,3–1,5 раза контрольных уровней по показателям числа побегов и листьев. Концентрация 10 мл/л также оказывала наилучшее действие на формирование корневой системы. Отмечено ингибирующее влияние на морфометрические показатели растений и их фитомассу при внесении биопрепарата в высоких концентрациях 50 и/или 100 мл/л, что особенно выражено при недостатке питания. Таким образом, полученные результаты исследований показали дозозависимое влияние биопрепарата «Эмбиота» на рост и развитие растений. С точки зрения применения в качестве ростостимулирующих и способствующих повышению продуктивности могут быть использованы концентрации 2,5–10 мл/л.*

Ключевые слова: отходы грибоводства, мультиконверсионный препарат, микрочеренки картофеля, *in vitro*, морфометрические показатели, фитомасса.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках госзадания Института биологических проблем криолитозоны СО РАН на 2017–2020 № АААА-А17-117020110056-0 «Фундаментальные и прикладные аспекты изучения разнообразия растительного мира Северной и Центральной Якутии».*

Коллектив авторов выражает благодарность индивидуальному предпринимателю Ефремову А. А. за развитие грибоводства в условиях Центральной Якутии.

Введение

В условиях бурно развивающейся отрасли производства по выращиванию грибов с использованием различных субстратов, дающей большие объемы отходов в виде полуперепревших органических материалов, особую актуальность приобретает налаживание безотходного производства, способного минимизировать загрязнение окружающей среды и финансовые затраты на утилизацию [1, 2]. На сегодня исследований по использованию отработанного субстрата грибоводства и его переработки крайне мало. В работе [1] показано, что внесение в почву в качестве органического удобрения перепревшего отработанного соломенного субстрата, дополнительно прошедшего ферментацию в течение 2–3 месяцев, оказало положительное влияние на урожайность огурца, а его использование в качестве компонента рассадного грунта вызывало улучшение биометрических показателей роста и развития овощных культур. Также авторы отмечали перспективность использования отработанного субстрата на основе подсолнечной лузги в качестве мульчи. Вместе с тем, высказывается предположение о том, что в сочетании с дополнительным внесением минеральных удобрений, гуматов и др. возможно достижение наибольшей эффективности. В исследовании [3] оценивали действие в органическом земледелии мультиконверсионного биопрепарата на основе двух полифункциональ-

© Филиппова Г.В., Дарханова В.Г., Строева Н.С., 2021

ных штаммов микроорганизмов, выращенных на продукте биоконверсии шиитаке, – дубовых опилок и пшеничных отрубей. Показана возможность использования отработанного грибного субстрата для культивирования штаммов-продуцентов, обеспечивающих био-, ростостимулирующие и дозозависимые защитные эффекты.

Технологии на основе эффективных микроорганизмов достаточно перспективны с точки зрения оптимизации минерального питания растений, восстановления плодородия почв, агроэкологии и др. Использование различных штаммов-продуцентов позволяет воспроизводить природоподобные процессы по высвобождению из органики биодоступных водорастворимых минеральных соединений, а также способствует устранению патогенной микрофлоры [4–6]. Известно, что химический состав стеблей растений и грибов включает различные макро- и микроэлементы, полисахариды, белки, жирные кислоты, биоактивные компоненты [7]. Эффективность таких препаратов на основе отходов грибоводства также может быть обусловлена содержанием комплекса биодоступных соединений и минералов, полученных из отработанного грибного субстрата, мицелия и плодовых тел грибов.

Цель работы – исследовать влияние коммерческого мультиконверсионного биоудобрения «Эмбиота», полученного с использованием 5 штаммов-продуцентов, выращенных на отработанном соломенном субстрате вешенки, на рост и развитие микрочеренков картофеля сорта ‘Розара’ *in vitro* при различных условиях минерального питания.

Материалы и методы

Эксперимент по выращиванию растений проводили в двух сериях, различающихся по концентрации минеральных соединений в питательной среде. В первой серии использовали сбалансированную агаризованную питательную среду по прописи Мурасиге–Скуга (MS) [8]. Во второй для моделирования недостатка минерального питания использовали эту же среду с половинным составом солей микро- и макроэлементов (1/2 MS). Мультиконверсионный биопрепарат «Эмбиота» полученный на основе пяти штаммов микроорганизмов, выращенных на продукте биоконверсии соломенного субстрата в процессе выращивания вешенки, был предоставлен производителем (ИП А.А. Ефремов, г. Якутск). В составе данного препарата содержится азот – 0,56 %, фосфор – 0,35 %, калий – 0,39 %, полигуматы, микроорганизмы и др. Внесение в питательную среду биопрепарата, имеющего жидкую консистенцию, осуществляли в концентрациях 2,5, 5, 10, 25, 50 и 100 мл/л. Работа в асептических условиях, приготовление и стерилизация питательных сред были проведены согласно общепринятым приемам и рекомендациям [9, 10].

Объектом исследования служили асептические растения-регенеранты картофеля сорта «Розара». В качестве контроля были растения, выращенные на средах MS и 1/2 MS соответствующей серии, и вариант, дополненный индолилуксусной кислотой (ИУК) в концентрации 1 мг/л. Микрочеренки изолировали так, чтобы каждый черенок имел одно междоузлие с листом, а их размер составлял 0,8–1,0 см. Микрочеренки помещали в индивидуальные биологические пробирки, для каждого варианта формировали группу из 12 шт. Развитие микрочеренков проходило в контролируемых условиях при 16-часовом световом периоде, постоянной температуре 24–25 °С, освещенности 3000 люкс и влажности 70 %. Длительность культивирования составляла 60 сут.

По окончании сроков культивирования сформированные растения аккуратно извлекали из пробирок, корневую систему тщательно отмывали от остатков питательной среды и обсушивали фильтровальной бумагой. Далее оценивали линейные размеры главного побега и корня, число побегов, листьев и корней. Воздушно-сухую массу растений определяли весовым методом после высушивания растений до постоянной массы при температуре и влажности лабораторного помещения. Математическую обработку полученных данных проводили с учетом общепринятых методических указаний по биологической статистике [11]. Результаты экспериментов представлены в виде средней арифметической (M) и ее стандартной ошибки (±SEM). Статистическую значимость различий определяли с использованием критерия Даннета для множественного сравнения при уровне значимости $p \leq 0{,}05$. Расчет проводили с помощью пакета StatPlus v.2007 (AnalystSoft Inc., Германия).

Результаты и обсуждение

Для микроклонального размножения картофеля, как правило, используется питательная среда MS [12, 13]. Введение в среду различных стимуляторов роста позволяет активизировать ростовые процессы. Для этих целей достаточно

часто применяется фитогормон с высокой физиологической активностью – индолилуксусная кислота (ИУК) [14]. В этой связи в качестве контролей служили растения, развивающиеся на безгормональной среде MS и среде, дополненной ИУК в концентрации 1 мг/л. При оценке влияния среды произрастания наряду с оценкой морфологических признаков также принимается во внимание фитомасса растений, характеризующая протекание процессов, направленных на синтез органических веществ, обеспечивающих рост и развитие растений. Результаты исследований показали, что в условиях сбалансированного микро- и макроэлементного питания во всех вариантах исследуемые морфометрические показатели растений имели близкие значения (табл. 1). Вместе с тем, были отмечены некоторые различия в варианте сравнения с использованием ИУК, отражающие влияние экзогенного фитогормона. Сформировавшиеся растения характеризовались более компактными размерами побегов (длина в 1,2 раза меньше) и развитой корневой системой (масса в 1,5 раза больше), чем в варианте MS (см. табл. 1 и 2). Это обстоятельство отразилось на соотношении надземной части и подземной, характеризующем продуктивность растений, что выражалось в его уменьшении и указывало на выраженную корневую продуктивность по сравнению с MS (табл. 2).

Использование мультиконверсионного биопрепарата «Эмбиота» в диапазоне концентраций 2,5–100 мг/л также имело ряд особенностей. Только в варианте 2,5 мл/л отмечено увеличение в 1,3 раза фитомассы побегов на фоне не различающихся морфометрических показателей, что, соответственно, увеличило в 1,2 раза расчетное соотношение надземной к подземной массе относительно варианта MS. В больших концентрациях (25–100 мл/л) биопрепарат оказывал влияние на количество образовавшихся корней (без ущерба их массе, кроме варианта 100 мл/л). Число сформировавшихся корней было в 1,4–1,6 раза меньше, чем в вариантах MS и MS, дополненной ИУК (табл. 1 и 2).

Проведенные исследования во второй серии эксперимента в условиях недостаточного минерального питания показали, что в данных условиях формируются более вытянутые растения с большим числом побегов и листьев и низкой вегетативной массой (табл. 3 и 4). В целом, это приводило к снижению числового значения продуктивности, чем в MS (см. табл. 2 и 4).

Таблица 1

Средние морфометрические показатели растений-регенерантов картофеля «Розара», культивируемых на среде Мурасиге–Скуга (MS)

Table 1

Average morphometric parameters of the «Rozara» potato regenerant plants cultivated on Murashige–Skoog (MS) medium

Вариант/ Variant	Длина главного побега, см/ Main shoot length, cm	Число побегов, шт./ Number of shoots	Число листьев, шт./ Number of leaves	Длина корня, см/ Root length, cm	Число корней, шт./ Number of roots
MS	11,3±1,4[a]	2,6±0,6[a]	19,7±3,8 [a]	7,8±1,5 [a]	4,7±0,9 [a]
MS+ИУК 1мг/л/ MS+ IAA 1 mg/l	9,1±0,6[b]	2,2±0,4 [a]	16,2±2,7 [a]	8,7±1,3 [a]	4,6±0,6 [a]
Эмбиота, мл/л [Embiota, ml/l]					
2,5	12,1±1,3[a]	2,3±0,3 [a]	20,0±1,7 [a]	8,5±1,2 [a]	3,9±0,5 [a]
5,0	10,7±0,8[ab]	2,3±0,2 [a]	19,4±0,9 [a]	8,8±1,0 [a]	3,6±0,4 [a]
10,0	10,7±0,9[ab]	2,4±0,3 [a]	19,3±1,3 [a]	8,4±1,1 [a]	4,0±0,4 [a]
25,0	11,2±1,1[a]	2,3±0,5 [a]	20,7±2,4 [a]	7,5±1,3 [a]	3,3±0,3[b]
50,0	11,1±1,2 [a]	2,2±0,6 [a]	18,8±3,1 [a]	8,3±0,9 [a]	3,4±0,3 [b]
100,0	11,0±1,1[a]	2,7±0,7 [a]	19,4±3,3 [a]	7,3±1,3 [a]	3,0±0,4 [b]

[a, b] – в каждом столбце разными буквами обозначены достоверно различающиеся значения ($p \leq 0,05$, ANOVA, критерий Даннета).

[a, b] – in each column, different letters denote significantly different values ($p \leq 0.05$, ANOVA, Dannet criterion).

Таблица 2

Воздушно-сухая масса (мг) растений-регенерантов картофеля, культивируемых на среде Мурасиге–Скуга (MS)

Table 2

Air-dry weight (mg) of potato regenerant plants cultivated on the Murashige–Skuga medium (MS)

Вариант/ Variant	Масса надземной части/ Mass of aboveground parts of plants	Масса корней/ Root mass	Отношение надземной/ подземной массы/ The ratio of aboveground and underground mass
MS	30±2[a]	8±1[a]	3,8±0,1[a]
MS+ИУК 1мг/л/ MS+IAA 1 mg/l	32±1[a]	12±2[b]	2,7±0,3[b]
Эмбиота, мл/л Embiota, ml/l			
2,5	41±3[b]	9±2[ab]	4,6±0,4[c]
5,0	34±2[a]	8±2 [ab]	4,3±0,5[a]
10,0	31±3[a]	10±2[ab]	3,1±0,3[b]
25,0	33±2[a]	9±3[ab]	3,7±0,3[a]
50,0	28±2[a]	8±3[ab]	3,5±0,2[a]
100,0	25±2[c]	7±1[a]	3,6±0,3[a]

[a, b, c] – в каждом столбце разными буквами обозначены достоверно различающиеся значения ($p \leq 0,05$, ANOVA, критерий Даннета).

[a, b, c] – in each column, different letters denote significantly different values ($p \leq 0.05$, ANOVA, Dannet criterion).

Таблица 3

Средние морфометрические показатели растений-регенерантов картофеля «Розара», культивируемых на среде Мурасиге–Скуга с половинным составом микро- и макроэлементов (½ MS)

Table 3

Average morphometric parameters of potato regenerant plants «Rozara» cultivated on Murashige–Skoog medium with a half composition of micro- and macro-elements (½ MS)

Вариант/ Variant	Длина главного побега, см./ Main shoot length, cm	Число побегов, шт./ Number of shoots	Число листьев, шт./ Number of leaves	Длина корня, см./ Root length, cm.	Число корней, шт./ Number of roots
½ MS	15,2±0,5[a]	3,5±0,4[a]	33,4±4,6[a]	8,1±0,9[a]	4,4±0,7[a]
½MS+ИУК 1мг/л/ ½MS+IAA 1 mg/l	13,9±0,6[b]	3,4±0,5[a]	34,1±3,6[a]	12,1±0,5[b]	5,2±0,6[a]
Эмбиота, мл/л Embiota, ml/l					
2,5	13,3±1,5[ab]	4,0±0,8 [a]	27,7±4,5[a]	8,2±1,1[a]	3,2±0,5[a]
5,0	14,7±0,7[ab]	5,2±0,8[b]	49,4±8,5[b]	9,5±1,4[a]	4,9±0,6[a]
10,0	13,9±1,2[ab]	5,0±0,5[b]	42,7±3,3[b]	10,9±0,8[b]	5,3±0,6[a]
25,0	15,4±0,5[ab]	3,9±0,4[a]	33,2±2,2[a]	11,7±1,5[b]	4,2±0,5[a]
50,0	11,9±1,0[c]	2,6±0,3[c]	24,1±3,2[c]	9,3±0,8[a]	3,6±0,5[a]
100,0	8,3±1,1[d]	1,3±0,1[d]	13,8±1,2[d]	7,6±0,5[a]	2,2±0,3[b]

[a, b, c, d] – в каждом столбце разными буквами обозначены достоверно различающиеся значения ($p \leq 0,05$, ANOVA, критерий Даннета).

[a, b, c, d] – in each column, different letters denote significantly different values ($p \leq 0.05$, ANOVA, Dannet criterion).

Таблица 4

Воздушно-сухая масса (мг) растений-регенерантов картофеля, культивируемых на среде Мурасиге–Скуга с половинным составом микро- и макроэлементов (½ MS).

Table 4

Air-dry weight (mg) of potato regenerant plants cultivated on Murashige–Skuga medium with a half composition of micro- and macroelements (½ MS)]

Вариант/ Variant	Масса надземной части / Mass of aboveground parts of plants	Масса корней/ Root mass	Отношение надземной/подземной массы / The ratio of aboveground and underground mass
½ MS	23±2[a]	14±2[a]	1,6±0,1[a]
½MS+ИУК 1мг/л / ½MS+IAA 1 mg/l	28±2[b]	27±4[b]	1,0±0,2[b]
Эмбиота, мл/л Embiota, ml/l			
2,5	20±4[a]	11±4[a]	1,8±0,2[a]
5,0	31±2[b]	18±3[a]	1,7±0,1[a]
10,0	29±3[b]	20±2[b]	1,5±0,1[a]
25,0	22±2[a]	14±2[a]	1,6±0,2[a]
50,0	18±2[c]	10±3[a]	1,8±0,2[a]
100,0	7±1[d]	3±1[c]	2,3±0,3[c]

[a, b, c, d] – в каждом столбце разными буквами обозначены достоверно различающиеся значения ($p \leq 0,05$, ANOVA, критерий Даннета).

[a, b, c, d] – in each column, different letters denote significantly different values ($p \leq 0.05$, ANOVA, Dannet criterion).

Анализ морфологических изменений в этой группе растений выявил стимулирующее действие концентраций 5 и 10 мл/л биопрепарата, при которых зафиксировано достоверное превышение контрольного уровня (½ MS) по показателям числа побегов и листьев (см. табл. 3), а при 50 и 100 мл/л, наоборот, ингибирующее. Концентрации 10 и 25 мл/л оказывали действие на формирование корневой системы, сравнимое с вариантом, дополненным ИУК, а именно вызывали увеличение длины корней. Сильное угнетение корневой системы отмечено при воздействии самой большой концентрации биопрепарата (100 мл/л), что выражалось в малом количестве сформировавшихся корней и их низкой массе (см. табл. 3 и 4). Следует отметить, что в диапазоне 2,5–25 мл/л опытных концентраций длина побега и число корней не отличались от контролей. В целом зеленая и корневая массы растений опытных вариантов соответствовали их линейным размерам. Показано, что в данных экспериментальных условиях значение такого показателя, как соотношение надземной к подземной массе в опытных вариантах 2,5–25 мл/л, достоверно не отличалось от безгормонального контроля.

В работе [15] отмечено, что поглощение элементов растениями может значительно различаться в зависимости от качества почвы. При произрастании на более плодородных почвах наибольшее содержание марганца, меди и цинка обнаруживали в корнях растений, а на обедненных почвах – в тканях побегов. Сначала была выдвинута, а позднее подтверждена [16] гипотеза о влиянии стресса на различие в накоплении элементов органами растений. Кроме того, в исследовании авторы не выявили влияния стимуляторов роста на биомассу растений, произрастающих на песчаных почвах, что, вероятно, обусловлено особенностями действия исследуемых препаратов. Наши результаты указывают на то, что биопрепарат «Эмбиота» в определенных концентрациях может оказывать положительное влияние на уровень возможного стресса растений, произрастающих на обедненных почвах, что подтверждается более выраженным дозозависимым эффектом на рост и развитие растений картофеля, чем в условиях доступности макро- и микроэлементов.

Заключение

Таким образом, применение препарата «Эмбиота» оказывало дозозависимое влияние на рост и развитие микрочеренков картофеля «Розара» в условиях культуры *in vitro*. Отмечено стимулирующее действие данного препарата в низких кон-

центрациях (2,5–10 мл/л). Причем в условиях сбалансированного содержания микро- и макроэлементов в составе питательной среды наиболее эффективной концентрацией, вызывающей повышение продуктивности надземных органов, была 2,5 мл/л, а при недостатке минерального питания – концентрации 5 и 10 мл/л. Наряду с более высоким темпом роста побегов последняя (10 мл/л) также вызывала интенсивный рост и развитие корневой системы растений-регенерантов картофеля по сравнению с безгормональным контролем. Высокие концентрации 50 и/или 100 мл/л обладали ингибирующим действием, что особенно выражено при недостатке питания. Полученные результаты исследований подтверждают возможность применения определенных концентраций мультиконверсионного препарата «Эмбиота» в качестве ростостимулирующего биопрепарата. При этом внесение биопрепарата в среду для культивирования растений в условиях ограниченного питания не может выступать в качестве альтернативы полноценному минеральному питанию.

Литература

1. *Иванов А.И., Корягин Ю.В., Анохин Р.В.* Использование отработанного субстрата в качестве органического удобрения – важнейшее звено безотходной технологии выращивания грибов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2015. № 5 (27). С. 120–128.

2. *Валиев М.М., Тухватуллин Р.А.* Модель безотходного высокодоходного сельскохозяйственного предприятия с применением биотехнологий // Аграрный вестник Урала. 2010. № 3(69). С. 41–43.

3. *Титова Ю.А., Краснобаева И.Л.* Мульконверсионные биопрепараты для защиты растений и возможности их использования в органическом земледелии // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2(99). С. 164–183. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10161

4. *Мотина Т.Ю., Дегтярева И.А., Давлетшина А.Я., Яппаров И.А., Алиев Ш.А., Бабынин Э.В.* Биоудобрения комплексного действия на основе консорциума микроорганизмов и наноструктурных агроминералов для получения экологически безопасной продукции растениеводства // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20, № 12. С. 122–126.

5. *Шаблин П.А.* Применение ЭМ-технологии в сельском хозяйстве. Сборник трудов: Микробиологические препараты «Байкал ЭМ1», «Тамир». М., 2006. С. 23–36.

6. *Евсеева Е.А.* Биотехнологические приемы получения экологически чистой высококачественной продукции (на примере технологии эффективных микроорганизмов) // Аграрный вестник приморья. 2018. № 3(11). С. 35–38.

7. *Кароматов И.Д., Саломова М.Ф.* Медицинское значение грибов вешенки // Биология и интегративная медицина. 2017. № 9. С. 78–88.

8. *Murashige T., Skoog F.* A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue cultures // Physiologia Plantarum. 1962. Vol. 15. P. 473–476.

9. *Бутенко Р.Г.* Культура изолированных тканей и физиология морфогенеза растений. М.: Наука, 1964. 272 с.

10. *Калинин Ф.Л., Сарнацкая В.В., Полищук В.Е.* Методы культуры тканей в физиологии и биохимии растений. Киев: Наукова думка, 1980. 320 с.

11. *Зайцев Г.Н.* Математический анализ биологических данных. М., 1991. 183 с.

12. *Vinterhalter D., Dragievi I., Vinterhalter B.* Potato *In Vitro* Culture Techniques and Biotechnology // Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology. 2008. Vol. 2 (1). P. 16–45.

13. *Fawzia Abo-Sria Ebad, Marwa El-Sebai Abd El-sadek, El-Kazzaz A.A.* Micropropagation of four potato cultivars *in vitro* // Academia Journal of Agricultural Research. 2015. Vol. 3(9). Pp. 184–188. DOI: 10.15413/ajar.2015.0145

14. *Fu S.F., Wei J.Y., Chen H.W., Liu Y.Y., Lu H.Y., Chou J.Y.* Indole-3-acetic acid: A widespread physiological code in interactions of fungi with other organisms // Plant Signal Behav. 2015. Vol. 10(8). P. e1048052. DOI: 10.1080/15592324.2015.1048052

15. *Nebeska D., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trögl J., Shapoval P. et al.* Impact of plant growth regulators and soil properties on *Miscanthus x giganteus* biomass parameters and uptake of metals in military soils // Reviews on Environmental Health. 2019. Vol. 34(3). P. 283–291. DOI: 10.1515/reveh-2018-0088.

16. *Malinska H., Pidlisnyuk V., Nebeska D., Erol A., Medzova A., Trögl J.* Physiological Response of *Miscanthus x giganteus* to Plant Growth Regulators in Nutritionally Poor Soil // Plants (Basel) 2020. Vol. 9(2). P. 194. DOI: 10.3390/plants9020194.

Поступила в редакцию 23.11.2020
Принята к публикации 15.06.2021

Об авторах

ФИЛИППОВА, Галина Валерьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, 677980, пр. Ленина, 41, Россия, http://orcid.org/0000-0002-2024-6062, nureeva@yandex.ru;

ДАРХАНОВА, Валентина Гаврильевна, инженер-исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, 677980, пр. Ленина, 41, Россия,
http://orcid.org/0000-0002-8789-5147, darhana@mail.ru;

СТРОЕВА, Наталья Семеновна, инженер исследователь, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, 677980, пр. Ленина, 41, Россия,
http://orcid.org/0000-0003-2803-4440, natali.stroeva.62@mail.ru.

Информация для цитирования

Филиппова Г.В., Дарханова В.Г., Строева Н.С. Рост микрочеренков картофеля *in vitro* при действии мультиконверсионного биопрепарата «Эмбиота» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 112–119. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-112–119

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-112–119

The growth of potato micro-stalks *in vitro* under the action of multiconversion biopreparation Embiota

G.V. Filippova*, V.G. Darkhanova, N.S. Stroeva

Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, Yakutsk, Russia
**nureeva@yandex.ru*

Abstract. *Results of the investigation into the effect of multiconversion biopreparation Embiota, obtained using five producing strains grown on the exhausted straw substrate of the oyster mushroom, on in vitro growth and development of micro-stalks of regenerant potato plants of «Rozara» are presented. The biopreparation was introduced in the concentrations of 2.5; 5; 10; 25; 50 and 100 mL/L into the growth medium containing the elements according to Murashige and Skoog formulation, with the full and half salt compositions. It is demonstrated that in the case of the availability of mineral nutrition, the biopreparation had no effect on the morphological parameters of vegetative organs within the whole range of studied concentrations. At the same time, in the version with 2.5 mL/L, an increase in the air-dry mass of above-ground organs by a factor of 1.3–1.4 was detected, while in the version with 100 mL/L this parameter exhibited a decrease by a factor of 1.2–1.3 in comparison with the reference. Under the conditions of insufficient nutrition, the growth-stimulating effect was registered in the versions with 5 and 10 mL/L. An increase in the parameters characterizing the number of shoots and leaves by a factor of 1.3–1.5 over the reference was detected. The concentration of 10 mL/L also has the best effect on the formation of the root system. Inhibiting action on the morphometric parameters of plants and their phytomass was detected after the introduction of the biopreparation in high concentrations 50 and/or 100 mL/L, which was especially clearly shown in the case when nutrition was insufficient. So, the results of the studies showed dose-dependent effect of «Embiota» biopreparation on the growth and development of plants. From the viewpoint of application for growth stimulation and for enhancement of productivity, the concentrations 2.5–10 mL/L may be used.*

Keywords: wastes from mushroom growing, multiconversion preparation, potato microstalks, *in vitro*, morphometric parameters, phytomass.

Acknowledgements. *The research was carried out within the State Assignment for the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS for 2017–2020 «Fundamental and Applied Aspects of the Studies of the Diversity of the Plant Community of Northern and Central Yakutia» (No. AAAA-A17-117020110056-0).*

References

1. *Ivanov A.I., Koryagin Yu.V., Anokhin R.V.* Ispol'zovanie otrabotannogo substrata v kachestve organicheskogo udobreniya – vazhneyshee zveno bezotkhodnoy tekhnologii vyrashchivaniya gribov // XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus. 2015. No. 5 (27). P. 120–128.

2. *Valiev M.M., Tukhvatullin R.A.* Model' bezotkhodnogo vysokodokhodnogo sel'skokhozyay-stvennogo predpriyatiya s primeneniem biotekhnologiy // Agrarnyy vestnik Urala. 2010. No. 3(69). P. 41–43.

3. *Titova Yu.A., Krasnobaeva I.L.* Mul'konversionnye biopreparaty dlya zashchity raste-niy i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya v organicheskom zemledelii // Tekhnologii i tekh-nicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva. 2019. No. 2(99). P. 164–183. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10161

4. *Motina T.Yu., Degtyareva I.A., Davletshina A.Ya., Yapparov I.A., Aliev Sh.A., Babynin E.V.* Bioudobreniya kompleksnogo deystviya na osnove konsortsiuma mikroorganizmov i nanostrukturnykh agromineralov dlya polucheniya ekologicheski bezopasnoy produktsii rastenievodstva // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 20, No. 12. P. 122–126.

5. *Shablin P.A.* Primenenie EM – tekhnologii v sel'skom khozyaystve. Sbornik trudov: Mikrobiologicheskie preparaty «Baykal EM1», «Tamir». M., 2006. P. 23–36.

6. *Evseeva E.A.* Biotekhnologicheskie priemy polucheniya ekologicheski chistoy vysokokachestvennoy produktsii (na primere tekhnologii effektivnykh mikroorganizmov) // Agrarnyy vestnik primor'ya. 2018. No. 3(11). P. 35–38.

7. *Karomatov I.D., Salomova M.F.* Meditsinskoe znachenie gribov veshenki // Biologiya i integrativnaya meditsina. 2017. No. 9. P. 78–88.

8. *Murashige T., Skoog F.* A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue cultures // Physiologia Plantarum. 1962. Vol. 15. P. 473–476.

9. *Butenko R.G.* Kul'tura izolirovannykh tkaney i fiziologiya morfogeneza rasteniy. M: Nauka, 1964. 272 p.

10. *Kalinin F.L., Sarnatskaya V.V., Polishchuk V.E.* Metody kul'tury tkaney v fiziologii i biokhimii rasteniy. Kiev: Naukova dumka, 1980. 320 p.

11. *Zaytsev G.N.* Matematicheskiy analiz biologicheskikh dannykh. M., 1991. 183 p.

12. *Vinterhalter D., Dragievi I., Vinterhalter B.* Potato *In Vitro* Culture Techniques and Biotechnology // Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology. 2008. Vol. 2 (1). P. 16–45.

13. *Fawzia Abo-Sria Ebad, Marwa El-Sebai Abd El-sadek, El-Kazzaz A.A.* Micropropagation of four potato cultivars *in vitro* // Academia Journal of Agricultural Research. 2015. Vol. 3(9). Pp. 184–188. DOI: 10.15413/ajar.2015.0145

14. *Fu S.F., Wei J.Y., Chen H.W., Liu Y.Y., Lu H.Y., Chou J.Y.* Indole-3-acetic acid: A widespread physiological code in interactions of fungi with other organisms // Plant Signal Behav. 2015. Vol. 10(8). P. e1048052. DOI: 10.1080/15592324.2015.1048052

15. *Nebeska D., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trögl J., Shapoval P. et al.* Impact of plant growth regulators and soil properties on *Miscanthus x giganteus* biomass parameters and uptake of metals in military soils // Reviews on Environmental Health. 2019. Vol. 34(3). P. 283–291. DOI: 10.1515/reveh-2018-0088.

16. *Malinska H., Pidlisnyuk V., Nebeska D., Erol A., Medzova A., Trögl J.* Physiological Response of *Miscanthus x giganteus* to Plant Growth Regulators in Nutritionally Poor Soil // Plants (Basel) 2020. Vol. 9(2). P. 194. DOI: 10.3390/plants9020194.

About the authors

FILIPPOVA, Galina Valeryevna, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina st., Yakutsk 677980, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-2024-6062, nureeva@yandex.ru;

DARKHANOVA, Valentina Gavrilyevna, research engineer, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina st., Yakutsk 677980, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-8789-5147, darhana@mail.ru;

STROEVA, Natalya Semenovna, research engineer, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina st., Yakutsk 677980, Russia,
http://orcid.org/0000-0003-2803-4440, natali.stroeva.62@mail.ru.

Citation

Filippova G.V., Darkhanova V.G., Stroeva N.S. The growth of potato micro-stalks *in vitro* under the action of multiconversion biopreparation Embiota // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 112–119. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-112–119

Биологические ресурсы

УДК 577.13+615.322+604+616.24-002.5+578.7+578.831.31
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-120–135

Биопрепарат из природного северного биосырья и возможности его использования при профилактике, лечении и на этапе ремиссии после перенесенных бактериальных и вирусных инфекций, включая COVID-19

Б.М. Кершенгольц[1,*], М.М. Шашурин[1,2], С.С. Слепцова[2], М.К. Винокурова[3], О.Н. Колосова[1]

[1]*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия*
[2]*Медицинский институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*
[3]*Научно-практический центр «Фтизиатрия», Якутск, Россия*

**kerschen@mail.ru*

Аннотация. *В рамках проспективного исследования изучено и обосновано применение природного биопрепарата «Бетукладин» в качестве дополнительного средства в комплексной терапии: хронического вирусного гепатита В с дельта-агентом (ХВГ В+Д), деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью (ДТЛ МШЛУ), а также в целях профилактики и реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме. Экспериментальные выборки составили 14, 23, 165 и 196 человек соответственно; контрольные – 217 человек. Бетукладин – капсулированный ультрадисперсный порошок, содержащий комплекс лишайниковых β-олигосахаридов с фармаконами, образующийся при совместной механохимической активации слоевищ лишайников рода Cladonia и бетулина из коры березы, обладает противовирусной, иммуномодуляторной, антикоагуляционной, антибактериальной, гепатопротекторной, антигипоксантной, гиполипидемической, детоксикационной активностью. Комплекс лишайниковых биоактивных веществ и бетулин ранее прошли стадии токсикологических, доклинических и, при ряде патологий, клинических испытаний как биоактивные добавки (БАД) «Ягель-Детокс» и «Бетулин». Применение биопрепарата повысило эффективность комплексного лечения больных ХВГ В+Д: отмечены статистически значимые повышение уровня общего белка и альбумина, снижение цитолиза гепатоцитов, нормализация уровней лейкоцитов, тромбоцитов и гемоглобина, улучшение общего самочувствия, качества сна, трудоспособности. Клинические испытания «Бетукладина» во фтизиатрии показали его высокую эффективность в лечении ДТЛ МШЛУ: отмечено уменьшение выраженности симптомов интоксикации у 100 % пациентов; прекращение бактериовыделения, закрытие полостей распада, клиническое излечение туберкулеза – у 87–78 % (контроль – 60 и 40 % соответственно). Печеночные биохимические показатели улучшились на 12–32 % (в контроле – ухудшились на 10–30 %). При профилактике COVID-19 заболеваемость среди принимавших «Бетукладин» составила 3,0, в группе сравнения – 13,1 %. На этапе реабилитации больных, перенесших COVID-19 с пневмонией в тяжелой форме, у всех принимающих биопрепарат отмечена быстрая регрессия остаточных явлений, включая быструю утомляемость, депрессии и т. д., восстановление работоспособности (в группе сравнения ремиссия затягивалась на 1–3 месяца и проходила тяжело).*

Ключевые слова: природные биопрепараты, лишайники, бетулин, туберкулез, гепатит, COVID-19.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках государственного задания ИБПК СО РАН на 2017–2020 гг. «Разработка биопрепаратов из тканей растений и животных Якутии на основе изучения особенностей их биохимического состава и механизмов адаптации к условиям Севера (АААА-А17-117020110055-3).*

© Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М., Слепцова С.С., Винокурова М.К., Колосова О.Н., 2021

Введение

Богатство Северо-Востока России, региона с самым экстремальным климатом обитаемой части планеты Земля, – это далеко не только ископаемое минеральное и углеводородное сырье. Не менее значимым в XXI в. становится экологически чистое, возобновляемое биологическое сырье. Организмы арктических и субарктических аборигенных видов и экоформ растений, животных, микроорганизмов выработали механизмы, позволяющие им адаптироваться к этим суровым условиям и не только выживать, а прогрессивно эволюционировать в этой среде, в том числе благодаря повышению в 1,8–2,5 раза содержания и изоструктурного разнообразия биоактивных веществ (БАВ) регуляторного и защитного действия: адаптогенного, иммуномодуляторного, противовирусного, антибактериального, радиопротекторного, детоксикационного и др. [1].

Результаты исследований особенностей биохимического состава и активности БАВ, выделяемых из тканей арктических и субарктических экоформ растений и аборигенных видов животных, позволили еще в 80–90-е годы XX века создать ряд биопрепаратов из северного природного, экологически чистого и воспроизводимого биосырья, в том числе – эффективных в отношении профилактики и коррекции метаболических нарушений при социально значимых хронических неинфекционных заболеваниях, купировании «синдрома усталости», адаптогенного, иммуномодуляторного и хронобиологического действия, а также при инфекционных заболеваниях [2, 3]. В этой связи особого внимания заслуживает биопрепарат «Бетукладин» – капсулированный ультрадисперсный порошок, содержащий супрамолекулярный комплекс лишайниковых β-олигосахаридов и фармаконов (бетулин из коры березы; вторичные лишайниковые вещества антибактериального и антиоксидантного действия), образующийся при совместной механохимической активации слоевищ лишайников рода *Cladonia* и бетулина из коры березы [4]. Благодаря комплексности состава, данный биопрепарат обладает противовирусной, иммуномодуляторной, антикоагуляционной (антитромбиновой), антибактериальной, гепатопротекторной, антигипоксантной, гиполипидемической, детоксикационной активностью [5–8]. Его противовирусная активность установлена в мировой практике в отношении РНК-вирусов: гриппа птиц, гриппа типа А, герпеса простого, гепатита С, ВИЧ-1 и других возбудителей вирусных инфекций: препятствует полноценной репродукции вируса в клетках-мишенях [7, 8]. Известно, что совместное применение бетулина и ацикловира синергетически усиливает противовирусный эффект обоих веществ [7, 8]. Преимуществом бетулина является также то, что многие иммуномодуляторы не могут широко применяться в клинической практике из-за токсичности и нежелательных эффектов. Бетулин не токсичен и не имеет побочных действий, его минимально летальная доза ($ЛД_{16}$) составляет 6,5 г/кг, среднелетальная ($ЛД_{50}$) – 9 г/кг, поэтому согласно Международной токсикологической классификации его можно отнести к IV классу малотоксичных веществ. Бетулин способен снижать гиперактивность системы интерферона, способствовать сохранению способности лейкоцитов, продуцировать интерферон. Иммуномодулирующее действие бетулина связано с тем, что он нормализует действие цитокиновой системы, активирует фагоцитоз и деятельность макрофагов. Местная противовоспалительная активность бетулина сопоставима по выраженности и интенсивности с действием классического противовоспалительного стероида дексаметазона, что объясняется структурной схожестью бетулина и стероидных гормонов. Бетулин и бетулиновая кислота проявляют широкий спектр антимикробной активности: в исследованиях *in vitro* в отношении *Bacillus subtilis, Escherichia coli, K. pneumoniae, Staphylococcus aureus* отмечено ярко выраженное подавление роста колоний золотистого стафилококка при концентрации бетулина 80 мг/мл, а при концентрации 90 мг/мл – проявляется бактерицидное действие в отношении *Staphylococcu sepidermidis*.

Вторая группа активных веществ, выделяемых из лишайников (ягеля), – это лишайниковые вещества антибактериального действия, а также образующиеся при механохимической активации слоевищ лишайников – β-олигосахариды, которые обладают: детоксикационной активностью (очистка внутренних сред организма (кровь, лимфа, межклеточные жидкости) от различного рода токсинов), хорошим антикоагуляционным (показано в Гематологическом центре РАМН) и иммуномодулирующим (ингибирующим аутоиммунные процессы; показано в клиниках японской фармацевтической фирмы «IskraIndustryLTD») действием, увеличивают биоусвояемость бетулина [5, 6].

Поскольку оба биоактивных комплекса, образующих при совместной механохимической ак-

тивации данный биопрепарат (БАД «Ягель» и «Бетулин»), ранее прошли стадии токсикологических, доклинических и при ряде патологий клинических испытаний, обе БАД и опытно-экспериментальный биоцех ИБПК СО РАН имеют разрешительную документацию Роспотребнадзора (ЕВРАЗЭС) [9, 10], то уже в 2019 г. были проведены испытания «Бетукладина» в целях повышения эффективности лечения в комплексной терапии наиболее тяжелой формы вирусных гепатитов – хронического вирусного гепатита «В» с дельта-агентом.

ХВГ В+Д – быстропрогрессирующее заболевание печени, приводящее в течение нескольких лет к компенсированному или декомпенсированному циррозу [11, 12]. Республика Саха (Якутия) является неблагополучной территорией по заболеваемости гемоконтактными гепатитами, частота обнаружения антител к которому в разных районах Якутии колеблется от 17,2 до 31,7 % у больных гепатитом «В» [13]. В настоящий момент не существует стандартов терапии гепатита D, в текущих руководствах рекомендуется прием пегилированных интерферонов-альфа в течение как минимум 48 недель [10]. В среднем уровень устойчивого вирусологического ответа низкий, однако это лечение является независимым фактором, ассоциированным с меньшей вероятностью прогрессирования заболевания [14, 15].

Современная эпидемиологическая ситуация по туберкулезу характеризуется высокой частотой множественной и широкой лекарственной устойчивости (МЛУ и ШЛУ) микобактерий туберкулеза (МБТ) к антибактериальным препаратам, и повышение эффективности химиотерапии при данных формах туберкулеза является приоритетным направлением фтизиатрии во всем мире [16]. С целью снижения проявления побочных эффектов и улучшения переносимости антибактериальных препаратов (АБП) в комплексном лечении больных туберкулезом с МЛУ и ШЛУ МБТ используются препараты для сопутствующей и патогенетической терапии: иммуностимулирующие, дезинтоксикационные, десенсибилизирующие, антигистаминные, противосудорожные, противорвотные, пробиотические, витаминные, седативные, нейролептические, антиксиолитические, антацидные, а также антиоксиданты, антигипоксанты, гепатопротекторы, бронходилататоры, антидепрессанты и др. Это создает чрезмерную медикаментозную нагрузку на организм пациента, повышает риск развития побочных реакций. Многие исследователи убеждены, что только природный путь воздействия на организм позволит снизить побочные действия синтезированных (химических) лекарственных средств [17].

Известны разнообразные средства на основе растительных экстрактов, применяемые в комплексном лечении туберкулеза, но большинство из них, оказывая положительное действие на организм человека, не обладают доказанным антимикобактериальным действием в отношении возбудителя туберкулеза. В связи с этим интерес вызывают работы по применению лишайника рода *Cladonia* как перспективного биологически активного сырья [18]. В официальной и народной медицине лишайники активно использовали как противотуберкулезное и общеукрепляющее средство, применяли для лечения туберкулеза легких, коклюша, бронхита и других бронхолегочных заболеваний. В работе Г.В. Филипповой с соавторами [19] показано, что выраженным антибактериальным действием *in vitro* в отношении чувствительных и устойчивых к АБП штаммам МБТ и условно-патогенных микроорганизмов обладает экстракт, получаемый с использованием биотехнологии предэкстракционной механохимической активации слоевищ лишайников. Установлена высокая эффективность БАД «Ягель-Детокс» [9] в качестве дополнительного средства при лечении туберкулеза с МЛУ МБТ: в период интенсивной фазы болезни в 1,7 раза быстрее достигается прекращение бактериовыделения и закрытие полостей распада, отмечается также снижение побочного токсического действия антибактериальных препаратов [20, 21].

В исследованиях *in vitro* и *in vivo* установлено противотуберкулезное действие бетулина. Экспериментальное испытание на модели экссудативно-некротического туберкулеза мышей показало положительное влияние бетулина на процессы заживления и восстановления структурно-функциональных особенностей легких и других паренхиматозных органов при длительном применении на фоне специфической антибактериальной терапии [22]. В сочетании с противотуберкулезными препаратами бетулин позволял получить более выраженное сокращение площади воспалительного процесса по сравнению с традиционным лечением, оказывал иммуностимулирующее действие [22]. Более того, у животных, получавших этот препарат, наблюдалось более полное восстановление структуры легких, печени и селезенки в сравнении с контрольной группой. В ре-

Таблица 1

Основные механизмы патогенеза COVID-19 и свойства данного биопрепарата, позволяющие купировать соответствующий патогенетический механизм

Table 1

The main mechanisms of the pathogenesis of COVID-19 and the properties of the biological product, which make it possible to arrest the corresponding pathogenetic mechanism

Механизмы патогенеза COVID-19 **Mechanisms of the pathogenesis of COVID-19**	**Свойства исследуемого биопрепарата** **Properties of the investigated biological product**
Вирусные поражения клеток-мишеней Target cell viral lesions	Высокая противовирусная активность за счет бетулина High antiviral activity due to butulin
Вторичные бактериальные пневмонии Secondary bacterial pneumonia	Высокая антибактериальная активность за счет вторичных лишайниковых метаболитов High antibacterial activity due to secondary lichen metabolites
Иммунодепрессии и формирование аутоиммунных процессов (цитокиновый шторм: фибролиз легочной и других тканей) Immunosuppression and the formation of autoimmune processes (cytokine storm: fibrolysis of the lung and other tissues)	Мягкая иммуномодуляторная активность с ингибированием аутоиммунных процессов за счет бетулина и вторичных лишайниковых веществ (показана в медицинском центре японской фирмы «IskraIndustryLtd») Mild immunomodulatory activity with inhibition of autoimmune processes due to butulin and secondary lichen substances (shown in the medical center of the Japanese company «IskraIndustryLtd»)
Массированное образование микротромбов Massive formation of microthrombi	Мягкая антитромбиновая активность некоторых лишайниковых веществ (установлена в Гематологическом центре РАМН, г. Москва) Mild antithrombin activity of some lichen substances (established at the Hematological Center of the Russian Academy of Medical Sciences, Moscow)
Образование повышенных концентраций свободных радикалов и перекисей при нарушении транспорта кислорода гемоглобином Formation of increased concentration of free radicals and peroxides in violation of oxygen transport by hemoglobin	Выраженная антиоксидантная активность за счет активных веществ лишайникового происхождения и бетулина Intense antioxidant activity due to active substances of lichen origin and butulin
Интоксикация недоокисленными продуктами клеточного метаболизма, вирусных частиц и молочной кислотой Intoxication with under-oxidized products of cellular metabolism, viral particles and lactic acid	Детоксикация крови, лимфы, межклеточных жидкостей лишайниковыми β-олигосахаридами, а также повышение биоусвояемости бетулина за счет образования супрамолекулярных комплексов между ним и лишайниковыми β-олигосахаридами Detoxification of blood, lymph, intercellular fluids with lichen β-oligosaccharides, as well as an increase in the bioavailability of butulin due to the formation of supramolecular complexes between it and lichen β-oligosaccharides

зультате проведенной клинической апробации биоактивного продукта «Тубелон», полученного на основе сухого экстракта бересты, при комбинированной химиотерапии впервые выявленных больных деструктивным туберкулезом легких было показано, что «Тубелон» оказывает положительное действие в отношении клинических проявлений заболевания, включая дезинтоксикационный, противовоспалительный и иммуностимулирующий эффект (цитир. по [22]). Комбинированная химиотерапия в сочетании с препаратом «Тубелон» почти в 2 раза повышает эффективность лечения по показателю прекращения бактериовыделения, рассасывания воспалительных изменений и закрытия каверн в легких.

Однако до настоящего времени применение комплекса биопрепаратов, полученных путем одновременной механохимической активации слоевищ лишайников и бетулина, обладающих одновременно антимикобактериальными и антитокси-

ческими свойствами при массивной химиотерапии туберкулеза с МЛУ МБТ, не проводилось, в то время как известно, что повышение эффективности лечения больных возможно лишь при адекватной и своевременной коррекции нарушений в обмене веществ, иммунной реактивности организма, антитоксической функции печени, антиоксидантной защиты и повышении биоактивности и биодоступности противотуберкулезных препаратов.

По мере того, как мировой вирусологией выясняются основные механизмы патогенеза COVID-19 [23–25] (табл. 1), становится понятно, что «Бетукладин» может оказать хороший комплексный дополнительный эффект при профилактике, лечении и при реабилитации больных, перенесших COVID-19, по всем основным аспектам патогенеза, причем без побочных негативных эффектов.

Материал и методы

БАД «Бетукладин» представляет собой капсулированный ультрадисперсный порошок, полученный при совместной механохимической активации слоевищ лишайника рода *Cladonia* и бетулина, выделенного из коры березы. Одна капсула содержит 100 мг; основные активные вещества, мас.%: лишайниковые β-олигосахариды – 0,5, бетулин – 20, ароматические кислоты флавоноидного типа антибактериального и антиоксидантного действия – 0,57; витамин B_{12} – 70 нг/г, фолиевая кислота – 1,2 мкг/г.

В 2018–2019 гг. на базе инфекционной больницы МЗ РС (Я) были проведены испытания «Бетукладина» при лечении больных ХВГ В+Д. В 2019–2020 гг. на базе НПЦ «Фтизиатрия» проведены клинические испытания данного биопрепарата в комплексной терапии деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью. В августе–сентябре 2020 г. на базе Якутской республиканской клинической больницы была проведена первая серия его предварительных клинических испытаний в условиях пандемии COVID-19; в ноябре–декабре 2020 г. и в январе 2021 г., на основании согласия Министерства здравоохранения РС (Я), – вторая серия клинических испытаний с участием больных в амбулаторных условиях. Объемы экспериментальных и контрольных выборок представлены в табл. 2.

Дизайн всех клинических исследований был проспективным. Исследование проводилось с соблюдением этических норм, полученного информированного письменного добровольного согласия обследуемых на участие в исследованиях в полном соответствии с этическими рекомендациями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (1964, 2013). Для выделе-

Таблица 2

Объем исследованного материала

Table 2

The volume of the examined material

Заболевание, состояние Disease, condition	Экспериментальная группа Experimental group				Контрольная группа Control group			
	Возрастной диапазон, лет Age range, years	Всего Total	♀	♂	Средний возраст Average age	Всего Total	♀	♂
Гепатит «В» с дельта-агентом Hepatitis B with delta agent	28–42	14	2	12	45	30	11	19
Туберкулез Tuberculosis	38–65	23	–		> 40	14	–	
Профилактика COVID-19, медики Prevention of COVID-19, doctors	25–52	33	18	15		40		
Профилактика COVID-19, родственники Prevention of COVID-19, kinsfolk	20–65	132	66	66		54		
Реабилитация после COVID-19 Rehabilitation after COVID-19	25–52	196	89	107		78		

ния DNA-HBV, RNA HCV и HDV применялся метод ПЦР-диагностики (полимеразная цепная реакция).

Для этиологической верификации гепатитов использовали серологические и вирусологические методы исследования, в частности иммуноферментный анализ (ИФА) с применением отечественных тест-систем ЗАО «Биосервис» (Москва), ЗАО «Вектор-Бест» (Новосибирск), НПО «Диагностические системы» (Нижний Новгород), «Вектогеп D – антитела-стрип» и зарубежных диагностикумов «Hoffmann La Roche», «Орженикс» и «Лабсистемс». Оценка эффективности биопрепарата проведена путем динамического контроля основных клинико-лабораторных параметров (табл. 3). Статистическая обработка полученных результатов проводилась путем сравнения гематологических и объективных показателей до, в течение и в конце исследования через 1 год после начала приема БАД «Бетукладин» с использованием критерия хи-квадрат, при помощи онлайн-калькулятора *medstatistic.com.* Пациенты контрольной группы получали стандартное лечение, основной группы – наряду с этим принимали исследуемый природный биопрепарат (см. табл. 3). Пациенты наблюдаемых групп были сопоставимы по возрастно-половому и социальному составу (см. табл. 2). Подробная методика приведена в работе [26]. Контроль анализов крови проводили перед началом клинических испытаний, через 1 и 3 месяца после первого курса приема препарата и через 3 месяца после второго курса, ПЦР – до и после исследования. Также учитывались субъективные данные: общее самочувствие, улучшение/ухудшение качества сна и засыпания, аппетит, слабость и утомляемость.

При исследовании влияния биопрепарата «Бетукладин» на эффективность лечения туберкулеза биопрепарат вводили в комплексное лечение с целью снижения побочных реакций через 1 месяц химиотерапии. Пациенты экспериментальной группы получали препарат по схеме (см. табл. 3), контрольной группы – плацебо. Пациенты основной и контрольной групп сопоставимы по возрастно-половому и социальному составу.

В исследовании профилактического действия исследуемого природного биопрепарата в отношении COVID-19 участвовало в августе–сентябре 2020 г. в составе основной группы 33 медицинских работника, работающих в красной зоне, в ноябре 2020 – январе 2021 г. – 132 человека, проживающих вместе с больными COVID-19, проходившими лечение в амбулаторных условиях. В исследовании эффективности приема данного биопрепарата на этапе реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме с поражением легких (характерные изменения по типу «матовых стекол» по степени поражения по данным компьютерной томографии (КТ) от 20 до 90 %), участвовало с августа по декабрь 2020 г. 196 человек. Все три группы были сопоставимы по половозрастным характеристикам (см. табл. 2). Дозировка препарата представлена в табл. 3.

Результаты и обсуждение

1. Гепатит «В» с дельта-агентом.

Для поддержания нормального функционирования печени применяются гепатопротекторы растительного происхождения, а также на основе аминокислот [27]. В связи с этим к числу ценных источников биоактивных веществ относится бетулин, выделяемый из коры березы, а также комплекс биоактивных веществ, выделяемых из лишайников рода *Cladonia* [28].

Прием исследуемого биопрепарата позволил снизить гипопротеинемию больных основной группы как по уровню общего белка, так и альбумина до 78,6 %, тогда как в контрольной группе – всего у 20 % (табл. 4). Остальные исследуемые показатели также показали тенденцию к более выраженному улучшению состояния в основной группе пациентов по сравнению с контрольной. Уменьшение синдрома цитолиза в виде снижения уровня АЛТ и АСТ наблюдается у 71,4 % пациентов, что значительно выше, чем в контрольной группе (40 %); отмечено также увеличение показателя уровня гемоглобина у 64,3 % больных, в контрольной группе – всего у 30 %. В основной группе у 7 из 14 пациентов до начала приема биопрепарата наблюдалась лейкопения, а прием биопрепарата позволил увеличить долю больных с нормальным содержанием лейкоцитов до 71,4 % (в контрольной группе через 7 месяцев эксперимента она составила 40 %).

После второго курса приема биопрепарата у большинства пациентов основной группы (71,4 %, 10 человек) отмечается улучшение общего самочувствия, увеличение работоспособности и улучшение качества сна по сравнению с контрольной группой, не достигавшее уровня статистически значимого (56,7 %; см. табл. 4), но в данном случае следует отметить однонаправленность положительной тенденции по всем исследуемым па-

Таблица 3

Анализируемые показатели и дозировка биопрепарата для исследуемых заболеваний

Table 3

Analyzed indicators and dosage of the biological product for the studied diseases

Заболевание, состояние Disease, condition	Анализируемые показатели Analyzed indicators	Дозировка «Бетукладина» Betukladin dosage
Гепатит «В» с дельта-агентом Hepatitis B with delta-agent	Общий анализ крови: уровень гемоглобина, лейкоцитов, тромбоцитов, гематокрит, СОЭ; биохимический анализ: общий белок, альбумин, мочевина, креатинин, АЛТ, АСТ, общий и связанный билирубин, щелочная фосфатаза, гамма-глутамилтрансфераза; коагулограмма: протромбиновое время, МНО; ПЦР: качественное и количественное исследование ДНК-HBV и РНК-HDV Complete blood count: the level of hemoglobin, leukocytes, platelets, hematocrit, ESR; biochemical analysis: total protein, albumin, urea, creatinine, ALT, AST, total and bound bilirubin, alkaline phosphatase, gamma-glutamyltransferase; coagulogram: prothrombin time, INR; PCR: qualitative and quantitative study of DNA-HBV and RNA-HDV	2 капсулы 2 раза в день через 1–1,5 часа после еды, курс 2 месяца 2 capsules 2 times a day 1–1.5 hours after meals, course 2 months
Туберкулез Tuberculosis	Симптомы интоксикации, бактериовыделение, закрытия полостей распада, исчезновение/улучшение картины гнойных дренажных эндобронхитов. Стандартные клинические, лабораторные и инструментальные методы исследования. Показатели антиоксидантной защиты и перекисного окисления липидов. Для оценки иммунного статуса – показатели клеточного и гуморального иммунитета Symptoms of intoxication, bacterial excretion, closure of decay cavities, disappearance / improvement of the picture of purulent drainage endobronchitis. Standard clinical, laboratory and instrumental research methods. Indicators of antioxidant protection and lipid peroxidation. To assess the immune status – indicators of cellular and humoral immunity	По массе тела: до 60 кг – по 2 капсулы; свыше 60 кг – по 3 капсулы в день, после еды курс 90 дней. Повторный курс – через 1 месяц By body weight: up to 60 kg – 2 capsules each, over 60 kg – 3 capsules per day, after meals course 90 days. Repeated course – after 1 month
Профилактика COVID-19, медики Prevention of COVID-19, doctors	Трехкратное обследование: ПЦР, определение титров IgM и IgG методом ИФА Triple examination: PCR, determination of IgM and IgG titers by Linked immunosorbent assay	1 капсула 2 раза в день во время еды, курс 30 дней 1 capsule 2 times a day with meals, course 30 days
Профилактика COVID-19, родственники Prevention of COVID-19, relatives		
Реабилитация после COVID-19 Rehabilitation after COVID-19	Трехкратное обследование: ПЦР, определение титров IgM и IgG методом ИФА Triple examination: PCR, determination of IgM and IgG titers by Linked immunosorbent assay	При поражении легких более 50 %: 2 капсулы утром + 1 капсула вечером. При поражении менее 50 %: по 1 капсуле 2 раза в день, во время еды, курс 30 дней With lung damage more than 50 %: 2 capsules in the morning + 1 capsule in the evening. If the lesion is less than 50 %: 1 capsule 2 times a day, with meals, the course is 30 days

Таблица 4

Динамика изменения основных показателей в группах больных гепатитом «В» с дельта-агентом

Table 4

Dynamics of changes in the main indicators in groups of patients with hepatitis «B» with a delta-agent

Показатели Indicators	Основная группа Main group (*n*=14)		Контрольная группа Control group (*n*=30)		Критерий хи-квадрат Пирсона Criterion Pearson Chi-square	Уровень значимости Significance level Bridges df=1
	Абс. Abs.	%	Абс. Abs.	%		
Улучшение общего самочувствия, увеличение трудоспособности Improvement of general well-being, increase in working capacity	10	71,4	17	56,7	0,204	*ρ = 0,652*
Уровень трансаминаз (АСТ, до 45 ед./л) Transaminase level (AST, up to 45 U / L)	10	71,4	12	40,0	3,945	*ρ = 0,053*
Уровень трансаминаз (АЛТ до 32 ед./л) Transaminase level (ALT up to 32 U / L)	10	71,4	12	40,0	3,945	*ρ = 0,053*
Повышение уровня гемоглобина Increased hemoglobin levels	9	64,3	9	30,0	3,721	*ρ = 0,054*
Повышение уровня лейкоцитов на фоне исходной лейкопении An increase in the level of leukocytes against the background of the initial leukopenia	7 (10)	71,4	5 (12)	40,0	0,116	*ρ = 0,280*
Повышение уровня белковых фракций Increasing the level of protein fractions	11	78,6	6	20,0	13,812	*ρ < 0,001*

раметрам. Также у 79 % больных основной группы повысилась биосинтетическая активность печени, приведшая к увеличению уровня общего белка (в среднем от 74 до 80 г/л), в том числе альбумина (в среднем от 34 до 41 г/л; в контрольной группе – у 20 % больных, при том, что к концу 2-го месяца эти показатели снижались до 60 и 29 г/л соответственно). У больных основной группы показатели АЛТ и АСТ в крови снизились по сравнению с исходными данными (АЛТ – с 101,2 до 65,6 ед/л; АСТ – с 77,6 до 58,2 ед/л). В контрольной группе эти показатели в период наблюдений колебались с большой амплитудой, но в конечном итоге достоверно не изменялись (АЛТ – с 98,4 до 92,2 ед/л, АСТ – с 85,5 до 84,8 ед/л), превышая у большинства пациентов нормальные значения. Снижение общего и прямого билирубина отмечено у больных основной группы в то время, как у больных контрольной группы отмечено увеличение (табл. 5).

Отмечалась тенденция увеличения уровня альфа-фетопротеина (онкомаркера развития гепатоцеллюлярной карциномы) в обеих группах за время наблюдений: в экспериментальной – с 83,3 до 93,3 МЕ/л; в контрольной – 151,4 до 162,6 МЕ/л (при норме – до 10 МЕ/л), оставаясь в исследуемой группе в 1,7–1,8 раза ниже, чем в контрольной. Повышение до нормального уровня лейкоцитов отмечается в обеих группах в равной степени. Уровень лимфоцитов был в пределах нормы в обеих группах, снижаясь в контрольной группе с 1,58 до $1{,}32 \cdot 10^9$/л и с 1,68 до $1{,}58 \cdot 10^9$/л в основной группе. У пациентов основной группы отмечалось снижение уровня СОЭ с 14,2 до 10,2 мм/ч (норма до 10–15 мм/ч). В контрольной группе уровень СОЭ оставался выше нормы, колеблясь в диапазоне 20,6–17,6 мм/ч. На гипохолестеринемическое и сахароснижающее действие данного биопрепарата указывает снижение уровня холестерина в основной группе с 4,64 до 4,49 ммоль/л (в контрольной группе – увеличение с 4,7 до 5,0 ммоль/л). Содержание глюкозы в крови пациентов основной группы оставалось в диапазоне 4,4–4,6 ммоль/л (в конт-

Таблица 5

Эффективность химиотерапии деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью (через 18–24 мес.)

Table 5

Chemotheraphy efficacy response for destructive pulmonary tuberculosis with multidrug-resistant mycobacteria (after 18–24 months)

Показатели Indicators	Основная группа Main group (*n*=23)		Контрольная группа Control group (*n*=15)	
	Абс Abs.	%	Абс Abs.	%
Уменьшение частоты и выраженности симптомов интоксикации Reducing the frequency and severity of symptoms of intoxication	23	100,0	9	60,0
Прекращение бактериовыделения Cessation of bacterial excretion	20	87,0	6	40,0
Закрытия полостей распада Closure of decaycavities	19	82,6	6	40,0
Излечение/улучшение гнойных эндобронхитов Cure/improvement of purulent endobronchitis	11	84,6	5	62,5
Клиническое излечение туберкулеза Clinical cure for tuberculosis	18	78,3	6	40,0
Изменение печеночных биохимических показателей Changes in liver biochemical parameters				
АЛТ ALT	↓ на by 32 %		↑ на by 30 %	
АСТ AST	↓ на by 20 %		↑ на by 10 %	
Общий билирубин Total bilirubin	↓ на by 12 %		↑ на by 20 %	

рольной группе повышалось с 4,7 до 5,3 ммоль/л). У больных основной группы на 15 и 14 % увеличивались уровни гемоглобина и тромбоцитов соответственно (в контрольной группе эти показатели снижались на 4 и 13 % соответственно).

2. Туберкулез легких с множественной лекарственной устойчивостью микобактерий.

У всех больных методом посева и абсолютных концентраций определены МЛУ и ШЛУ МБТ и выявлены деструктивные изменения в легких. Контролируемая химиотерапия проводилась по IV и V режимам с учетом чувствительности к противотуберкулезным препаратам, в период интенсивной фазы по схеме «Бедаквилин», капреомицин/канамицин, фторхинолоны, пиразинамид, циклосерин/теризидон, протионамид/этионамид, аминосалициловая кислота, перхлозон не менее 12 мес. (Приказ МЗ РФ №951 от 29.12.2014). У всех пациентов отмечаются умеренные и выраженные признаки туберкулезной интоксикации и клинических проявлений (кашель, одышка, хрипы в легких, боли в груди), у большинства в клинической структуре преобладает фиброзно-кавернозный туберкулез, в обеих группах отмечено злоупотребление алкоголем, табакокурение и заболевания желудочно-кишечного тракта.

Биопрепарат вводили в комплексное лечение с целью снижения побочных реакций через 1 месяц химиотерапии. Результаты, представленные в табл. 5, свидетельствуют о высокой эффективности исследуемого комплексного биопрепарата в лечении туберкулеза легких с МЛУ и ШЛУ МБТ по основным клиническим показателям, а также в снижении побочного действия стандартной химиотерапии по отношению к печени, другим внутренним органам и системам.

Через 18–24 мес. химиотерапии в основной группе прекращение бактериовыделения методом посева достигнуто у 20 (87,0 %) пациентов,

закрытие полостей распада у 19 (82,6 %), из них 7 (36,8 %) оказан хирургический этап лечения. Клиническое излечение туберкулеза достигнуто у 18 больных основной группы (78,3 %). В контрольной группе прекращение бактериовыделения и закрытия полостей распада установлено у 6 (40,0 %) пациентов с клиническим излечением туберкулеза.

Через 3 мес. после окончания курса приема исследуемого биопрепарата у больных наблюдаемых групп выявлены существенные различия: в основной группе показатели АЛТ и АСТ в крови достоверно снизились по сравнению с исходными данными на 32 и 20 %; в контрольной группе – выросли на 30 и 10 %. При сравнении между группами отмечается снижение на 12 % общего билирубина у больных основной группы и повышение на 20 % в контрольной.

Таким образом, функциональное состояние гепатобилиарной системы у больных туберкулезом по основным показателям биохимического исследования крови (уровень аминотрансфераз и билирубина), несмотря на массивную химиотерапию в течение длительного времени, при дополнительном приеме данного биопрепарата не имело признаков к ухудшению, отмечена несомненная положительная динамика по сравнению с контрольной группой. В целом, применение этого биопрепарата как средства с гепатопротекторным и ноотропным действием для снижения нежелательных побочных реакций в лечении туберкулеза с МЛУ и ШЛУ МБТ повышает эффективность комплексного лечения.

3. Профилактика и реабилитация после перенесенного в тяжелой форме COVID-19.

Первая серия клинических испытаний исследуемого природного биопрепарата была проведена в августе–сентябре 2020 года на базе Якутской Республиканской клинической больницы № 2, вторая серия – в ноябре 2020–январе 2021 гг. на базе медицинских учреждений, задействованных в оказании стационарной и амбулаторной медицинской помощи при пандемии COVID-19. Предварительные результаты, полученные в целях профилактики COVID-19 и реабилитации больных, перенесших это заболевание в тяжелой форме, приведены в таблице 6.

Предварительные результаты испытаний свидетельствуют о высокой эффективности использования данного биопрепарата при профилактике и реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме.

При профилактике COVID-19 в группах медицинских работников, находящихся в «красной зоне», и людей, проживающих вместе с больными COVID-19, заболеваемость среди принимавших его составила ~3,0 %, в группе сравнения (среди соблюдающих все меры предосторожности, но не принимавших данный биопрепарат) – 13,1 %.

Эффективность использования исследуемого биопрепарата при реабилитации больных, перенесших COVID-19, зависела от тяжести перенесенного заболевания, критерием которой была взята степень поражения легких по данным КТ. При степени поражения по КТ 20–30 %, период ремиссии составлял 7,5±2,5 суток (в группе сравнения 18±4 суток); при КТ 30–50 % – 10,5±3,5 суток (в группе сравнения 26,5±8,5 суток); при КТ 50–70 % – 15,5±5,5 суток (в группе сравнения 45±20 суток); при КТ 70–90 % – 21,5±6,5 суток (в группе сравнения 70±25 суток).

Таким образом, у всех принимающих данный биопрепарат в период ремиссии отмечена быстрая регрессия остаточных явлений, включая быструю утомляемость, депрессии и т. д., восстановление работоспособности (в группе не принимающих биопрепарат ремиссия затягивалась на 1–3 месяца и проходила тяжело). Отмечено также уменьшение тяжести астенического синдрома в 2–3 раза.

В рамках обсуждения полученных результатов, следует отметить, что в работе [29] было показано, что хорошо известный антикоагулянт гетерополисахарид гепарин обладает исключительной аффинностью связывания со спайковым белком (S-белком) SARS-CoV-2, который более прочно связывается с иммобилизованным гепарином ($K_D \approx 10^{-11}$M), чем S-белки SARS-CoV ($K_D \approx 10^{-7}$M) или MERS-CoV ($K_D \approx 10^{-9}$M). Исходя из этого, на противовирусную активность были проверены органические вещества, извлеченные из морских водорослей, — три варианта гепарина и два вида фукоиданов. Все пять соединений представляют собой длинные цепочки молекул углевода, известных как сульфатированные гетерополисахариды. В клеточных исследованиях экстракт из морских водорослей по антивирусному действию значительно превзошел ремдесивир — современный стандартный препарат от коронавируса. Поскольку лишайники являются симбиотическими ассоциациями грибов (микобионт) и микроскопических зеленых водорослей и/или цианобактерий и часть лишайниковых поли-/олигосахаридов являются сульфатирован-

Таблица 6

Эффективность приема исследуемого биопрепарата в целях профилактики и реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме

Table 6

Biological product efficacy for prevention and rehabiltation of patients who have undergone severe COVID-19

Профилактика COVID-19
Prevention COVID-19

Группы Groups	Экспериментальная группа Experimental group		Группа сравнения Comparison group	
	n чел. people	Переболело COVID-19, чел. Got sick COVID-19, people	*n* чел. people	Переболело COVID-19, чел. Got sick COVID-19, people
Медицинские работники в красной зоне Medical workers in the red zone	33	1	40	5
Родственники, проживающие вместе с больными COVID-19, проходившими амбулаторное лечение, соблюдающие все меры предосторожности Relatives living with COVID-19 patients who received outpatient treatment, taking all precautions	132	4	59	8

Реабилитация больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме
Rehabilitation of patients with severe COVID-19

Группы (степень поражения легких «матовое стекло» по КТ, %) Groups (the degree of lung damage «frosted glass» CT scan, %)	Основная группа Main group			Группа сравнения Comparison group		
	n	Период реабилитации, суток Rehabilitation period after illness, days	Тяжесть осложнений, баллы по 10-балльной шкале The severity of complications after illness, 10-point scale	*n*	Период реабилитации, суток rehabilitation period after illness, days	Тяжесть осложнений, баллы по 10-балльной шкале The severity of complications after illness, 10-point scale
20–30	68	5–10	2	25	14–22	6
30–50	75	7–14	3	27	18–35	7
50–70	38	10–21	5	17	25–65	10
70–90	15	15–28	5	9	45–95 и более 45–95 and more	10

ными гетерополисахаридами, то эта информация, вероятно, проливает свет на возможный механизм противовирусного и антикоагуляционного действия исследуемого биопрепарата в отношении вируса SARS-CoV-2.

Выводы

1. Применение комплексного природного биопрепарата повысило эффективность комплексного лечения больных вирусным гепатитом «В» с дельта-агентом, что выразилось в снижении в 1,8 раза синдромов цитолиза гепатоцитов (АЛТ, АСТ), в увеличении в 1,8–2,1 раза уровня лейкоцитов, тромбоцитов, гемоглобина, и в 3,9 раза – уровня общего белка и альбумина, а также в улучшении в 1,3–1,4 раза общего самочувствия, качества сна и повышения трудоспособности.

2. Применение комплексного природного биопрепарата повысило эффективность комплексного лечения деструктивного туберкулеза легких с множественной и широкой лекарственной устойчивостью по основным клиническим показателям (уменьшение частоты и выраженности симптомов интоксикации в 1,7 раза; частоты бакте-

риовыделения – в 2,2 раза; увеличение частоты закрытия полостей распада – в 2,1 раза, частоты излечения/улучшения гнойных эндобронхитов – в 1,4 раза; клиническое излечение туберкулеза достигнуто у 78,3 % больных основной группы, против 40 % в контрольной группе), а также снизило побочное действие химиотерапии по отношению к печени, другим внутренним органам и системам на 30–62 %, по сравнению с данными контрольной группы.

3. Согласно предварительным результатам, использование комплексного природного биопрепарата при профилактике и реабилитации больных, перенесших COVID-19 в тяжелой форме, показало его высокую эффективность, а именно на этапе профилактики позволило снизить заболеваемость с 13,1 % в группе сравнения до 3,0 %; в период реабилитации уменьшить ее срок в 2,4–3,21 раза, в зависимости от степени поражения легких по результатам КТ-исследования, а также снизить тяжесть ее протекания в 2–3 раза по таким показателям, как быстрая утомляемость, депрессии, восстановление работоспособности и др.

Литература

1. *Кершенгольц Б.М., Аньшакова В.В., Филиппова Г.В., Кершенгольц Е.Б.* Влияние температурно-влажностных метеорологических условий на качественный и количественный состав эфирных масел полыней Якутии // Химия растительного сырья. 2009. № 3. С. 89–94.

2. *Кершенгольц Б.М., Журавская А.Н., Хлебный Е.С., Шеин А.А., Филиппова Г.В., Шашурин М.М., Аньшакова В.В.* Биопрепараты из природного арктического биосырья в сохранении здоровья населения в условиях изменений климата // Экология человека. 2010. № 3. С. 8–15.

3. *Кершенгольц Б.М., Ремигайло П.А., Шеин А.А.* Природные биологически активные вещества из тканей растений и животных Якутии: особенности состава, новые технологии, достижения и перспективы использования в медицине // Дальневосточный медицинский журнал. 2004. Приложение № 1. С. 25–29.

4. *Шашурин М.М., Кершенгольц Б.М.* Композиция на основе бетулина и слоевищ лишайников, обладающая антибактериальным, противовирусным и детоксикационным действием // Патент № 2710236 от 25.12.2019, приоритет от 07.03.2019.

5. *Аньшакова В.В.* Биотехнологическая механохимическая переработка лишайников рода *Cladonia*. М.: Академия естествознания, 2013. 115 с.

6. *Кершенгольц Б.М.* Лишайники: биотехнологии переработки, биопрепараты на их основе М.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 100 с.

7. *Толстиков Г.А., Флехтер О,Б., Шульц Э.Э., Балтина Л.А., Толстиков А.Г.* Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. С. 1–30.

8. *Переславцева А.В., Галайко Н.В.* Бетулин как перспективный источник для получения противовирусных препаратов // Вестник Пермского научн. центра. 2013. № 3. С. 34–41.

9. *Свидетельство* о государственной регистрации Роспотребнадзором и в странах ЕВРАЗЭС БАД к пище «ЯГЕЛЬ ДЕТОКС» (порошок) № RU.77.99.11.003. Е.014127.09.12 от 27.09.2012.

10. *«Бетулин»* (СГР RU.77.99.88.003.Е.002099.05.18 и RU.77.99.88.003.Е.006199.05.15)

11. *Михайлов М.И., Ющук Н.Д., Малинникова Е.Ю. и др.* Проект программы по контролю и ликвидации вирусных гепатитов как проблемы общественного здоровья в Российской Федерации // Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение. 2018. № 7(2). С. 52–58.

12. *Ющук Н.Д., Климова Е.А., Знойко О.О. и др.* Вирусные гепатиты: клиника, диагностика, лечение // М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 160 с.

13. *Слепцова С.С., Слепцов С.С., Андреев М.Н. и др.* Хронические вирусные гепатиты и первичный рак печени в Республике Саха (Якутия) // Журнал инфектологии. 2019. № 11(4). С. 79–84.

14. *Gilman C., Heller T., Koh C.* Chronic hepatitis delta: A state-of-the-art review and new therapies // World J. Gastroentero l. 2019. Vol. 25 (4567). P. 795.

15. *Heidrich B., Yurdaydın C. et al.* HIDIT-1 Study Group. Late HDV RNA relapse after peginterferon alpha-based therapy of chronic hepatitis delta // Hepatology. 2014. Vol. 60. P. 87–97

16. *Васильева И.А., Стерликов С.А., Тестов В.В.* Эффективность лечения больных туберкулезом: проблемы и пути решения // Туберкулез и болезни легких. 2015. № 6. С. 146–147.

17. *Беспалов В.Г., Некрасова В.Б., Иорданишвили А.К.* Современный взгляд на биологически активные добавки к пище и их использование в лечебно-профилактических целях в клинической медицине // Медицина. XXI век. 2007. № 9. С. 86–94.

18. *Еникеев А.Х., Еникеева Р.А.* Экстракт Cetraria islandica (L.) Ach. сухой, таблетированная форма // Патент РФ № 2321419, 2008.

19. *Филиппова Г.В., Павлов Н.Г., Шашурин М.М., Кершенгольц Б.М.* Влияние биологически активных веществ из слоевищ северных лишайников, экстрагированных различными методами, на биологические свойства микобактерий туберкулеза // Сибирский мед. журнал. 2008. № 3. С. 99–103.

20. *Винокурова М.К., Евдокимова Н., Павлов Н., Аньшакова В., Кершенгольц Б., Степанова А., Кубарев Е.* «Ягель детокс» в комплексном лечении туберкулеза легких с множественной лекарственной

устойчивостью // Биофармацевтический журнал. 2018. Т. 10, № 4. С. 74–79.

21. *Винокурова М.К., Евдокимова Н.Е., Павлов Н.Г., Кершенгольц Б.М.*, *Аньшакова В.В.* Способ применения «Ягель детокс» в качестве средства для лечения туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью // Патент РФ 2673555 от 28.11.2018, приоритет от 22.05.2017

22. *Лигостаева Ю.В.* Фармакогностическое исследование бересты и перспективы ее использования в медицине. Автореф. … дис. канд. мед. наук. Новосибирск. 2015. 24 с.

23. *Cevik M., Kuppalli K., Kindrachuk J., Peiris M.* Virology, transmission, and pathogenesis of SARS-CoV-2 // BMJ. 2020. Vol. 371. doi:10.1136/bmj.m3862

24. *Harrison A.G., Tao Lin, Penghua Wang.* Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmission and Pathogenesis (англ.) // Trends in Immunology. 2020 (1 December). Vol. 41, No. 12. P. 1100–1115.

25. *Профилактика*, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (COVID-19). Временные методические рекомендации. Минздрав России. Министерство здравоохранения Российской Федерации (Версия 11 от 07.05.2021). М., 2021. 225 с.

26. *Слепцова С.С., Стручкова Т.Ф., Колосова О.Н., Шашурин М.М., Заморщикова О.М., Кершенгольц Б.М.* Эффективность природного комплекса «Бетукладин» в комплексной терапии хронического вирусного гепатита «В» с дельта-агентом // Современные проблемы науки и образования. 2021. № 1. URL: http://www.science-education.ru/article/view?id= 30521

27. *Preisig R.* Supplements to the editorial «Liver prorection therapy» // Schweiz Rundsch Med Prax. 1970. Vol. 59 (N1559). P. 60.

28. *Киселева Т.Л., Смирнова Ю.А.* Основные группы биологически активных соединений пищевых растений. М.: ФНКЭЦТМДЛ Росздрава, 2007. С. 69–77.

29. *Kwon P.S., Hanseul Oh, Seok-Joon Kwon, Weihua Jin, Fuming Zhang, Fraser K., Jung Joo Hong, Linhardt R.J., Dordick J.S.* Sulfated polysaccharides effectively inhibit SARS-CoV-2 in vitro // Cell Discovery. 2020. Vol. 6. Article number: 50.

Поступила в редакцию 05.06.2021
Принята к публикации 14.07.2021

Об авторах

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

ШАШУРИН Михаил Михайлович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия,
https://orcid.org/0000-0002-6785-1948, inwertaza@mail.ru;

СЛЕПЦОВА Снежана Спиридоновна, доктор медицинских наук, заведующий кафедрой, Медицинский институт, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677000, Якутск, ул. Ойунского, 27, Россия,
https://orcid.org/0000-0002-0103-4750, sssleptsova@yandex.ru;

ВИНОКУРОВА Мария Константиновна, доктор медицинских наук, зам. директора, Научно-практический центр «Фтизиатрия», 677015, Якутск, ул. Петра Алексеева, 93, Россия,
https://orcid.org/0000-0001-7673-3815, mkvin61@mail.ru

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

Информация для цитирования

Кершенгольц Б.М., Шашурин М.М., Винокурова М.К., Колосова О.Н. Биопрепарат из природного северного биосырья и возможности его использования при профилактике, лечении и на этапе ремиссии после перенесенных бактериальных и вирусных инфекций, включая COVID-19 // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 120–135. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-120–135

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-120–135

Biological product from natural northern biological raw materials with possible use in the prevention, treatment and remission stages after bacterial and viral infections, including COVID-19

B.M. Kershengolts[1,*], M.M. Shashurin[1,2], S.S. Sleptcova[2], M.K. Vinokurova[3], O.N. Kolosova[1]

[1]*Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SB RAS, Yakutsk, Russia*
[2]*Medical Institute of the Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*
[3]*Research and Practical Center «Phthisiology», Yakutsk, Russia*

**kerschen@mail.ru*

Abstract. *Within the framework of the prospective investigation, we studied and substantiated the application of the natural biological product Betukladin as additional preparation in the complex therapy for treatment of the following diseases: chronic viral hepatitis B with delta agent (CVH B+D), destructive pulmonary tuberculosis with extensive and multidrug resistance (XMDR-TB), and moreover, for prevention and rehabilitation of patients after severe COVID-19. Experimental group included 14, 23, 165 and 196 people, respectively; control group included 217 people. Betukladin is encapsulated ultrafine powder containing a complex of lichen β-oligosaccharides with pharmacons, obtained through mechanical and chemical activation of the Cladonia blastemas and butulin from birch bark. The product demonstrates antiviral, immunomodulating, anticoagulant, antibacterial hepatoprotective, antihypoxant, hypolipidemic, detoxicative activity. The complex of lichen bioactive substances and butulin have previously passed toxicological, preclinical and clinical trials (for a number of pathologies) in the form of nutraceutical products Yagel Detox and Betulin. The use of the biological product has enhanced the efficiency of the complex treatment of patients with CVH B+D. It demonstrated significant increase in the total protein level and albumin, a decrease in the cytolysis of hepatocytes, normalization of the levels of leucocytes, thrombocytes and hemoglobin, improvement of the general condition, quality of sleep and work capacity. The clinical trial of Betukladin in phthisiology revealed its high efficiency in treating XMDR-TB: intoxication symptoms were detected to decrease in 100 % of the patients; abacillation, cavity closure, clinical cure of tuberculosis were revealed in 87–78 % of the patients (control: 60 and 40 %, respectively). The liver values improved by 12–32 % (in control, these values worsened by 10-30%). COVID-19 prevention resulted in the disease rate of 3.0 among the people taking Betukladin, while the disease rate in the control group was 13.1 %. Patients taking the biological product at the stage of rehabilitation after COVID-19 with severe pneumonia showed rapid regression of residual effects of the disease (rapid fatigability, depression, and recovery of work capacity), while in the control group, recuperation lasted for one to three months and had severe forms.*

Keywords: natural biological products, lichens, betulin, tuberculosis, hepatitis, COVID-19.

Acknowledgements. *The research was carried out within the State Assignment for the Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS for 2017-2020 «Development of biopreparations from the tissues of plants and animals of Yakutia on the basis of the studies of their biochemical composition and mechanisms of adaptation to the conditions of the North» (AAAA-A17-117020110055-3).*

References

1. *Kershengolts B.M., Anshakova V.V., Filippova G.V., Kershengolts E.B.* Vliyanie temperaturno-vlazhnostnyih meteorologicheskih usloviy na kachestvennyiy i kolichestvennyiy sostav efirnyih masel polyiney Yakutii // Himiya rastitelnogo syirya. 2009. No. 3. P. 89–94.

2. *Kershengolts B.M., Zhuravskaya A.N., Hlebnyiy E.S., Shein A.A., Filippova G.V., Shashurin M.M., Anshakova V.V.* Biopreparatyi iz prirodnogo arkticheskogo biosyirya v sohranenii zdorovya naseleniya v usloviyah izmeneniy klimata // Ekologiya cheloveka. 2010. No. 3. P. 8–15.

3. *Kershengolts B.M., Remigaylo P.A., Shein A.A.* Prirodnyie biologicheski aktivnyie veschestva iz tkaney rasteniy i zhivotnyih Yakutii: osobennosti sostava, novyie tehnologii, dostizheniya i perspektivyi ispolzovaniya v meditsine // Dalnevostochnyiy meditsinskiy zhurnal. 2004. Prilozhenie # 1. P. 25–29.

4. *Shashurin M.M., Kershengolts B.M.* Kompozitsiya na osnove betulina i sloevisch lishaynikov, obladayuschaya antibakterialnyim, protivovirusnyim i detoksikatsionnyim deystviem // Patent #2710236 ot 25.12.2019, prioritet ot 07.03.2019.

5. *Anshakova V.V.* Biotehnologicheskaya mehanohimicheskaya pererabotka lishaynikov roda Cladonia. M.: Akademiya estestvoznaniya, 2013. 115 p.

6. *Kershengolts B.M.* Lishayniki: biotehnologii pererabotki, biopreparatyi na ih osnove Moscow. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 100 p.

7. *Tolstikov G.A., Flehter O,B., Shults E.E., Baltina L.A., Tolstikov A.G.* Betulin i ego proizvodnyie. Himiya i biologicheskaya aktivnost // Himiya v interesah ustoychivogo razvitiya. 2005. Vol. 13. P. 1–30.

8. *Pereslavtseva A.V., Galayko N.V.* Betulin kak perspektivnyiy istochnik dlya polucheniya protivovirusnyih preparatov // Vestnik Permskogo nauchn. tsentra. 2013. No. 3. P. 34–41.

9. *Svidetelstvo* o gosudarstvennoy registratsii Rospotrebnadzorom i v stranah EVRAZES BAD k pische «YaGEL' DETOKS» (poroshok) # RU.77.99.11.003. E.014127.09.12 ot 27.09.2012.

10. *«Betulin»* (SGR RU.77.99.88.003.E.002099.05.18 i RU.77.99.88.003.E.006199.05.15)

11. *Mihaylov M.I., Yuschuk N.D., Malinnikova E.Yu. i dr.* Proekt programmy po kontrolyu i likvidatsii virusnyih gepatitov kak problemy obschestvennogo zdorovya v Rossiyskoy Federatsii // Infektsionnyie bolezni: novosti, mneniya, obuchenie. 2018. #7(2). S.52-58.

12. *Yuschuk N.D., Klimova E.A., Znoyko O.O. i dr.* Virusnyie gepatity: klinika, diagnostika, lechenie. M.: GEOTAR-Media, 2012. 160 p.

13. *Sleptsova S.S., Sleptsov S.S., Andreev M.N. i dr.* Hronicheskie virusnyie gepatityi i pervichnyiy rak pecheni v Respublike Saha (Yakutiya) // Zhurnal infektologii. 2019. No. 11(4). P. 79–84.

14. *Gilman C., Heller T., Koh C.* Chronic hepatitis delta: A state-of-the-art review and new therapies // World J. Gastroentero l. 2019. Vol. 25 (4567). P. 795.

15. *Heidrich B., Yurdaydın C. et al.* HIDIT-1 Study Group. Late HDV RNA relapse after peginterferon alpha-based therapy of chronic hepatitis delta // Hepatology. 2014. Vol. 60. P. 87–97

16. *Vasileva I.A., Sterlikov S.A., Testov V.V.* Effektivnost lecheniya bolnyih tuberkulezom: problemyi i puti resheniya // Tuberkulez i bolezni legkih. 2015. No. 6. P. 146–147.

17. *Bespalov V.G., Nekrasova V.B., Iordanishvili A.K.* Sovremennyiy vzglyad na biologicheski aktivnyie dobavki k pische i ih ispolzovanie v lechebno-profilakticheskih tselyah v klinicheskoy meditsine // Meditsina. XXI vek. 2007. No. 9. P. 86–94.

18. *Enikeev A.H., Enikeeva R.A.* Ekstrakt Cetraria islandica (L.) Ach. suhoy, tabletirovannaya forma // Patent RF # 2321419, 2008.

19. *Filippova G.V., Pavlov N.G., Shashurin M.M., Kershengolts B.M.* Vliyanie biologicheski aktivnyih veschestv iz sloevisch severnyih lishaynikov, ekstragirovannyih razlichnyimi metodami, na biologicheskie svoystva mikobakteriy tuberkuleza // Sibirskiy med. zhurnal. 2008. No. 3. P. 99–103.

20. *Vinokurova M.K., Evdokimova N., Pavlov N., Anshakova V., Kershengolts B., Stepanova A., Kubarev E.* «Yagel detoks» v kompleksnom lechenii tuberkuleza legkih s mnozhestvennoy lekarstvennoy ustoychivostyu // Biofarmatsevticheskiy zhurnal. 2018. Vol. 10, No. 4. P. 74–79.

21. *Vinokurova M.K., Evdokimova N.E., Pavlov N.G., Kershengolts B.M, Anshakova V.V.* Sposob primeneniya «Yagel detoks» v kachestve sredstva dlya lecheniya tuberkuleza s mnozhestvennoy lekarstvennoy ustoychivostyu // Patent RF 2673555 ot 28.11.2018, prioritet ot 22.05.2017

22. *Ligostaeva Yu.V.* Farmakognosticheskoe issledovanie berestyi i perspektivyi ee ispolzovaniya v meditsine. Avtoref. … dis. kand. med. nauk. Novosibirsk. 2015. 24 p.

23. *Cevik M., Kuppalli K., Kindrachuk J., Peiris M.* Virology, transmission, and pathogenesis of SARS-CoV-2 // BMJ. 2020. Vol. 371. doi:10.1136/bmj.m3862

24. *Harrison A.G., Tao Lin, Penghua Wang.* Mechanisms of SARS-CoV-2 Transmission and Pathogenesis (англ.) // Trends in Immunology. 2020 (1 December). Vol. 41, No. 12. P. 1100–1115.

25. *Profilaktika*, diagnostika i lechenie novoy koronavirusnoy infektsii (COVID-19). Vremennyie metodicheskie rekomendatsii. Minzdrav Rossii. Ministerstvo zdravoohraneniya Rossiyskoy Federatsii (Versiya 11 ot 07.05.2021). Moscow, 2021. 225 p.

26. *Sleptsova S.S., Struchkova T.F., Kolosova O.N., Shashurin M.M., Zamorschikova O.M., Kershengolts B.M.* Effektivnost prirodnogo kompleksa «Betukladin» v kompleksnoy terapii hronicheskogo virusnogo gepatita «B» s delta agentom // Sovremennyie problemyi nauki i obrazovaniya. 2021. No. 1. URL: http://www.science-education.ru/article/view?id= 30521

27. *Preisig R.* Supplements to the editorial «Liver prorection therapy» // Schweiz Rundsch Med Prax. 1970. Vol. 59 (N1559). P. 60.

28. *Kiseleva T.L., Smirnova Yu.A.* Osnovnyie gruppyi biologicheski aktivnyih soedineniy pischevyih rasteniy. M.: FNKETsTMDL Roszdrava, 2007. P. 69–77.

29. *Kwon P.S., Hanseul Oh, Seok-Joon Kwon, Weihua Jin, Fuming Zhang, Fraser K., Jung Joo Hong, Linhardt R.J., Dordick J.S.* Sulfated polysaccharides effectively inhibit SARS-CoV-2 in vitro // Cell Discovery. 2020. Vol. 6. Article number: 50.

About the authors

KERSHENGOLTS, Boris Moiseevich, Dr. Sci. (Biology), professor, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677890, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-8823-3981, kerschen@mail.ru;

SHASHURIN, Mikhail Mikhailovich, Cand. Sci. (Biology), senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk 677890, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-6785-1948, inwertaza@mail.ru;

SLEPTSOVA, Snezhana Spiridonovna, Dr. Sci. (Medicine), head of the department, Medical Institute of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, 27 Oyunskogo st., Yakutsk 677000, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-0103-4750; sssleptsova@yandex.ru;

VINOKUROVA, Maria Konstantinovna, Dr. Sci. (Medicine), deputy director for science, Research-Practice Center «Phthisiatry», Government-Financed Institution of the Sakha Republic (Yakutia), 93 Petra Alekseeva st., Yakutsk 677015, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-7673-3815, mkvin61@mail.ru;

KOLOSOVA, Olga Nikolaevna, Dr. Sci. (Biology), professor, senior researcher, Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, 41 Lenina pr., Yakutsk, 677890, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-6965-2600, SPIN 8510-3595, kololgonik@gmail.com.

Citation

Kershengolts B.M., Shashurin M.M., Sleptsova S.S., Vinokurova M.K., Kolosova O.N. Biological product from natural northern biological raw materials with possible use in the prevention, treatment and remission stages after bacterial and viral infections, including COVID-19 // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 120–135. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-120–135

УДК 581.192
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-136–143

Фенольные соединения хвои *Pinus pumila* (Pall.) Regel, произрастающей в Якутии

А.Г. Васильева*, Н.К. Чирикова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия
**kagamisatou@gmail.com*

Аннотация. *Кедровый стланик – сосна малорослая или карликовая (Pinus pumila (Pall.) Rgl), хвойный вечнозеленый представитель рода Сосна (Pinus) семейства Сосновые (Pinaceae). Pinus pumila в Республике Саха (Якутия) занимает значительные площади, хорошо известен благодаря своим кормовым характеристикам. В народной медицине северо-востока Азии ему приписывается большой ряд лечебных свойств, что позволяет отнести P. pumila к списку перспективных лекарственных растений. В ранее проведенных исследованиях чаще всего фокусировались на содержании терпенов, несмотря на высокую антиоксидантную активность, фенольные соединения в хвое P. pumila оставались без внимания. В данной работе рассмотрены результаты качественного и количественного анализа на содержание фенольных соединений в хвое Pinus pumila, произрастающей в Якутии. Образцы растительного сырья были собраны в Оймяконском районе в 2018 г. Для проведения анализа экстракцию сырья проводили 70%-м этиловым спиртом с последующей фильтрацией извлечения. Количественное содержание флавоноидов и фенольных соединений определяли на спектрофотометре СФ-2000. Количественное содержание флавоноидов в пересчете на стандартный образец рутина составило 0,376±0,065 %. Общее содержание фенольных соединений, определенных с использованием реагента Фолина–Чокальтеу, в 70%-м спиртовом извлечении хвои P. pumila составляет 32,01 %, в водном извлечении – 7,48 %.*

Ключевые слова: *Pinus pumila*, Якутия, фенольные соединения, флавоноиды, химический скрининг.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (FSRG-2020-0019), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-09-00361.*

Введение

Кедровый стланик (*Pinus pumila* (Pall.) Regel) – хвойный ветвистый стелющийся кустарник средней высотой в Якутии до 2–5 м, но способный достигать в оптимальных условиях больших размеров [1]. В силу своих защитных и кормовых свойств *Pinus pumila* считается одной из лесообразующих пород в Якутии [2]. Известно, что Якутия обладает 15220,8 тыс. га площади древостоев с доминированием *P. pumila* [3]. Кроме того, данный вид представляет собой перспективное лекарственное растительное сырье. Известно, что все органы и смола *P. pumila* широко используются как лекарственное сырье в народной медицине северо-востока Азии для лечения или профилактики широкого спектра заболеваний, включая дерматозы, фавус, ревматизм, туберкулез, артрит и невралгию [4, 5]. Также имеется лечебный эффект при ушибах и ранах [4]. Спиртовая настойка из хвои *P. pumila* помогает при туберкулезе [6]. Также настойка стланика применяется в качестве глистогонного, мочегонного, отхаркивающего и ранозаживляющего средств [7, 8]. Ранние исследования химического состава и фармакологической активности *P. pumila* в основном были посвящены изучению терпеновых соединений кедровых орехов [9, 10], хвои [10–12], шишек [13], коры [14–17]. Содержание эфирного масла в хвое составляет 2,33 мл/100 г, масло в основном состоит из терпеновых компонентов, таких как α-пинен и 3-карен [5, 6], однако химический состав часто различается в зависимости от условий прорастания и места локализации растения [6, 7]. Имеются сведения о наличии в коре редкого стробан дитерпеноида и тритерпеноидов серратанового типа [7]. Новейшие исследования свидетельствуют о наличии тритерпеновых гликози-

© Васильева А.Г., Чирикова Н.К., 2021

дов, которые впервые были выделены из внешней коры стебля *P. pumila* с помощью многократной колоночной хроматографии и вакуумно-жидкостной хроматографии. Также был сделан вывод, что содержание одного из выделенных тритерпеновых сапонинов ранее не было обнаружено ни в каком другом виде растений [17]. Согласно литературным данным, содержание эфирного масла в кедровых орехах может достигать 31,8 9 %±1,12 % и обладает сильной антиоксидантной и антирадикальной активностью [9]. Однако, несмотря на высокую антиоксидантную активность [18], фенольные соединения в хвое *P. pumila* оставались без внимания.

Целью работы является изучение качественного и количественного состава фенольных соединений хвои *P. pumila*, произрастающей в Якутии.

Материалы и методы

Растительное сырье. Образцы хвои *P. pumila* собирали в Оймяконском районе (Республика Саха (Якутия), 16.07.2018, 64°34′10″N, 143°14′13″E). Сбор, сушка и хранение растительного сырья осуществлялись согласно требованиям, описанным в ГФ XIII [19].

Получение извлечения для исследования состава фенольных соединений. Измельченное растительное сырье с размером частиц 1 мм, массой 1 г экстрагировали 100 мл 70%-м этиловым спиртом в течение 60 мин, при температуре ≈100 °C на водяной бане. Далее полученное извлечение фильтровали через бумажный фильтр, сырье промывали дважды 70%-м этиловым спиртом порциями и количественно переносили в мерную колбу вместимостью 100 мл. Объем колбы доводили до метки 70%-м этиловым спиртом. Для определения суммарного содержания фенольных соединений также было получено водное извлечение из хвои *P. pumila.* Измельченное растительное сырье массой 2 г помещали в коническую колбу вместимостью 500 мл, заливали 250 мл нагретой до кипения воды и кипятили с обратным холодильником на водяной бане в течение 30 мин.

Общие экспериментальные условия. Спектрофотометрические исследования проводили на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ Спектр, Санкт-Петербург). Для изучения химического состава исследуемого объекта были использованы методы качественного анализа на содержание дубильных веществ с применением железоаммонийных квасцов [19], методика качественного анализа на фенольные соединения с помощью гидроксида натрия [19], методика качественного анализа на флавоноиды с применением хлорида алюминия [19], методика количественного определения фенольных соединений с использованием реагента Фолина–Чокальтеу [20], методика количественного анализа на содержание дубильных веществ [19].

Методика определения количественного содержания суммы флавоноидов. Аналитическую пробу сырья измельчают до величины частиц, проходящих сквозь сито с отверстиями размером 2 мм. Около 1 г (точная навеска) измельченного сырья помещают в колбу со шлифом вместимостью 250 мл, прибавляют 100 мл спирта 70 % и взвешивают с погрешностью ±0,01 г. Колбу присоединяют к обратному холодильнику, нагревают на кипящей водяной бане в течение 60 мин, периодически встряхивая для смывания частиц сырья со стенок. Затем колбу с содержимым охлаждают до комнатной температуры, взвешивают и при необходимости доводят до первоначальной массы спиртом 70 %. Извлечение фильтруют через бумажный фильтр, смоченный тем же спиртом, отбрасывая первые 10 мл фильтрата (раствор А). 2 мл раствора А помещают в мерную колбу вместимостью 25 мл, прибавляют 5 мл 5%-го раствора хлорида алюминия в 70%-м этиловом спирте и доводят объем раствора тем же спиртом до метки, перемешивают и оставляют на 30 мин (раствор Б).

Оптическую плотность раствора Б измеряют через 30 мин на спектрофотометре при длине волны 410 нм в кювете с толщиной слоя 10 мм, используя в качестве раствора сравнения раствор, состоящий из 2 мл раствора А, доведенный спиртом 70 % до метки в мерной колбе вместимостью 25 мл. Параллельно определяли оптическую плотность раствора стандартного образца рутина (СОР). Суммарное содержание флавоноидов в пересчете на концентрацию рутина в абсолютно-сухом сырье в процентах (X) вычисляли по формуле

$$X = \frac{D \times K^v}{M} \times \frac{M_s}{D_s \times K_s^v} \times \frac{100}{100 - W} \times 100,$$

где D – оптическая плотность исследуемого раствора; D_s – оптическая плотность раствора стандартного образца рутина; M – масса сырья, г; M_s – масса стандартного образца рутина, г; K^v – коэффициент разбавления исследуемого раствора; K_s^v – коэффициент разбавления раствора стандартного образца рутина; W – потеря в массе при высушивании сырья, в %.

Раствор СОР готовили следующим образом. 0,05 г рутина, высушенного в течение 3 ч при температуре 130–135 °С, растворяли при нагревании в 70%-м этаноле в мерной колбе вместимостью 50 мл. После охлаждения до комнатной температуры объем раствора СОР доводили 70%-м этанолом до 50 мл. Срок годности раствора 30 суток при хранении в прохладном защищенном от света месте.

Статистическую обработку результатов исследований проводили согласно ОФС.1.1.0013.15 «Статистическая обработка результатов эксперимента» ГФ XIII с использованием ПО «Microsoft Excel», статистического пакета «Statistica 7.0» [19].

Результаты и обсуждение

При проведении качественного анализа с помощью гидроксида натрия установлено содержание фенольных соединений в *P. pumila*. По результатам качественного анализа с применением железоаммонийных квасцов подтверждено наличие дубильных веществ в исследуемом объекте. Качественный анализ с хлоридом алюминия показал наличие в хвое *P. pumila* флавоноидов.

В ходе количественного анализа общее содержание фенольных соединений с использованием реагента Фолина–Чокальтеу, в спиртовом извлечении хвои *P. pumila* составляет 32,01±0,05 %, в водном извлечении – 7,48±0,093 %. Низкое содержание фенольных соединений в водном извлечении (более чем в 4 раза) в исследуемом объекте скорее всего связано с нестабильным состоянием природных фенолов [21]. Также известно, что полифенолы лучше извлекаются водно-спиртовыми растворами, чем водой [21]. Суммарное содержание дубильных веществ в водном извлечении *P. pumila* составило 6,05±0,15 %. Известно, что фенольные соединения могут выступать в роли низкомолекулярных антиоксидантов. При низких температурах и водном стрессе у хвойных повышается концентрация фенольных соединений, что может служить индикационным признаком [22].

Количественное содержание фенольных соединений в хвое *P. pumila*

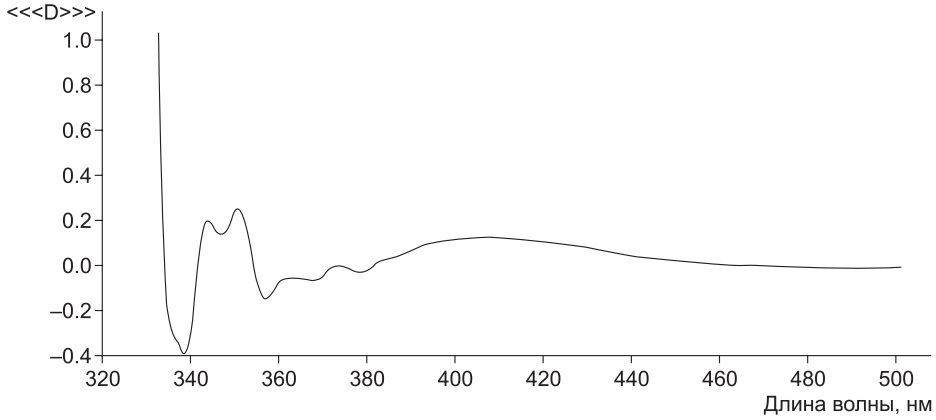
The quantitative content of phenolic compounds in the needles of *P. pumila*

Соединение Compound	Содержание, мг/г Content, mg / g
Процианидин B_1 Procyanidin B_1	2,67 ± 0,05
Катехин Catechin	1,14 ± 0,02
Эпикатехин Epicatechin	3,24 ± 0,06
Процианидин C_1 Procyanidin C_1	9,63 ± 0,19
Эпигаллокатехин Epigallocatechin	1,49 ± 0,02
Изокверцитрин Isoquercitrin	3,63 ± 0,07

Ранее нам удалось идентифицировать 12 соединений в спиртовом извлечении хвои *P. pumila, произрастающего в Верхоянском районе*, включая фенилпропаноиды и их гликозиды, флавоноиды как в форме гликозида, так и в форме агликона, катехин и процианидин, терпены (см. таблицу) [23]. Данные результаты подтверждают, что в якутских популяциях *P. pumila* преобладают компоненты дубильных веществ, процианидинов и флавоноидов.

Растения рода *Pinus* благодаря разнообразному составу фенолов [24–26] способны накапливать поллютанты и могут применяться в качестве показателя загрязнения среды [5, 27].

При спектрофотометрическом изучении 70%-го спиртового извлечения *P. pumila* в комплексе с хлоридом алюминия был выявлен максимум поглощения λ_{max} = 407 нм, что является близким по значению максимумом поглощения комплекса рутина с раствором хлорида алюминия (см. рисунок). Расчет содержания суммы флавоноидов проводился в пересчете на концентрацию рутина, так как их дифференциальные спектры поглощения совпадают по положению с максимумом ГСО рутина. Количественное содержание флавоноидов в пересчете на концентрацию рутина составляет 0,376±0,065 %. Известно о содержании в хвое *P. pumila* кверцетина и кемпферола [28]. В доступной литературе нет информации о количественном содержании флавоноидов в хвое *P. pumila*, однако имеются данные о содержании флавоноидов в пыльце кедрового стланика и показатели варьируют от 0,64 до 0,83 % [28]. Также известны данные о количественном содержании флавоноидов в хвое *Pinus pallasiana* D. Don в пересчете на концентрацию рутина (2,33±0,29 %) [29], что, несомненно, выше, чем в хвое *P. pumila*.



Дифференциальный спектр спиртового извлечения *P. pumila* в комплексе с хлоридом алюминия (III) (D – оптическая плотность; длина волны в нм).

Differential spectrum of the alcoholic extract of P. pumila in a complex with aluminum (III) chloride (D – optical density; wavelength in nm).

Выводы

Качественный анализ подтвердил наличие фенольных соединений (дубильных веществ, флавоноидов) в хвое *P. pumila*. В результате количественного анализа фенольных соединений с использованием реагента Фолина–Чокальтеу установлено, что их содержание в 70%-м спиртовом извлечении хвои *P. pumila* в 4 раза больше, чем в водном извлечении. Впервые определено количественное содержание флавоноидов методом дифференциальной спектрофотометрии в хвое *P. pumila*, произрастающего в Якутии. Суммарное содержание флавоноидов в исследуемом объекте составило 0,376±0,065 %.

Общее содержание фенольных соединений в спиртовом извлечении хвои якутской популяции *P. pumila* (32,01±0,05 %) выше, чем в спиртовом извлечении хвои *Pinus sylvestris* из Московской области (от 6,42 до 7,34 %) [30], хвои *Larix sibirica* из Томской области (10,5 %) [31]. В связи с этим хвоя *P. pumila* может служить перспективным лекарственным растительным сырьем в качестве антиоксидантного, адаптогенного и противовоспалительного средства.

Литература

1. *Чикидов И.И.* Особенности произрастания кедровостланиковых сообществ на Олекмо-Чарском нагорье Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, №. 3. DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-10

2. *Щербаков И.П.* Лесной покров Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1975. 344 с.

3. *Тагильцев Ю.Г., Выводцев Н.В., Колобанов К.А.* Кедровый стланик – перспективное пищевое и лекарственное растение Дальнего Востока // Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования. 2017. №. 12. С. 298–300.

4. *Shpatov A.V. et al.* Lipophilic extracts from needles and defoliated twigs of *Pinus pumila* from two different populations // Chemistry & Biodiversity. 2013. Vol. 10, No. 2. P. 198–208. DOI 10.1002/cbdv.201200009

5. *Maimoona A. et al.* Analysis of total flavonoids and phenolics in different fractions of bark and needle extracts of Pinus roxburghii and Pinus wallichiana // Journal of Medicinal Plants Research. 2011. Vol. 5, No. 13. P. 2724–2728. DOI 10.5897/JMPR.9000082

6. *Стародубов А.В., Домрачев Д.В., Ткачев А.В.* Состав эфирного масла кедрового стланика (*Pinus pumila*) из Хабаровского края // Химия растительного сырья. 2010. №. 1. С. 81–86.

7. *Langat M.K. et al.* Pumilol, a Diterpenoid with a rare strobane skeleton from *Pinus pumila* (Pinaceae) // Chemistry & Biodiversity. 2018. Vol. 15, No. 10. P. e1800056. DOI 10.1002/cbdv.201800056

8. *Chen G.H. et al.* Characterization of vasorelaxant principles from the needles of Pinus morrisonicola Hayata // Molecules. 2018. Vol. 23. No. 1. P. 86. DOI 10.3390/molecules23010086

9. *Chen F. et al.* An approach for extraction of kernel oil from Pinus pumila using homogenate-circulating ultrasound in combination with an aqueous enzymatic process and evaluation of its antioxidant activity // Journal of Chromatography A. 2016. Vol. 1471. P. 68–79. DOI 10.1016/j.chroma.2016.10.037

10. *Kurose K., Okamura D., Yatagai M.* Composition of the essential oils from the leaves of nine Pinus species and the cones of three of Pinus species // Flavour and fragrance journal. 2007. Vol. 22, No. 1. P. 10–20. DOI 10.1002/ffj.1609

11. *Domrachev D.V. et al.* Comparative analysis of volatiles from needles of five-needle pines of northern and

eastern Eurasia // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2012. Vol. 38, No. 7. P. 780–789. DOI 10.1134/S1068162012070059

12. *Yatagai M., Sato T.* Terpenes of leaf oils from conifers // Biochemical systematics and ecology. 1986. Vol. 14, No. 5. P. 469–478. DOI 10.1016/0305-1978(86)90004-9

13. *Li Z.J. et al.* Chemical constituents of Pinus pumila cones // Chemistry of Natural Compounds. 2019. Vol. 55, No. 6. P. 1187-1189. DOI 10.1007/s10600-019-02931-0

14. *Peng X. et al.* Chemical composition and antioxidant activity of essential oils from barks of Pinus pumila using microwave-assisted hydrodistillation after screw extrusion treatment // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 166. P. 113489. DOI 10.1016/j.indcrop.2021.113489

15. *Ралдугин В.А., Пентегова В.А.* Производные антикопаловой кислоты и другие новые соединения из живицы *Pinus pumila* // Химия природных соединений. 1983. № 2. С. 158–162.

16. *Хан В.А. и др.* Моно- и сесквитерпеноиды живиц *Pinus koraiensis* и *P. pumila*. Кристаллическая структура 1β, 4αH, 7αH, 10βH-гвайан-5α, 14-диола // Химия природных соединений. 1980. №. 4. С. 505–510.

17. *Liu K. et al.* A New Triterpene Glycoside from Pinus pumila // Chemistry of Natural Compounds. 2021. Vol. 57, No. 1. P. 115–119. DOI 10.1007/s10600-021-03294-1

18. *Huyut Z., Beydemir Ş., Gülçin İ.* Antioxidant and antiradical properties of selected flavonoids and phenolic compounds // Biochemistry Research international. 2017. Vol. 2017. P. 10. DOI 10.1155/2017/7616791

19. *Государственная* фармакопея Российской Федерации / МЗ РФ. XIII изд. Москва, 2015. 1470 с.

20. *Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventós R.M.* Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent // Methods in enzymology. Academic press. 1999. Vol. 299. P. 152–178. DOI 10.1016/S0076-6879(99)99017-1

21. *Мисин В.М. и др.* Измерение содержания фенолов в экстрактах лекарственных трав и их смесях амперометрическим методом // Химия растительного сырья. 2009. №. 4.

22. *Шенн И.В., Романова И.В.* Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений. Новосибирск: Наука, 1997.

23. *Васильева А.Г., Чирикова Н.К.* Биологически активные вещества хвои кедрового стланика (Pinus pumila (Pall.) Regel) // Медико-фармацевтический журнал Пульс. 2020. Т. 22, №. 7. С. 68–72. DOI 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-7-68-72

24. *Li Z. J. et al.* Isolation, separation, and structural elucidation of secondary metabolites of *Pinus pumila* // Chemistry of Natural Compounds. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 1128–1131. DOI 10.1007/s10600-020-03244-3

25. *Фуксман И.Л. и др.* Фенольные соединения хвойных деревьев в условиях стресса // Лесоведение. 2015. №. 3. С. 4–10.

27. *Сангов З.И., Хабибуллин Р.Э., Ямашев Т.А.* Оценка физико-химических свойств и антиоксидантной активности имбиря в зависимости от товарной формы и способа экстракции // Неделя науки СПбПУ. СПб., 2019. С. 24–27.

27. *Эрдынеева С.А., Ширеторова В.Г., Раднаева Л.Д.* Фармакогностическое исследование пыльцы *Pinus sylvestris* L. и *Pinus pumila* (Pall) Regel // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2021. Т. 24, №. 2. С. 29–34. DOI 10.29296/25877313-2021-02-05

28. *Виноградова Н.А., Попович В.П., Глухов А.З.* Фитохимическое изучение хвои и веток сосны крымской // Донецкие чтения 2017: Русский мир как цивилизационная основа научно-образовательного и культурного развития Донбасса. Донецк, 2017. С. 61–62.

29. *Нестеров Г.В., Бобкова Н.В., Кондрашев С.В.* Изучение качественного состава и суммарного содержания веществ фенольной природы в хвое сосны обыкновенной (*Pinus silvestris* L.). Shape* MERGEFORMAT //Евразийский союз ученых. 2019. № 2-2 (59). DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.59.41-43

30. *Транчук Н.В., Рощин В.И.* Групповой состав и фенольные соединения экстрактивных веществ древесной зелени лиственницы сибирской //Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты. 2015. Т. 20. С. 147.

Поступила в редакцию 19.05.2021
Принята к публикации 29.07.2021

Об авторах

ВАСИЛЬЕВА Айна Григорьевна, магистрант, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 677013, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия, https://orcid.org/0000-0002-2666-4345, kagamisatou@gmal.com;

ЧИРИКОВА Надежда Константиновна, доктор фармацевтических наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 677013, Якутск, ул. Кулаковского, 48, Россия, https://orcid.org/0000-0003-1130-3253, hofnung@mail.ru.

Информация для цитирования

Васильева А.Г., Чирикова Н.К. Фенольные соединения хвои *Pinus Pumila* (Pall.) Regel, произрастающей в Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 136–143. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-136–143

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-136–143

Phenolic compounds of the needles of *Pinus Pumila* (Pall.) Regel growing in Yakutia

A.G. Vasilyeva*, N.K. Chirikova

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
**kagamisatou@gmail.com*

Abstract. *Dwarf pine (Pinus pumila (Pall.) Rgl) is a coniferous evergreen representative of the Pinus genus, Pinaceae family. In the Republic of Sakha (Yakutia), Pinus pumila occupies substantial areas and is well known for its forage characteristics. In the traditional medicine of north-eastern Asia, a number of curative properties are assigned to this species, which allows us to relate P. pumila to the list of promising medicinal plants. Previous studies were focused on the content of terpenes, so that phenolic compounds in the needles of P. pumila were left without attention in spite of their high antioxidant activity. In the present paper, the results of qualitative and quantitative analysis for the concentrations of phenolic compounds in the needles of Pinus pumila growing in Yakutia are reported. The samples of plant material were collected in the Oymyakonsky district in 2018. For analysis, the raw material was extracted with 70 % ethanol with subsequent filtration of the extract. The quantitative content of flavonoids and phenolic compounds was determined using an SF-2000 spectrophotometer. The concentration of flavonoids, recalculated for the standard rutin sample, was 0.376±0.065 %. The total content of phenolic compounds determined using the Folin-Ciocalteu reagent was 32.01 % in the 70 % ethanol extract of the needles of P. pumila and 7.48 % in its aqueous extract.*

Keywords: *Pinus pumila*, Yakutia, phenolic compounds, flavonoids, chemical screening.

Acknowledgements. *The research was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of Russia (FSRG-2020-0019), and with the financial support from the Russian Foundation for Basic Research (project number 19-09-00361).*

References

1. *Chikidov I.I.* Osobennosti proizrastaniya kedrovostlanikovyh soobshchestv na Olekmo-charskom nagor'e Yakutii // Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. 2020. Vol. 25, No. 3. DOI 10.31242/2618-9712-2020-25-3-10

2. *Shcherbakov I.P.* Lesnoj pokrov Severo-Vostoka SSSR. Novosibirsk: Nauka, 1975. 344 p.

3. *Tagil'cev Yu.G., Vyvodcev N.V., Kolobanov K.A.* Kedrovyj stlanik-perspektivnoe pishchevoe i lekarstvennoe rastenie Dal'nego Vostoka // Novye i netradicionnye rasteniya i perspektivy ih ispol'zovaniya. 2017. No. 12. P. 298–300.

4. *Shpatov A.V. et al.* Lipophilic extracts from needles and defoliated twigs of Pinus pumila from two different populations // Chemistry & Biodiversity. 2013. Vol. 10, No. 2. P. 198–208. DOI 10.1002/cbdv.201200009

5. *Maimoona A. et al.* Analysis of total flavonoids and phenolics in different fractions of bark and needle extracts of Pinus roxburghii and Pinus wallichiana // Journal of Medicinal Plants Research. 2011. Vol. 5, No. 13. P. 2724–2728. DOI 10.5897/JMPR.9000082

6. *Starodubov A.V., Domrachev D.V., Tkachyov A.V.* Sostav efirnogo masla kedrovogo stlanika (Pinus pumila) iz Habarovskogo kraya // Himiya rastitel'nogo syr'ya, 2010. No. 1. P. 81–86.

7. *Langat M.K. et al.* Pumilol, a Diterpenoid with a rare strobane skeleton from *Pinus pumila* (Pinaceae) // Chemistry & Biodiversity. 2018. Vol. 15, No. 10. P. e1800056. DOI 10.1002/cbdv.201800056

8. *Chen G.H. et al.* Characterization of vasorelaxant principles from the needles of Pinus morrisonicola Hayata // Molecules. 2018. Vol. 23. No. 1. P. 86. DOI 10.3390/molecules23010086

9. *Chen F. et al.* An approach for extraction of kernel oil from Pinus pumila using homogenate-circulating ultrasound in combination with an aqueous enzymatic process and evaluation of its antioxidant activity // Journal of Chromatography A. 2016. Vol. 1471. P. 68–79. DOI 10.1016/j.chroma.2016.10.037

10. *Kurose K., Okamura D., Yatagai M.* Composition of the essential oils from the leaves of nine Pinus species and the cones of three of Pinus species // Flavour and fragrance journal. 2007. Vol. 22, No. 1. P. 10–20. DOI 10.1002/ffj.1609

11. *Domrachev D.V. et al.* Comparative analysis of volatiles from needles of five-needle pines of northern and eastern Eurasia // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2012. Vol. 38, No. 7. P. 780–789. DOI 10.1134/S1068162012070059

12. *Yatagai M., Sato T.* Terpenes of leaf oils from conifers // Biochemical systematics and ecology. 1986. Vol. 14, No. 5. P. 469–478. DOI 10.1016/0305-1978(86)90004-9

13. *Li Z.J. et al.* Chemical constituents of Pinus pumila cones // Chemistry of Natural Compounds. 2019. Vol. 55, No. 6. P. 1187-1189. DOI 10.1007/s10600-019-02931-0

14. *Peng X. et al.* Chemical composition and antioxidant activity of essential oils from barks of Pinus pumila using microwave-assisted hydrodistillation after screw extrusion treatment // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 166. P. 113489. DOI 10.1016/j.indcrop.2021.113489

15. *Raldugin V.A., Pentegova V.A.* Proizvodnye antikopalovoj kisloty i drugie novye soedineniya iz zhivicy Pinus pumila // Himiya prirodnyh soedinenij. 1983. No. 2. P. 158–162.

16. *Han V.A. i dr.* Mono-i seskviterpenoidy zhivic Pinus koraiensis i *P. pumila*. Kristallicheskaya struktura 1β, 4αH, 7αH, 10βH-gvajan-5α, 14-diola // Himiya Prirodnyh Soedinenij. 1980. No. 4. P. 505–510

17. *Liu K. et al.* A New Triterpene Glycoside from Pinus pumila // Chemistry of Natural Compounds. 2021. Vol. 57, No. 1. P. 115–119. DOI 10.1007/s10600-021-03294-1

18. *Huyut Z., Beydemir Ş., Gülçin İ.* Antioxidant and antiradical properties of selected flavonoids and phenolic compounds // Biochemistry Research international. 2017. Vol. 2017. P. 10. DOI 10.1155/2017/7616791

19. *Gosudarstvennaya* farmakopeya Rossijskoj Federacii / MZ RF. XIII izd. Moskva, 2015. 1470 p.

20. *Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventós R.M.* Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent // Methods in enzymology. Academic press. 1999. Vol. 299. P. 152–178. DOI 10.1016/S0076-6879(99)99017-1

21. *Misin V.M. i dr.* Izmerenie soderzhaniya fenolov v ekstraktah lekarstvennyh trav i ih smesyah amperometricheskim metodom // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2009. No. 4.

22. *Sudachkova N.E., Shein V.I., Romanova L.I.* Biohimicheskie indikatory stressovogo sostoyaniya drevesnyh rastenij. Novosibirsk: Nauka, 1997.

23. *Vasil'eva A.G., Chirikova N.K.* Biologicheski aktivnye veshchestva hvoi kedrovogo stlanika (Pinus pumila (Pall.) Regel) // Mediko-farmacevticheskij zhurnal Pul's. 2020. Vol. 22. No. 7. P. 68–72. DOI 10.26787/nydha-2686-6838-2020-22-7-68-72

24. *Li Z. J. et al.* Isolation, separation, and structural elucidation of secondary metabolites of *Pinus pumila* // Chemistry of Natural Compounds. 2020. Vol. 56. No. 6. P. 1128–1131. DOI 10.1007/s10600-020-03244-3

25. *Fuksman I.L. i dr.* Fenol'nye soedineniya hvojnyh derev'ev v usloviyah stressa // Lesovedenie. 2015. No. 3. P. 4–10.

26. *Erdyneeva S.A., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D.* Farmakognosticheskoe issledovanie pyl'cy *Pinus sylvestris* L. i *Pinus pumila* (Pall) Regel // Voprosy Biologicheskoj, Medicinskoj i Farmacevticheskoj Himii. 2021. Vol. 24. No. 2. P. 29–34. DOI 10.29296/25877313-2021-02-05

27. *Sangov Z.I., Habibullin R.E., Yamashev T.A.* Ocenka fiziko-himicheskih svojstv i antioksidantnoj aktivnosti imbirya v zavisimosti ot tovarnoj formy i sposoba ekstrakcii // Nedelya nauki SPbPU. SPb., 2019. P. 24–27.

28. *Vinogradova N.A., Popovich V.P., Gluhov A.Z.* Fitohimicheskoe izuchenie hvoi i vetok sosny krymskoj // Doneckie chteniya 2017: Russkij mir kak civilizacionnaya osnova nauchno-obrazovatel'nogo i kul'turnogo razvitiya Donbassa. Donetsk, 2017. P. 61–62.

29. *Nesterov G.V., Bobkova N.V., Kondrashev S.V.* Izuchenie kachestvennogo sostava i summarnogo soderzhaniya veshchestv fenol'noj prirody v hvoe sosny obyknovennoj (Pinus silvestris L.). Shape* MERGEFORMAT //Evrazijskij Soyuz Uchenyh. 2019. No. 2-2 (59). DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.59.41-43

30. *Tranchuk N.V., Roshchin V.I.* Gruppovoj sostav i fenol'nye soedineniya ekstraktivnyh veshchestv drevesnoj zeleni listvennicy sibirskoj // Fenol'nye Soedineniya: Fundamental'nye i Prikladnye Aspekty. 2015. Vol. 20. P. 147.

About the authors

VASILEVA, Aina Grigorievna, master's student, North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk 677013, Russia,
https://orcid.org/0000-0002-2666-4345, Scopus ID: 57217178425, kagamisatou@gmal.com;
CHIRIKOVA, Nadezhda Konstantinovna, Dr. Sci. (Pharmacy), professor, Ammosov North-Eastern Federal University, 48 Kulakovskogo st., Yakutsk 677013, Russia,
https://orcid.org/0000-0003-1130-3253, Researcher ID: D-8241-2016, hofnung@mail.ru.

Citation

Vasilieva A.G., Chirikova N.K. Phenolic compounds of the needles of *Pinus Pumila* (Pall.) Regel growing in Yakutia // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 136–143. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-136–143

ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ, 2021, Т. 26, № 3

УДК 582.34:581.92(571.65)
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-144–154

Флора мхов заповедника «Магаданский» и его окрестностей

Е.Ф. Вильк

Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, Магадан, Россия
kelizavetaova@mail.ru

Аннотация. *Продолжается исследование флоры мхов одного из крупнейших заповедников на Дальнем Востоке России. Впервые изучен моховый компонент наиболее труднодоступного Сеймчанского участка Магаданского государственного природного заповедника. Территория до настоящего времени считается слабо изученной в бриофлористическом отношении, что затрудняет проведение таксометрической ревизии флоры мхов России. Исследование проводилось в течение двух полевых сезонов (2019 и 2020 гг.) на правом, заповедном берегу р. Колыма и на ее левобережье. Выявлены новые для Магаданской области виды мхов, уточнены места произрастания редких видов, выявлено состояние их популяций. Общий список включает 148 видов, из них 102 выявлены на территории кластера. 30 видов впервые приводятся для территории заповедника в целом. Составлен аннотированный список, включающий данные о местонахождениях и встречаемости видов. При выполнении работы использованы общепринятые в современной бриологии методы исследований. Обработка материалов проводилась в лаборатории ботаники ИБПС ДВО РАН, проверка сложных в таксометрическом отношении видов – в БИН РАН. Собранные образцы хранятся в MAG, дублеты в LE. Обсуждаются особенности выявленной флоры. Даны подробный анализ бриофлоры, характеристика мохового покрова в основных типах растительности, предложены практические рекомендации.*

Ключевые слова: биоразнообразие, заповедник, мхи, Магаданская область.

Благодарности. *Работа выполнена в рамках госзадания ИБПС ДВО РАН (№ АААА-А17-117122590002-0) и при финансовой поддержке внутреннего конкурса института для молодых ученых. Выражаю признательность сотрудникам лаборатории лихенологии и бриологии БИН РАН О.М. Афониной, Е.Ю. Кузьминой за консультирование. Благодарю дирекцию заповедника «Магаданский», заместителя директора И.Г. Утехину, а также инспекторов Сеймчанского участка В.Н. Тимченко, В.С. Аммосова, А.И. Паршина, Г.М. Бута и Ю.И. Паршина и лихенолога ИБПС Е.В. Желудеву за содействие и помощь в проведении полевых исследований.*

Введение

Государственный природный заповедник «Магаданский» занимает 9-е место по площади (883 817 га) среди особо охраняемых природных территорий России. Он представляет собой пять разрозненных территорий, объединенных в четыре административных участка [1], на которых представлена значительная часть ландшафтного и биологического разнообразия региона. Три кластера находятся на побережье Охотского моря – Кава-Чёломджинский, Ямский, Ольский и один – Сеймчанский – в континентальной части Магаданской области.

Флора мхов Магаданского заповедника изучена явно недостаточно: до начала наших исследований, общий список, на основе литературных данных [2–5], включал 93 вида. На Сеймчанском участке бриофлористические исследования не проводились. В работе А.Н. Беркутенко с соавторами [6] для него приводится всего три вида мохообразных – *Pleurozium schreberi*, *Aulacomnium turgidum* и *Ptilidium ciliare*. Ближайшие точки сбора мхов находятся на расстоянии от 30 до 100 км от границ участка [7, 8].

Природные условия. Сеймчанский участок (117 839 га) находится на левом берегу р. Колыма в Сеймчано-Буюндинской низменности, в 100 км ниже пос. Сеймчан, между устьями рек Суксукан и Балыгычан. Согласно Б.А. Юрцеву [9], данная территория относится к Верхнеколымской континентальной подпровинции Северо-Охотской провинции бореальной флористической области, а по районированию А.П. Хохрякова [10] – к Колымскому флористическому округу.

© Вильк Е.Ф., 2021

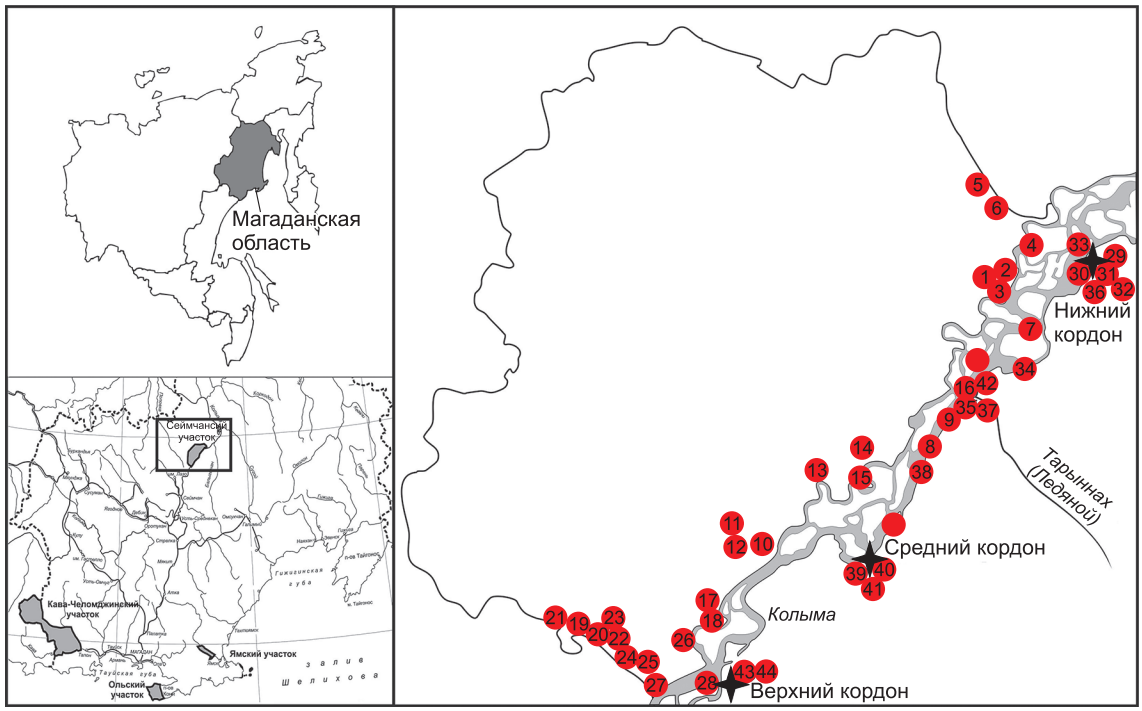
Рельеф участка в основном равнинный, только на западной и северной границах имеются небольшие низкогорья с отметками до 800 метров, сложенные триасовыми и юрскими глинистыми сланцами, песчаниками и алевритами. Основными ландшафтно-геоморфологическими элементами территории участка выступают пойма, надпойменные террасы и склоны сопок [11]. На террасах и возвышениях развита вечная мерзлота [12]. Климат участка резко-континентальный с долгими, холодными зимами и коротким, жарким летом. Среднегодовая температура отрицательная –12,2 °С, среднемесячная января варьирует от –35 до –39 °С, средняя температура июля – 12–18 °С, максимальная может достигать 35–37 °С. Годовое количество осадков – 286 мм.

В целом участок можно охарактеризовать как относительно однообразный в плане ландшафтов и растительности [13]. Основную часть (65 %) занимают зональные лиственничные леса и редколесья [14]. В кустарниковом ярусе представлены *Betula middendorffii*, *Pinus pumila*, *Rosa acicularis* и ивы. Преобладающие кустарнички – *Ledum palustre*, *Vaccinium uliginosum*, *Vaccinium vitis-idaea*; травянистый покров представлен в основном *Calamagrostis langsdorffii*, *Chamaenerion angustifolium*, *Arctagrostis latifolia* и разнообразными осоками с примесью хвоща. Моховой покров хорошо развит, проективное покрытие достигает 60 %, доминирующими видами выступают *Hylocomium splendens, Pleurozium schreberi, Polytrichum commune, P. juniperinum, P. strictum*. В основании лиственниц обильно произрастают *Sanionia uncinata, Sciuro-hypnum reflexum* и *Pylaisia polyantha.* На пойменных террасах представлены кустарниково-разнотравно-злаковые тополево-чозениевые леса. Древесный ярус составляют *Chosenia arbutifolia, Populus suaveolens* и разнообразные ивы (*Salix schwerinii*, *S. boganidensis*, *S. rorida)*. В подлеске господствуют ивы, *Sorbaria sorbifolia, Rosa acicularis* и *Ribes triste*. В травяном покрове доминируют *Equisetum pratense*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Carex pallida* и др. [14]. Моховой покров представлен слабо из-за конкуренции травянистых растений, в основном встречаются *Polytrichum juniperinum*, *Pseudobryum cinclidioides*; во влажных понижениях – виды рода *Sphagnum*. На коре поваленных деревьев обычны *Sanionia uncinata, Dicranum fuscescens, Oncophorus elongatus, Plagiothecium* sp. и печеночники. На высокой пойме можно отметить смешанные белоберезово-лиственничные (*Betula platyphylla*) кустарниково-разнотравные леса, где в моховом покрове доминируют *Dicranum elongatum, Hylocomium splendens, Polytrichum commune* и *P. jensenii*. В долине реки и на небольших островах преобладают ивовые и ивово-тополевые закустаренные леса, часто затапливаемые. Моховой покров беден, представлен в основном *Pohlia nutans, Calliergonella lindbergii, Straminergon stramineum* и вдоль берега обычны *Philonotis fontana и Climacium dendroides.* На низкой пойме образуются кочкарные осоково-моховые болота. Кустарнички встречаются редко – в основном ивы (*Salix saxatilis, S. krylovii*), *Betula exilis* и *Ledum palustre*, в травостое господствуют различные виды осок. Среди мхов (проективное покрытие 20–30 %) большую роль играют виды рода *Sphagnum, Aulacomnium palustre, Straminergon stramineum* и *Warnstorfia exannulata.* Также отмечены кустарничково-лишайниковые каменистые тундры, где моховой покров слабо развит, в основном встречаются *Andreaea rupestris, Polytrichum piliferum, Abietinella abietina, Racomitrium lanuginosum* и *Pohlia cruda*. На галечниках и песчаных наносах мхов минимальное число – в основном *Polytrichum piliferum и Pohlia sp*.

Материалы и методы

Сбор материала проводился в течение двух полевых сезонов маршрутным методом. В 2019 г. образцы отбирались в окрестностях Сеймчанского кластера – вдоль правого берега р. Колыма, в том числе вокруг трех кордонов (Нижний, Средний и Верхний); а в 2020 г. – на заповедном берегу и на островах в охранной зоне (см. рисунок). Было собрано около 400 образцов. Обработка материала проводилась в лаборатории ботаники Института биологических проблем Севера ДВО РАН (ИБПС ДВО РАН, г. Магадан). Некоторые сложные в таксономическом отношении виды определялись в Ботаническом институте им. В.Л. Комарова РАН (г. Санкт-Петербург) под руководством д.б.н. О.М. Афониной. Собранные образцы хранятся в гербарии ИБПС (MAG), часть дублетов передана в гербарий БИН РАН (LE). Все сборы сделаны автором.

Места сбора образцов: а) ***левый берег р. Колыма (заповедная территория)***: **1** – окр. Нижнего кордона (далее – НК), лиственничник с березой плосколистной, закустаренный, 63°50.742′N, 153°28.338′E, 08.07.2020; **2** – окр. НК, заболоченный кочкарный ерник, 63°50.762′N, 153°28.345′E, 08.07.2020; **3** – окр. НК, заболоченный кочкарный сфагновый голубичник, 63°49.837′N,



Места сбора мхов.

Collecting sites of mosses.

153°29.788′E, 08.07.2020; **4** – остров в долине Колымы, пойменный тополево-чозениевый лес с редким кедровым стлаником, 63°51.315′N, 153°31.003′E, 08.07.2020; **5** – прав. берег р. Орлупча, лиственничный лес кустарничково-лишайниково-моховый, 63°52.932′N, 153°29.716′E, 09.07.2020; **5.1** – заболоченный ерник из березки Миддендорфа, мохово-лишайниковый, 63°52.932′N, 153°29.716′E, 09.07.2020; **6** – на слабозадернованном песчаном берегу реки, 63°52.769′N, 153°29.957′E, 09.07.2020; **7** – остров в долине Колымы, ивняк, 63°47.956′N, 153°32.131′E, 10.07.2020; **10** – окр. Среднего кордона (далее – СК), берег р. Колыма, березовый хвощево-злаковый лес, 63°40.246′N, 153°10.040′E, 11.07.2020; **11** – окр. СК, заболоченный кустарничковый кочкарник, осоково-пушицевый, 63°40.757′N, 153°08.240′E, 11.07.2020; **12** – окр. СК, тополево-чозениевый лес, заливаемый, кустарниковый, злаково-хвощевый, 63°41.870′N, 153°18.355′E, 12.07.2020; **13** – окр. СК, березово-тополевый лес разнотравный, 63°41.957′N, 153°19.948′E, 12.07.2020; **14** – окр. СК, тополево-чозениевый лес, смородиново-шиповниковый разнотравно-хвощевый, 63°41.954′N, 153°19.945′E, 12.07.2020; **16** – окр. СК, заросли ольховника с редкими старыми лиственницами, злаково-хвощевые, 63°36.722′N, 153°06.597′E, 13.07.2020; **17** – окр. СК, лиственничник с подлеском из рябины, ольховника и смородины, хвощевый, 63°36.721′N, 153°06.529′E, 13.07.2020; **18** – окр. Верхнего кордона (далее – ВК), ручей Восходный, 63°35.835′N, 152°58.923′E, 14.07.2020; **19** – замшелый скальный берег старого русла руч. Восходный, 63°35.846′N, 152°58.746′E, 14.07.2020; **20** – окр. ВК, лиственничник кустарниковый, бруснично-моховый, 63°35.739′N, 152°58.987′E, 14.07.2020; **21** – окр. ВК, заболоченный ерниковый лиственничник, 63°35.468′N, 152°59.073′E, 14.07.2020; **22** – окр. ВК, кочкарное осоковое болото, с редкими лиственницами и кустами ивы, 63°35.469′N, 152°58.921′E, 14.07.2020; **23** – окр. ВК, лиственничник лишайниковый, 63°35.289′N, 152°59.155′E, 14.07.2020; **24** – окр. ВК, сырой заболоченный кочкарный лиственничник с березой Мидд., 63°35.156′N, 152°59.333′E, 14.07.2020; **25** – окр. ВК, заболоченный кочкарник с редкими лиственницами, березой Мидд. и ивой, осоковый, 63°35.077′N, 152°59.499′E, 14.07.2020; **26** – окр. ВК, берег р. Колыма, старый лиственничник кустарниково-кустарничковый разнотравно-хвощевый, 63°34.778′N, 152°59.734′E, 14.07.2020; **27** – окр. ВК, березовый лес с участием лиственницы кустарниковый, раз-

нотравно-хвощевый, 63°35.568′N, 153°02.971′E, 15.07.2020; **28** – окр. ВК, пойменный тополево-чозениевый лес кустарниковый, хвощевый, 63°33.631′N, 153°02.896′E, 15.07.2020;

б) правый берег р. Колыма (не заповедная территория): **8** – окр. устья руч. Ледяной, каменистые лишайниковые россыпи с кедровым стлаником, 63°43.893′N, 153°23.595′E, 10.07.2020; **8.1** – окр. устья руч. Ледяного, долина ручья, по распадку, 63°43.893′N, 153°23.595′E, 10.07.2020; **9** – скалистый правый берег р. Колыма, у воды, 63°44.103′N, 153°23.889′E, 10.07.2020; **29** – НК, лиственничник с березой плосколистной вдоль реки, злаково-хвощевый, 63°50.427′N, 153°36.530′E, 03.07.2019; **30** – НК, ивняк в пойме, 63°50.438′N, 153°36.427′E, 03.07.2019; **31** – НК, лиственничник с примесью березы, голубично-пижмовый зеленомошный, 63°50.427′N, 153°36.524′E, 04.07.2019; **32** – НК, березняк шиповниковый злаково-хвощевый, 63°50.427′N, 153°36.524′E, 04.07.2019; **33** – НК, пойма реки, березняк с лиственницей, кустарниковый разнотравно-злаково-хвощевый, 63°50.427′N, 153°36.524′E, 05.07.2019; **34** – НК, тундровая пойменная терраса, кустарниково-кустарничковая, лишайниковая, 63°50.427′N, 153°36.524′E, 05.07.2019; **35** – левый берег ручья Ледяной, основание сопки, выход камней, 63°40.282′N, 153°19.575′E, 05.07.2019; **36** – НК, пойма реки, тополево-чозениевый лес шиповниково-ивовый, злаково-разнотравный, 63°44.984′N, 153°25.361′E, 06.07.2019; **37** – устье руч. Ледяной, скалистый склон сопки, 63°44.984′N, 153°25.361′E, 06.07.2019; **38** – НК, на камнях в ручейке, впадающем в Колыму, 63°44.508′N, 153°25.070′E, 07.07.2019; **39** – СК, небольшая осоково-пушицево-сфагновая болотина, 63°44.508′N, 153°25.070′E, 08.07.2019; **40** – СК, редкостойная лиственничная тундра с березкой Мидд., пижмово-осоковая, 63°38.898′N, 153°16.839′E, 09.07.2019; **41** – СК, по борту ручья Малый Суксукан, 63°39.449′N, 153°17.370′E, 09.07.2019; **42** – правый берег руч. Ледяного, останцы на крутом склоне сопки, 63°38.898′N, 153°16.834′E, 10.07.2019; **43** – ВК, озеро в 2 км от кордона посреди лиственничника, 63°33.366′N, 153°02.980′E, 11.07.2019; **44** – ВК, окраина небольшого озера, 63°39.705′N, 153°17.737′E, 12.07.2019.

Результаты

В результате проведенных работ для исследуемой территории выявлено 148 видов мхов, из них – 102 для заповедной части и 109 – для окрестностей заповедника (правый берег р. Колыма).

В приведенном ниже аннотированном списке номенклатура видов дана согласно Ignatov et al. [15] и Hodgetts et al. [16], с учетом последних таксономических обработок [17–19]. Для каждого вида указаны сведения о встречаемости: com – повсеместно, вид встретился более чем в 8 точках; fr – часто, в 6–8 точках; sp – изредка, в 4–5 точках, rar – редко, в 2–3 и un – единственное местонахождение. Также приводятся субстрат и местообитание; наличие спорофитов отмечено знаком S+. Звездочки (*) перед названием вида означают единственное местонахождение для территории заповедника.

Abietinella abietina (Hedw.) M. Fleisch. – rar. **19, 37, 42.** На почве сухих склонов, на камнях и скале.

Amblystegium serpens (Hedw.) Bruch, Schimp. et W. Gümbel – rar. **5, 28, 30.** Камни вдоль ручья, на почве между корней ивы, на стволах упавших деревьев.

Andreaea rupestris Hedw. – un. **35**. На камнях вдоль берега; S+.

Aquilonium plicatulum (Lindb.) Hedenäs, Schlesak, D. Quandt (*Stereodon plicatulus* Lindb.) – un. **8**. На почве под кустом кедрового стланика.

Aulacomnium palustre (Hedw.) Schwägr. – sp. **1, 10, 11, 21, 31**. На влажной почве в лиственничниках, на заболоченных участках, реже на опаде и гниющей древесине.

A. turgidum (Wahlenb.) Schwägr. – fr. **1, 5, 6, 24, 29, 31, 40, 44**. На почве, по окраинам болот, на поваленной лиственнице; S+.

Bartramia ithyphylla Brid. – un. **42.** В трещине скалы у верхней границы леса.

Brachythecium erythrorrhizon Bruch, Schimp. et W. Gümbel – un. **27**. На коре упавшей лиственницы.

B. rivulare Bruch, Schimp. et W. Gümbel – un. **11**. На коре упавшего дерева.

B. turgidum* (Hartm.) Kindb. – un. **23. На почве в лиственничнике.

Bryoerythrophyllum ferruginascens (Stirt.) Giacom. – rar. **4, 9, 30.** На влажной почве вдоль водотоков, на стволе упавшей чозении.

B. recurvirostrum (Hedw.) P.C. Chen – rar. **4, 19, 38.** На камнях, на упавшем стволе тополя и корне чозении; S+.

Bryum argenteum Hedw. – un. **4**. На корне поваленного тополя.

B. pseudotriquetrum (Hedw.) P. Gaertn., B. Mey. et Scherb. – sp. **12**. На влажной почве вдоль рек и ручьев.

B. rutilans Brid. – un. **6**. По берегу реки.

Calliergon cordifolium (Hedw.) Kindb. – sp. **6, 24, 35, 44**. На влажной почве и вдоль ручьев.

C. giganteum (Schimp.) Kindb. – sp. **6, 18, 29, 39, 41.** На берегу ручья и илистом берегу реки.

C. megalophyllum Mikut. – rar. **6, 44.** На почве по берегам водоемов и в воде.

Calliergonella lindbergii (Mitt.) Hedenäs – fr. **3, 6, 14, 18, 28, 35, 41.** На камнях и влажной почве по берегам ручьев и рек.

Campylophyllopsis sommerfeltii (Myrin) Ochyra – rar. **6, 16, 42.** Заросшие мхом камни и древесина поваленной лиственницы.

Ceratodon purpureus (Hedw.) Brid. – com. **1, 2, 4, 8, 16, 20, 28, 29, 31.** На почве в лесном поясе и на открытых освещенных участках в различных местообитаниях; S+.

Climacium dendroides (Hedw.) F. Weber et D. Mohr – rar. **30, 41.** На влажной почве в ивняках, пойменных тополевниках и лиственничниках.

Cnestrum schistii (F. Weber et D.Mohr) I. Hagen – rar. **19, 37.** На камнях, каменистых склонах и скалах; S+.

Coscinodon hartzii C.E.O. Jensen – un. **35**. На сухих освещенных скалах и камнях, S+.

Cratoneuron filicinum* (Hedw.) Spruce – un. **6. На влажной почве по берегу реки, растет среди *Calliergon giganteum* и *Hygrohypnella ochracea.*

Cynodontium strumiferum (Hedw.) Lindb. – sp. **18, 19, 35, 42.** На сухих каменистых склонах, выходах камней; S+.

C. tenellum (Schimp.) Limpr. – sp. **8, 18, 35, 37.** На каменистом склоне сопки, на почве вдоль ручья и в ложбине в лиственничнике; S+.

Cyrtomnium hymenophylloides (Huebener) T.J. Kop. – un. **19**. Образует большую дерновину в основании скалистого берега ручья.

Dichodontium pellucidum* (Hedw.) Schimp. – rar. **9, 38. На камнях и по берегу ручья.

Dicranella cerviculata (Hedw.) Schimp. – rar. **29, 34.** На почве и камнях, S+.

D. crispa (Hedw.) Schimp. – rar. **18, 19.** Скалистый берег ручья и на почве под корнями деревьев; S+.

Dicranum acutifolium (Lindb. et Arnell) C.E.O. Jensen – sp. **1, 5, 10, 19, 37.** На почве, гниющей древесине, гумусированной поверхности и в расщелинах камней во влажных местообитаниях.

D. bardunovii* Tubanova et Ignatova – rar. **27, 35. На почве и гнилой древесине упавшего тополя.

D. elongatum Schleich. ex Schwägr. – fr. **6, 18, 35, 36, 38, 42, 44.** На почве, в основании стволов деревьев, на гнилой древесине; на сфагновых болотах.

D. flexicaule Brid. – rar. **10, 39, 40.** На почве в березняке и редкостойном лиственничнике, на валеже.

D. fragilifolium Lindb. – rar. **8.1, 18, 35.** На почве по склону сопки и гумусированных камнях по берегу ручья.

D. fuscescens Turner – rar. **31, 35.** На почве в лиственничнике и в ивняке.

D. majus Turner – sp. **5, 29, 41, 44.** На почве в лиственничных лесах и редколесьях.

D. pacificum Ignatova et Fedosov – un. **8.1**. На гнилой древесине ольховника.

D. undulatum Schrad. ex Brid. – sp. **5, 10, 21, 23, 36.** На почве и в основании лиственницы.

Didymodon ferrugineus* (Schimp. ex Besch.) M.O. Hill – un. **19. На камнях по старому руслу ручья.

D. validus* Limpr. – un. **19. На камнях замшелого берега ручья.

Distichium capillaceum (Hedw.) Bruch, Schimp. et W. Gümbel – rar. **19, 35.** На мелкоземе в углублении скалы и между камнями вдоль реки.

Drepanium fastigiatum* (Hampe) C.E.O. Jensen (*Drepanium recurvatum* (Lindb. et Arnell) G. Roth) – un. **19. На камнях.

Drepanocladus aduncus (Hedw.) Warnst. – fr. **4, 5, 10, 17, 43, 44.** На почве, во влажных понижениях, на валеже и в воде по берегу небольшого озера.

D. polygamus* (Schimp.) Hedenäs – rar. **3, 4. На влажной почве, погружен в воду между кочек по болоту и на вывороте корня дерева.

Encalypta procera Bruch – un. **19**. На камнях старого русла ручья; S+.

E. rhaptocarpa Schwägr. – un. **9**. Скалистый берег реки; S+.

Eurhynchiastrum pulchellum (Hedw.) Ignatov et Huttunen – sp. **4, 6, 19, 36, 42.** В основании стволов чозении, на влажной почве, валеже.

Fissidens bryoides Hedw. – rar. **10, 30.** На влажной почве под кустом шиповника и между корней ивы.

Flexitrichum flexicaule (Schwägr.) Ignatov et Fedosov – un. **35**. На камнях в ивняке.

Fontinalis antipyretica Hedw. – un. **18**. На камнях в ручье.

F. perfida Cardot – rar. **10, 18.** В ручьях, обрастает камни.

Funaria hygrometrica* Hedw. – un. **17. На почве в лиственничнике; S+.

Grimmia donniana Sm. – rar. **35, 42.** Скалистый склон сопки и на камнях.

G. jacutica Ignatova, Bednarek-Ochyra, Afonina et Muñoz – un. **42**. Останцы на склоне сопки.

G. longirostris Hook. – rar. **35, 37, 42.** Скала по склону сопки и на останцах; S+.

G. reflexidens Müll. Hal. – un. **35.** Скалистый склон сопки.

Hamatocaulis vernicosus* (Mitt.) Hedenäs – un. **26. Во влажном понижении в лиственничнике.

Hedwigia czernyadjevae Ignatova, Ignatov et Fedosov – un. **42**. Останцы на крутом склоне сопки.

Hygrohypnella ochracea (Turner ex Wilson) Ignatov et Ignatova – sp. **6, 9, 18, 38**. На камнях в ручье и вдоль берега.

H. polare (Lindb.) Ignatov et Ignatova – un. **38**. На камнях в ручейке.

Hylocomium splendens (Hedw.) Bruch, Schimp. et W. Gümbel – rar. **20, 29.** На почве в лиственничниках.

Hypnum cupressiforme Hedw. – un. **37**. На гумусированных камнях.

Isopterygiopsis alpicola (Lindb. et Arnell) Hedenäs – un. **42**. В расщелине останца на крутом склоне сопки.

I. pulchella (Hedw.) Z. Iwats. – sp. **5, 18, 19, 42.** На упавшей ветке лиственницы, на камнях и почве.

Leptobryum pyriforme (Hedw.) Wilson – sp. **10, 16, 28, 29, 30.** Между корней ивы, на древесине упавшего тополя и на почве; S+.

Leptodictyum riparium (Hedw.) Warnst. – un. **30**. На стволе поваленной ивы.

Lewinskya elegans (Schwägr. ex Hook. et Grev.) F.Lara, Garilleti et Goffinet – un. **42**. В расщелине останца на крутом склоне сопки; S+.

Mnium blyttii* Bruch, Schimp. et W. Gümbel – un. **18. По берегу ручья.

M. thomsonii Schimp. – rar. **18**. На почве вдоль ручья и на стволе упавшего дерева.

Myurella julacea (Schwägr.) Bruch, Schimp. et W. Gümbel – rar. **9, 19**. На почве вдоль скалистого берега ручья и под корнями деревьев.

M. sibirica* (Müll. Hal.) Reimers – un. **19. Обрастает камни на скалистом берегу старого русла ручья.

M. tenerrima* (Brid.) Lindb. – un. **19. На камнях.

Myuroclada longiramea (Müll. Hal.) M. Li, Y.-F. Wang, Ignatov et Huttunen – un. **6**. На влажной почве.

Myrinia pulvinata (Wahlenb.) Schimp. – rar. **10, 29, 30**. Сухая ветка шиповника, на поваленном стволе ивы, на почве.

Neckera oligocarpa Bruch in Ångström – un. **42**. В лесном поясе на камнях по склону сопки.

Niphotrichum canescens (Hedw.) Bednarek-Ochyra et Ochyra – un. **36**. На почве на открытом освещенном участке.

Nyholmiella obtusifolia* (Brid.) Holmen et E.Warncke – un. **12. На стволе тополя.

Oligotrichum falcatum Steere – rar. **35, 38.** Между камней по берегам водотоков.

Oncophorus elongatus (I. Hagen) Hedenäs – com. **4, 10, 14, 16, 19, 27, 28, 29, 30, 40.** На почве и камнях, в основании лиственницы, на древесине поваленных деревьев; S+.

Orthotrichum cf. anomalum* Hedw. – un. **19. На камнях; S+.

Philonotis fontana (Hedw.) Brid. – rar. **37, 41.** На влажной почве и по берегам водоемов.

Plagiomnium curvatulum* (Lindb.) Schljakov – rar. **2, 31. Во влажном понижении в лиственничнике и между кочек болота.

P. cuspidatum (Hedw.) T.J. Kop. – un. **35**. На камнях вдоль берега реки.

P. ellipticum (Brid.) T.J. Kop. – sp. **5, 29, 30, 44.** На почве, затопленном стволе поваленного дерева и по берегу озера.

Plagiothecium cavifolium (Brid.) Z. Iwats. – un. **37**. На камнях.

P. svalbardense Frisvoll – rar. **8.1, 18, 29.** На почве, в основании стволов деревьев и на коре поваленных деревьев.

Platydictya jungermannioides (Brid.) H.A. Crum – un. **19**. Обрастает камни на скалистом берегу старого русла ручья, растет вместе с *Myurella sibirica* и *M. tenerrima.*

Platyhypnum duriusculum (De Not.) Ochyra – un. **38**. На камнях в ручье.

Pleurozium schreberi (Brid.) Mitt. – fr. **1, 5, 10, 17, 23, 29, 40.** На почве в различных типах леса.

Pogonatum dentatum (Brid.) Brid. – rar. **8, 9, 38.** На почве и на камнях вдоль ручьев.

Pohlia cruda (Hedw.) Lindb. – fr. **9, 18, 19, 30, 37, 42.** На почве и мелкоземе у скал.

P. nutans (Hedw.) Lindb. – com. **1, 4, 5, 8, 10, 19, 27, 29, 35, 39.** На почве, в основании деревьев и валеже в разных типах растительных сообществ; S+.

P. proligera (Kindb.) Lindb. ex Broth. – sp. **10, 16, 18, 30, 44.** На влажной почве под корнями деревьев.

P. wahlenbergii (F. Weber et D. Mohr) A.L. Andrews – rar. **8.1, 42.** На гнилой древесине ольховника и на влажной почве вдоль ручья.

Polytrichastrum alpinum (Hedw.) G.L. Sm. – sp. **8.1, 9, 38, 42.** Между камней в лесном поясе, на почве под корнями деревьев.

Polytrichum commune Hedw. – sp. **5, 6, 10, 16, 32.** На почве в лиственничных и березовых лесах и кустарниково-разнотравных редколесьях.

P. jensenii I. Hagen – sp. **20, 26, 31, 39, 44.** По окраинам болот и на почве в лиственничниках.

P. juniperinum Hedw. – fr. **1, 4, 8, 28, 31, 32, 33, 42.** На почве, по берегам ручьев и рек.

P. longisetum Sw. ex Brid. – rar. **16, 30, 33.** На почве в лесах.

P. piliferum Hedw. – sp. **1, 4, 42.** Между камней и на почве в лишайниковой тундре.

P. strictum Brid. – fr. **1, 5, 10, 23, 31, 35, 39.** В напочвенном покрове в лиственничниках, лиственничных редколесьях, березняках, на болотах и по берегам ручьев.

Pseudobryum cinclidioides (Huebener) T.J. Kop. – rar. **2**. Между кочек болота.

Pseudohygrohypnum subeugyrium* (Renauld et Cardot) Ignatov et Ignatova – un. **18. На влажной почве между корней кустарников.

Pylaisia polyantha (Hedw.) Schimp. – sp. **4, 14, 29, 30, 35.** В основании стволов и на поваленных деревьях; S+.

Racomitrium lanuginosum (Hedw.) Brid. – rar. **42**. Очень часто на мелкоземе по склону сопки.

Rhytidium rugosum (Hedw.) Kindb. – sp. **2, 23, 37.** На почве в лиственничниках и в основании каменистого склона сопки.

Sanionia uncinata (Hedw.) Loeske – com. **2, 3, 10, 11, 23, 27, 28, 31, 35, 40.** На почве, в основаниях деревьев, на валеже, на камнях и валунах в лесном поясе; S+.

Schistidium liliputanum (Müll. Hal.) Deguchi – un. **42**. На скалистом обнажении по берегу.

S. pulchrum H.H. Blom – rar. **9, 37, 42.** На скалистом обнажении по берегу реки и на камнях.

S. rivulare (Brid.) Podp. – rar. **9, 37, 38.** На камнях в ручьях и по берегу; S+.

S. tenuinerve* Ignatova et H.H. Blom – rar. **4, 9. На заливаемых водой камнях по берегу реки и на корне поваленного дерева.

Sciuro-hypnum latifolium (Kindb.) Ignatov et Huttunen – un. **27**. В основании ствола березы плосколистной.

S. reflexum (Starke) Ignatov et Huttunen – rar. **31, 41.** В основании стволов лиственниц.

Scouleria rschewinii Lindb. et Arnell – un. **37**. На камнях и по урезу воды скалистого берега реки; S+.

Sphagnum angustifolium (C.E.O. Jensen ex Russow) C.E.O. Jensen – un. **19**. На почве.

S. balticum (Russow) C.E.O. Jensen – rar. **8, 11, 34.** На почве, в основании кочек по заболоченному кочкарнику, частично погружен в воду.

S. capillifolium (Ehrh.) Hedw. – fr. **2, 5.1, 11, 22, 34, 35.** На почве, по берегам рек и ручьев, на сфагновых болотах.

S. divinum Flatberg et K. Hassel – rar. **11, 39.** Обильно по окраине болота и в воде; в заболоченном лиственничном редколесье.

S. fimbriatum Wilson – rar. **3, 5.1, 31.** На почве, по берегу ручья и по окраине болота.

S. fuscum (Schimp.) H. Klinggr. – rar. **5.1, 31, 34.** По окраине болота.

S. girgensohnii Russow – sp. **5.1, 8.1, 11, 21, 39.** По берегам ручьев.

S. lenense H. Lindb. ex L.I. Savicz – un. **34**. На почве в кустарниково-кустарничковой тундре.

S. obtusum* Warnst. – un. **11. Между кочек болота.

S. orientale L.I. Savicz. – un. **29**. По окраине болота.

S. palustre* L. – un. **22. В редкостойном заболоченном лиственничнике на почве.

S. riparium Ångstr. – un. **35**. На почве в ложбине.

S. rubellum Wilson – un. **31**. Окраина сфагнового болота.

S. russowii Warnst. – un. **31**. Там же.

S. steerei* R.E. Andrus – rar. **11. В понижении между кочек, частично в воде по заболоченному кочкарнику.

S. squarrosum Crome – sp. **3, 5.1, 11, 31.** На кочках по болоту и на почве.

S. subfulvum* Sjörs – un. **2. На кочке в заболоченном ернике.

S. warnstorfii Russow – rar. **2, 31.** Между кочек болот.

Splachnum ampullaceum Hedw. – rar. **2, 5, 39.** На почве в лиственничнике и между кочек болота; S+.

Stereodon holmenii (Ando) Ignatov et Ignatova – un. **37**. На скалистом склоне сопки.

S. subimponens* (Lesq.) Broth. – rar. **5, 19, 31. На почве и в основании деревьев в лиственничнике и на камнях по скалистому берегу ручья.

Straminergon stramineum (Dicks. ex Brid.) Hedenäs – fr. **6, 8.1, 26, 29, 34, 35.** На почве в заболоченных лиственничниках, в тундрах, низинах, обильно по берегам ручьев.

Syntrichia ruralis* (Hedw.) F. Weber et D. Mohr – rar. **19, 37. В трещинах скалистого склона сопки и на камнях.

Tetraphis pellucida Hedw. – rar. 39. На почве в основании лиственницы.

Tetraplodon angustatus (Hedw.) Bruch, Schimp. et W. Gümbel – rar. **5, 31, 39.** На почве в лиственничниках, S+.

Timmia austriaca Hedw. – un. **38**. На каменистом берегу ручья.

T. bavarica* Hessl. – un. **19. На камнях.

T. megapolitana* Hedw. – un. **6. На гнилом выступающем корне чозении.

Tomentypnum involutum (Limpr.) Hedenäs et Ignatov – fr. **3, 5, 11, 19, 21, 24, 31.** На почве в лиственничниках, между кочек болота.

Tortula mucronifolia* Schwägr. – rar. **4, 37. В трещине скалы на склоне сопки и на корне упавшего тополя.

Warnstorfia exannulata (Schimp.) Loeske – sp. **10, 23, 26, 44.** На почве в сырых лиственничниках, на болотах; в воде и по берегам озер.

W. fluitans (Hedw.) Loeske – rar. **31, 44.** Во влажном понижении в лиственничнике и по берегу озера.

Обсуждение

Полученный список для Сеймчанского участка заповедника и правобережья р. Колыма включает 148 видов, относящихся к 81 роду, 37 семействам и 15 порядкам. В десятку ведущих семейств входят: Dicranaceae, Amblystegiaceae, Sphagnaceae, Plagiotheciaceae, Mniaceae, Grimmiaceae, Polytrichaceae, Calliergonaceae, Brachytheciaceae и Pylaisiaceae. Они объединяют 91 вид, что составляет 62 % видового состава флоры. В 16 семействах менее 6 видов в каждом, а в 10 – по одному виду. Крупных родов, включающих от 17 до 6 видов, 3 – *Sphagnum*, *Dicranum* и *Polytrichum*. На 10 крупных родов приходится 55 видов, что составляет 37,6 % от всего состава бриофлоры. Таксономический анализ бриофлоры исследуемого района отражает его зональные флористические особенности, а именно – его положение в таежной зоне, в северотаежной полосе [1].

В изучаемой флоре превалирует бореальный элемент (с бореальномонтанным и бореальнонеморальным), он представлен 80 видами, что составляет 54 % . Большое участие в сложении исследованной бриофлоры принимают арктомонтанные (18 видов, 12,1 % флоры), гипоарктомонтанные (22, или 14,8 %) и неморальные (11, 7,4 %) виды. Доля арктических, гипоарктических и аридных элементов незначительна.

В основном ареалы большинства представленных видов циркумполярные, наибольший интерес представляет нахождение видов, характеризующихся ограниченными ареалами. Среди них можно выделить европейско-американские (*Mnium blyttii* и *Stereodon subimponens*), европейско-сибирские (*Isopterygiopsis alpicola, Sphagnum lenense*), восточносибирско-североамериканско-европейские (например, *Sphagnum subfulvum*), азиатско-американские (*Grimmia pilifera*, *Sciurohypnum latifolium, Sphagnum steerei*) и восточноазиатские виды (*Dicranum pacificum, Grimmia jacutica*), наличие которых отражает положение изучаемой форы на северо-востоке Азии.

Расположение участка в долине р. Колыма обусловливает ведущую роль (46,6 % от общего списка видов мхов) мезогигрофитов (15 видов), гигрофитов (22 вида), гигрогидрофитов (18) и гидрофитов (13) в формировании флоры мхов. По берегам рек и ручьев обильно произрастают *Philonotis fontana, Calliergonella lindbergii, Bryum pseudotriquetrum* и др. Типичные водные мхи также отмечаются нередко – *Fontinalis perfida, Hygrohypnella ochracea* и *Platyhypnum duriusculum*. Значительное распространение имеют такие болотные виды, как *Aulacomnium palustre*, *Calliergon cordifolium, Straminergon stramineum*; наличие различных стариц, озер и сфагновых болот обусловливает ведущее положение во флоре рода *Sphagnum* – выявлено 17 видов этого рода, 2 из которых впервые были указаны для региона [20].

Некоторые особенности изученной флоры выявляются при сравнении с флорой Кава-Челомджинского участка, что обусловлено схожим расположением в долинах рек (слияние Кавы и Челомджи) и положением над уровнем моря (диапазон высот от 33 до 1300 м). Наличие сходных местообитаний и растительных сообществ обеспечивает большую общность их флористических списков. Было выявлено 79 видов (41,5 % от общего числа), являющихся общими для сравниваемых флор. К числу этих видов, составляющих ядро флоры исследуемой территории, относятся как доминанты мохового покрова с широкой экологической амплитудой, так и виды с узкой приуроченностью. Сюда относятся космополитные или почти космополитные виды (*Ceratodon purpureus, Pohlia cruda, P. nutans, Polytrichum piliferum, Syntrichia ruralis)* и широко распространенные виды, такие как *Abietinella abietina, Andreaea*

rupestris, Calliergon giganteum, Rhytidium rugosum, Hygrohypnum polare и виды рода Sphagnum.

Также следует отметить, что на заповедной территории было выявлено новое местонахождение для редкого вида, включенного в региональную Красную книгу, – *Pseudohygrohypnum subeugyrium* [21].

Наиболее интересным в бриологическом отношении представляется расположенное в 1 км от границы заповедника устье руч. Ледяной (Тарыннах) на правом берегу р. Колыма. Здесь представлены выходы скал по склонам сопок в 70–200 м от русла реки. С данного местообитания приводятся 56 видов, что составляет 38,3 % от общего списка. В 2019 г. здесь было найдено три новых и 9 редких для Магаданской области видов [22]. Хотелось бы отметить, что территорию правобережья, площадью 70,5 тыс. га, к которой относится и данное местообитание, было предложено [6] присоединить к территории заповедника. По полученным нами данным, устье ручья Ледяной заслуживает включения в заповедник, что позволит расширить участок и взять под охрану находящиеся там редкие виды.

Заключение

Исследуемая нами территория Сеймчанского участка заповедника и его окрестностей характеризуется относительно небогатым видовым составом мхов. Вероятно, ее бедность связана с низким разнообразием местообитаний и недостаточностью изученности вследствие сложности транспортировки к местам исследований. Из-за особенностей расположения Сеймчанского участка, в долине реки, в видовом разнообразии преобладают виды мезо- и гигрофиты. Проведение дальнейших бриологических исследований на территории Магаданского заповедника позволит выявить новые виды, а также дополнить сведения по распространению мхов на Дальнем Востоке.

Литература

1. *Андреев А.В.* Природные условия участков заповедника // Растительный и животный мир заповедника «Магаданский». Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2011. С. 6–46.

2. *Благодатских Л.С.* Эколого-ценотическая характеристика листостебельных мхов в среднем течении реки Челомджа // Экология, распространение и жизненные формы растений Магаданской области. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. С. 66–72.

3. *Лейто А.А., Мянд Р.А., Оя Т.А. и др.* Исследования экосистем полуострова Кони, Магаданский заповедник. Таллин: АН Эстонии, 1991. 224 с.

4. *Чемерис Е.В., Мочалова О.А.* Новые находки мохообразных в Магаданской области. 1 / Новые находки мохообразных. 4. Е.В. Софронова (ред.) // Arctoa, 2015. Т. 24, № 1. С. 255–257. DOI: 10.15298/arctoa.24.23

5. *Благодатских Л.С., Кузнецова Е.Ф., Афонина О.М.* Дополнения к флоре мхов Магаданской области // Ботан. журн. 2019. Т. 104, № 6. С. 979–986. DOI: 10.1134/S0006813619060036.

6. *Беркутенко А.Н., Полежаев А.Н., Маленина М.О.* Флора и растительность заповедника “Магаданский”. Вып. 2. Среднеканский участок: препринт. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1990. 66 с.

7. *Благодатских Л.С.* Листостебельные мхи Колымского нагорья. Магадан: СВКНИИ, 1984. 47 с.

8. *Pisarenko O.Yu., Bakalin V.A.* Bryophyte flora of the Magadan Province (Russia) I. Introduction and the checklist of mosses // Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation. 2018. Vol. 7, No. 2. P. 105–125. DOI: 10.17581/ bp.2018.07212.

9. *Юрцев Б.А.* Проблемы ботанической географии Северо-Восточной Азии. Л.: Наука, 1974. 159 с.

10. *Хохряков А.П.* Флора Магаданской области. М.: Наука, 1985. 398 с.

11. *Мажитова Г.Г.* Почвы и почвенный покров заповедника “Магаданский”. Сеймчанский участок. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1991. 45 с.

12. *Заповедники* Дальнего Востока СССР. М., 1985. 319 с.

13. *Мочалова О.А., Хорева М.Г.* Особенности флоры заповедника «Магаданский» // Вестник ДВО РАН. 2011. № 2. С. 107–113.

14. *Беликович А.В., Буч Т.Г.,* Харкевич *С.С.* Флора и растительность Сеймчанского лесничества Магаданского заповедника // Ботан. журн. 1992. Т. 77, № 2. С. 55–69.

15. *Ignatov M. S., Afonina O. M., Ignatova E.A. et al.* Check-list of mosses of East Europe and North Asia // Arctoa. 2006. No. 15. P. 1–130. DOI: 10.15298/arctoa.15.0

16. *Hodgetts N. G., Söderström L., Blockeel T. L. et al.* An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus // Journal of Bryology. 2020. V. 42, No. 1. P. 1–116. DOI: 10.1080/03736687.2019.1694329

17. *Флора* мхов России. Том 2. Oedipodiales – Grimmiales. / М.С. Игнатов (отв. ред.). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2017. 560 с.

18. *Флора* мхов России. Том 4. Bartramiales – Aulacomniales. / М.С. Игнатов (отв. ред.). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2018. 543 с.

19. *Флора* мхов России. Том 5. Hypopterygiales – Hypnales (Plagiotheciaceae – Brachytheciaceae) / М.С. Игнатов (отв. ред.). М.: Т-во науч. изданий КМК, 2020. 599 с.

20. *Вильк Е.Ф., Кузьмина Е.Ю.* Новые находки мхов в Магаданской области / Новые находки мохообразных. 15. Е.В. Софронова (ред.) // Arctoa, 2020. Т. 29, № 2. С. 219–239. DOI: 10.15298/arctoa.29.16

21. *Красная* книга Магаданской области. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов / Редколл. А.В. Кондратьев (предс.) и др. Магадан: Охотник, 2019. 356 с.

22. *Вильк Е.Ф., Афонина О.М.* Новые находки мхов в Магаданской области // Turczaninowia 2020. Том 23, №2. С. 33–38. DOI: 10.14258/turczaninowia.23.2.5

Поступила в редакцию 09.03.2021
Принята к публикации 26.04.2021

Об авторе

ВИЛЬК Елизавета Филипповна, младший научный сотрудник, Институт биологических проблем Севера ДВО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 18, Россия,
https://orcid.org/0000-0001-8418-238X, kelizavetaova@mail.ru.

Информация для цитирования

Вильк Е.Ф. Флора мхов заповедника «Магаданский» и его окрестностей // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 144–154. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-144–154

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-144–154

Moss flora of the Magadansky Reserve and its vicinities

E.F. Vilk

Institute of the Biological Problems of the North, FEB RAS, Magadan, Russia
**kelizavetaova@mail.ru*

Abstract. *The study focuses on the moss flora in one of the largest nature reserves in the Far East of Russia. The moss component of the hard-to-reach Seymchan cluster of the Magadansky State Nature Reserve is examined for the first time. Bryofloristic aspect of the territory has not been widely studied, which makes taxonomic revision of the moss flora of Russia complicated. The present studies were carried out during two field seasons (2019 and 2020) on the right bank of the Kolyma river (Reserve territory) and on the left bank of the river. During the studies moss species that are novel for the Magadan Region were detected. The sites with rare species were specified, and the state of their populations was identified. The general list includes 148 species, while 102 of them have been detected in the territory of the cluster. Thirty new species are reported in the territory of the reserve. The annotated list with the data on the habitat and occurrence rates of the species was compiled. The materials have been analyzed at the Laboratory of Botany, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS. The species that were hard- to-locate in taxonomy have been tested at the Botanical Institute RAS. The collected samples are stored in MAG, and doublets at LE. This article provides a discussion on the features of revealed flora: a detailed analysis of bryoflora is presented; the moss cover is characterized in the major types of vegetation, practical recommendations are given.*

Keywords: biodiversity, reserve, mosses, Magadan Region.

Acknowledgements. *The research was carried out within the State Assignment for the Institute of Biological Problems of the North FEB RAS (No. AAAA-A17-117122590002-0) and with the financial support from the Young Researcher Contest with in the Institute. The author expresses gratitude to researchers from the Laboratory of Lichenology and Bryology of the Botanical Institute of RAS, and to O.M. Afonina, E.Yu. Kuzmina for their consultations. The author thanks Administration of the Magadansky Nature Reserve, Assistant Director I.G. Utekhina, inspectors of the Seymchan region V.N. Timchenko, V.S. Ammosov, A.I. Parshin, G.M. But and Yu.I. Parshin, as well as to E.V. Zheludeva, lichenologist at the IBPN, for assistance in field studies.*

References

1. *Andreyev A.V.* Prirodnyye usloviya uchastkov zapovednika // Flora and fauna of the reserve «Magadansky». Magadan: NESC FEB RAS, 2011. P. 6–46.

2. *Blagodatskikh L.S.* Ekologo-tsenoticheskaya kharakteristika listostebel'nykh mkhov v srednem techenii reki Chelomdzha // Ekologiya, rasprostraneniye i zhiznennyye formy rasteniy Magadanskoy oblasti. Vladivostok: DVO AN SSSR, 1987. P. 66–72.

3. *Leyto A.A., Myand R.A., Oya T.A. et al.* Issledovaniya ekosistem poluostrova Koni, Magadansky zapovednik. Tallin: AN Estonii, 1991. 224 s.

4. *Chemeris E.V., Mochalova O.A.* New bryophyte records from Magadan Province. 1 // New bryophyte records. 4. Ed. E. V. Sofronova. // Arctoa, 2015. Vol. 24, No. 1. P. 255–257. DOI: 10.15298/arctoa.24.23

5. *Blagodatskikh L.S., Kuznetsova E.F., Afonina O.M.* Additions to the moss flora of Magadan region // Bot. zhurn. 2019. Vol. 104, No. 6. P. 979–986. DOI: 10.1134/S0006813619060036.

6. *Berkutenko A.N., Polezhayev A.N., Malenina M.O.* Flora i rastitel'nost' zapovednika "Magadanskiy". Vol. 2. Srednekanskiy uchastok: preprint. Magadan: SVKNII, 1990. 66 p.

7. *Blagodatskikh L.S.* Listostebel'nyye mkhi Kolymskogo nagor'ya. Magadan: SVKNII, 1984. 47 p.

8. *Pisarenko O.Yu., Bakalin V.A.* Bryophyte flora of the Magadan Province (Russia) I. Introduction and the checklist of mosses // Botanica Pacifica. A journal of plant science and conservation. 2018. Vol. 7, No. 2. P. 105–125. DOI: 10.17581/ bp.2018.07212.

9. *Yurtsev B.A.* Problemy botanicheskoy geografii Severo-Vostochnoy Azii. L.: Nauka, 1974. 159 p.

10. *Khokhryakov A.P.* Flora Magadanskoy oblasti. M.: Nauka, 1985. 398 p.

11. *Mazhitova G.G.* Pochvy i pochvennyy pokrov zapovednika "Magadansky". Seymchanskiy uchastok. Magadan: SVKNII, 1991. 45 p.

12. *Zapovedniki* Dal'nego Vostoka SSSR. M., 1985. 319 p.

13. *Mochalova O.A., Khoreva M.G.* Floristic peculiarities of «Magadanskyi» Nature Reserve // Bulletin of North-East Science Centre. 2011. No. 2. P. 107–113.

14. *Belikovich A.V., Buch T.G., Kharkevich S.S.* Flora and vegetation of the Seymchan forestry of the Magadan Preserve // Bot. zhurn. 1992. Vol. 77, No. 2. P. 55–69.

15. *Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A. et al.* Check-list of mosses of East Europe and North Asia // Arctoa. 2006. No. 15. P. 1–130. DOI: 10.15298/arctoa.15.0

16. *Hodgetts N.G., Söderström L., Blockeel T.L. et al.* An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus // Journal of Bryology. 2020. V. 42, No. 1. P. 1–116. DOI: 10.1080/03736687.2019.1694329

17. *Moss* flora of Russia. Volume 2. Oedipodiales – Grimmiales / M.S. Ignatov (Ed.). M.: KMK Scientific Press Ltd. 2017. 560 p.

18. *Moss* flora of Russia. Volume 4. Bartramiales – Aulacomniales / M.S. Ignatov (Ed.). M.: KMK Scientific Press Ltd. 2018. 543 p.

19. *Moss* flora of Russia. Volume 5. Hypopterygiales – Hypnales (Plagiotheciaceae – Brachytheciaceae) / M.S. Ignatov (Ed.). M.: KMK Scientific Press Ltd. 2020. 599 p.

20. *Vilk E.F., Kuzmina E.Yu.* New bryophyte records from Magadan Province / New bryophyte records. 15. Ed. E. V. Sofronova // Arctoa. 2020. Vol. 29, No. 2. P. 219–239. DOI: 10.15298/arctoa.29.16

21. *Red* Book of the Magadan Region. Rare and endangered species of animals, plants and fungi / Editorial board. A.V. Kondratyev (chief) et al. Magadan: Hunter, 2019. 356 p.

22. *Vilk E.F., Afonina O.M.* 2020. New records of mosses from Magadan Region. Turczaninowia 2020. Vol. 29, No. 2. P. 33–38. DOI: 10.14258/turczaninowia.23.2.5

About the author

VILK, Elizaveta Filippovna, junior researcher, Institute of Biological Problems of the North FEB RAS, 18 Portovaya st., Magadan 685000, Russia,
https://orcid.org/0000-0001-8418-238X, kelizavetaova@mail.ru

Citation

Vilk E.F. Moss flora of the Magadansky Reserve and its vicinities // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 144–154. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-144–154

Материаловедение

УДК 539.422.52
DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155–168

Исследование термоокислительного старения полимерного композиционного материала с использованием метода акустической эмиссии

А.А. Брянский*, О.В. Башков, Д.П. Малышева

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия
**bryansky.aa@yandex.ru*

Аннотация. *Представлены результаты исследования влияния условий термоокислительного старения на процесс разрушения полимерного композиционного материала (ПКМ) на основании регистрируемых параметров акустической эмиссии (АЭ). Объектом исследования выступили образцы, вырезанные из плиты стеклопластика. Плита была изготовлена методом вакуумной инфузии с применением связующего Derakane 411-350 и 9 слоев стеклоткани Ст-62004. Старение образцов выполнялось выдержкой в муфельной печи в течение 96 ч при температурах 60, 100, 120 и 200 °С. Механические испытания проведены методом трехточечного статического изгиба. АЭ регистрировалась на программно-аппаратном комплексе, разработанном в КнАГУ. Выполнена двухэтапная кластеризация частотных составляющих спектров сигналов зарегистрированной АЭ самоорганизующейся картой Кохонена по методике, ранее разработанной и апробированной авторами. Дана характеристика типов повреждений структуры ПКМ по центроидам полученных кластеров. На основании накопления кластеров в ходе механических испытаний описана кинетика процесса разрушения в зависимости от условий термоокислительного старения. Установлено негативное влияние повышенных температур на деградацию полимерной матрицы, приводящее к снижению способности эффективного распределения внутренних напряжений матрицей по объему ПКМ за счет нарушения адгезии с армирующим материалом.*

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, стеклопластик, старение, разрушение, акустическая эмиссия, кластеризация.

Благодарности. *Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00896.*

Введение

Увеличивающееся потребление полимерных композиционных материалов (ПКМ) в промышленности, особенно в таких областях как самолетостроение и возобновляемые источники энергии, ставит актуальной проблему диагностики ответственных деталей и конструкций из ПКМ [1]. Сложная структура композиционных материалов может приводить к образованию специфических повреждений в условиях непредвиденных нагрузок, что существенно сказывается на их функциональности [2, 3].

В условиях эксплуатации изделия из ПКМ зачастую подвергаются воздействию различных окислителей, в том числе и кислорода из воздуха, при различных температурах. Оценить влияние тех или иных внешних условий на изменение свойств и поведение ПКМ возможно с использованием методов неразрушающего контроля и разрушающих испытаний [4, 5].

Метод акустической эмиссии (АЭ) известен как метод неразрушающего контроля и наиболее часто используется для регистрации эволюции структурных дефектов в механически нагруженных конструкциях и их деталях [6]. Данный метод позволяет получить информацию о природе образующегося и развивающегося дефекта в детали, а также о его развитии в условиях продолжительной или повторяющейся нагрузок [7].

АЭ генерируется развивающимися повреждениями при изменении внутренней структуры материала и представляет собой упругие колебания,

© Брянский А.А., Башков О.В., Малышева Д.П., 2021

создаваемые в материале при перераспределении напряжений в процессе распространения упругой волны. В ПКМ данные изменения обусловлены зарождением, ростом и раскрытием трещин в полимерной матрице, изломом волокон и нарушением адгезии между матрицей и волокнами [2, 8–10].

Одной из важных задач, решаемых при использовании метода АЭ, является приведение в соответствие зарегистрированного сигнала или группы сигналов специфическому источнику, генерирующему данные сигналы и формирующему механизм образования повреждений [10–12]. Для анализа сигналов АЭ, как правило, используется комплекс параметров, что вместе с недостатком или отсутствием характеристической информации о них из-за широкой вариативности свойств ПКМ (используемые материалы, структура) делает исследование каждого нового класса материалов нетривиальной задачей [9, 13]. Описание механизмов структурной деградации на основе параметров АЭ требует глубокого понимания связи между процессами разрушения материала и регистрируемыми сигналами АЭ [14].

Расчетные параметры сигналов АЭ выступают в виде дескрипторов событий АЭ, неся ту или иную характеристическую информацию. Таким образом, само по себе накопление событий АЭ используется для оценки интенсивности образования и роста дефектов как источников АЭ, а по значениям пиковой амплитуды, энергии и других параметров можно идентифицировать масштаб и природу развивающихся повреждений [2, 3, 15–18].

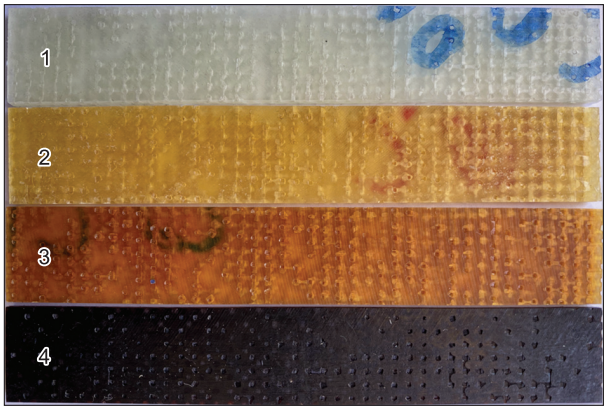


Рис. 1. Внешний вид образцов после термоокислительного старения при температурах выдержки, °С:
1 – 60; *2* – 100; *3* – 120; *4* – 200.

Fig. 1. Appearance of samples after thermo-oxidative aging at holding temperatures, °C:
1 – 60; *2* – 100; *3* – 120; *4* – 200.

Частотное представление сигналов содержит большое количество информации о природе образующихся дефектов в материале [11, 16, 19, 20]. Для характеризации сигнала АЭ может быть использован один или несколько частотных диапазонов. На основании данных параметров определяется, к какому процессу относится каждый зарегистрированный сигнал АЭ [9]. При частотном анализе на практике используются быстрое преобразование Фурье (БПФ) или вейвлет-преобразование, что позволяет добиться высокой точности идентификации природы зарегистрированного сигнала АЭ [3, 4, 21, 22].

Для статистического анализа и классификации данных АЭ необходимо определение наиболее важных (информативных) параметров среди их множества или же применение методов, позволяющих уменьшить их количество. Многие подходы определения информативно важных параметров, встречаемые в литературе, основаны на методе главных компонент [10, 14, 21, 23], методе полной связи (иерархическая кластеризация) [19] или выборе группы параметров (таких как частота, амплитуда, длительность и т. д.). Анализ часто основывается на опыте других исследователей.

Среди широко используемых подходов кластеризации данных АЭ стоит выделить алгоритм k-means [3, 24] и искусственные нейронные сети (ИНС). Самоорганизующаяся карта (СОК) нашла широкое применение для задач классификации параметров сигналов АЭ благодаря обучению без учителя и возможность обработки большого количества данных [9, 14].

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования была изготовлена пластина стеклопластика на базе связующего Derakane 411-350 и 9 слоев стеклоткани Ст-62004 методом вакуумной инфузии. Из полученной пластины вырезаны образцы размерами 60 × 15 мм.

Старение образцов выполнялось методом термоокислительного старения в муфельной печи. Время выдержки составило 96 ч. Обрабатывались четыре группы по два образца при температуре 60, 100, 120 и 200 °С. Внешний вид образцов приведен на рис. 1.

Механическое испытание на трехточечный статический изгиб выполнялось на универсальной испытательной машине Instron 3382. Скорость нагружения для каждого испытания рассчитывалась согласно ГОСТ 56810-2015.

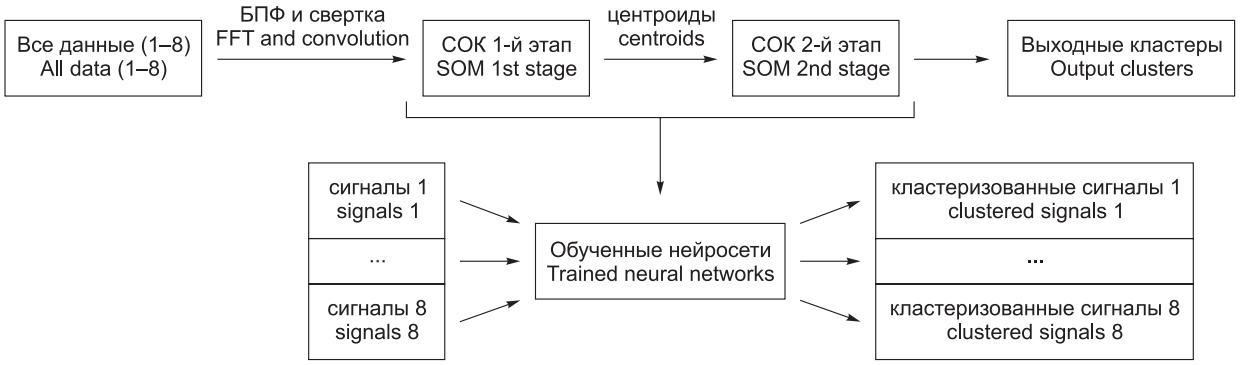


Рис. 2. Схема обработки выборок зарегистрированных сигналов АЭ.

Fig. 2. Scheme for the processing of the registered AE signals samples.

Регистрация АЭ проводилась на программно-аппаратном комплексе AE 2.1 Pro с использованием широкополосного датчика Globaltest GT301 (50–550 кГц). Обработка зарегистрированных сигналов АЭ выполнялась по схеме, приведенной на рис. 2, в среде MATLAB.

Идентификация природы повреждений, образующихся при приложении нагрузки изгибом в ПКМ, выполнялась по методике кластерного анализа, путем выделения характерных групп сигналов (кластеров). Кластеризация сигналов была реализована с использованием самоорганизующейся карты Кохонена (self-organizing map, SOM), так как данная нейронная сеть обучается без учителя, что позволяет сначала получить кластеры, а потом дать им характеристику [16]. Алгоритм кластеризации был основан на анализе сигналов по их частотным фурье-спектрам и выполнялся в два этапа. При большом числе зарегистрированных сигналов, превышающем 1000, количество кластеров на первой стадии кластеризации равнялось 100. На втором этапе центроиды, полученные в результате первого этапа кластеризации, объединялись до 25 кластеров и менее. Выбор большого количества выходных кластеров обоснован тем, что помимо регистрации отдельных событий, возникающих в результате единичных актов локальных повреждений и разрушений материала, возможно совместное смешанное образование дефектов структуры ПКМ различной природы [24]. Обучение нейронных сетей проводилось на суммарной выборке из всех сигналов каждого испытания. В дальнейшем обученные нейросети применялись для кластеризации выборок каждого испытания.

Центроиды полученных кластеров, на основании их частотного представления, соотносились с природой структурных дефектов материала. Поскольку эффективность кластеризации зависит от количества параметров и их информативной ценности [21, 25, 26], размерность спектров снижалась сверткой. Алгоритм свертки, используемый в данной работе, основан на оценке распределения значений пиковых частот спектров, выделении небольших диапазонов колебания значений частот и выбора значений максимальной амплитуды в них.

Для зарегистрированных сигналов АЭ рассчитывались спектры Фурье, диапазон анализа которых ограничивался областью частот 20–450 кГц, определенной в ранних работах авторов [27]. Акустические шумы звукового диапазона подавлялись фильтром усилителя Olympus модели 5662B. Механические шумы испытательной машины были проанализированы и учтены. Анализ сигналов АЭ, регистрируемых при нагружении разных материалов с одинаковым уровнем механических нагрузок, показал, что испытательная машина не оказывает влияния на появление дополнительных шумов при заданном усилении предварительного усилителя 40 дБ. Для снижения влияния амплитуды сигналов выполнялись нормализация спектра и свертка [28]. Полученные спектры сигналов АЭ, зарегистрированных во всех экспериментах, подавались на вход предварительно обученной SOM первого этапа обработки данных. Далее, на основании результатов кластеризации центроидов первого этапа SOM схожие кластеры объединялись. Информация о числе сигналов АЭ в кластерах и характере их накопления в ходе механического испытания использовалась для анализа процесса разрушения материала.

Исследование структуры образцов проводили с помощью металлографического микроскопа Nikon ECLIPSE MA200. Испытанные образцы

распиливались по линии изгиба и подготавливали на шлифовально-полировальном оборудовании.

Результаты и их обсуждение

В результате обработки сигналов акустической эмиссии по схеме, приведенной на рис. 2, было получено 11 кластеров. Усредненные спектры (центроиды) выходных кластеров представлены на рис. 3.

Примеры усредненных спектров кластеров C1 и C11 и спектров сигналов АЭ, входящих в данные кластеры, представлены на рис. 4.

Характеристика кластеров, соответствующих какому-либо типу повреждения, производилась по значениям пиковых частот.

Повреждение полимерной матрицы – один из основных процессов образования повреждений в течение всего срока эксплуатации ПКМ [7]. При характеризации разрушения полимерной матрицы было использовано несколько масштабов ее повреждения в связи с тем, что рост разрушающей нагрузки сопровождался увеличением частоты регистрируемых сигналов АЭ одной природы, характерных повреждению матрицы, в условиях процесса расслоения [3, 29]. В работах [10, 22] микроповреждения матрицы соотнесены с пиковыми частотами до 50 кГц, в работах [21, 30] повреждения матрицы охарактеризованы пиковыми частотами ниже 125 кГц. При этом в работах [2, 10] частотный диапазон 50–150 кГц соотнесен

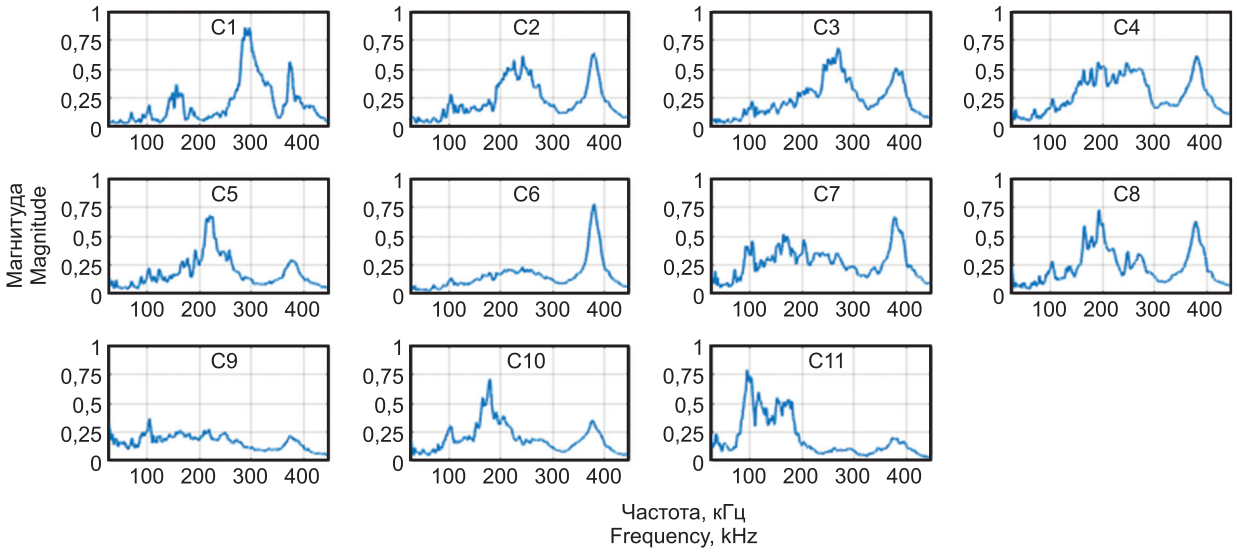


Рис. 3. Усредненные спектры кластеров с 1 по 11.

Fig. 3. Average spectra of the clusters from 1 to 11.

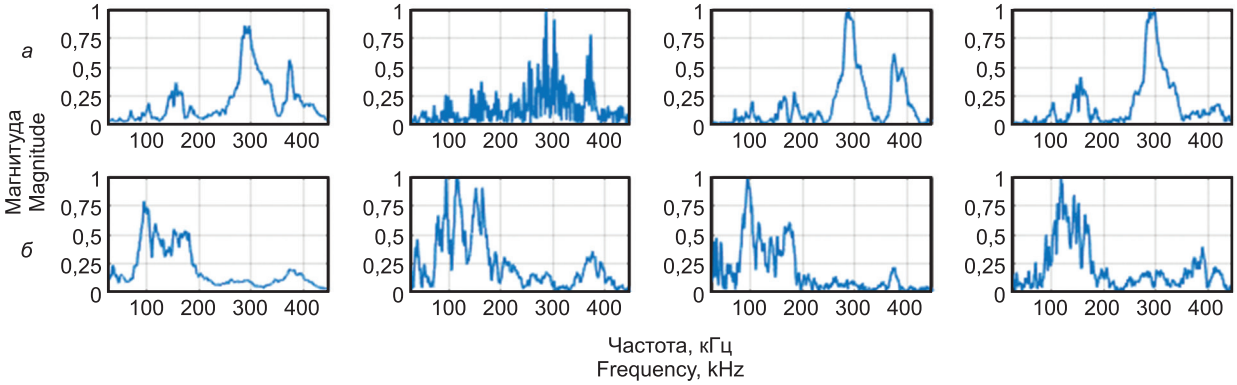


Рис. 4. Усредненные спектры кластеров и спектры входящих в них сигналов АЭ, выбранных случайным образом: *а* – кластер C1; *б* – кластер C11.

Fig. 4. Average spectra of the clusters and spectra of AE signals included in them and selected at random *а* – cluster C1; *б* – cluster C11.

Таблица 1

Характеристика типов повреждений по частотам

Table 1

Characteristics of the damage types by frequency

Частоты, кГц Frequencies, kHz	Тип образующегося повреждения Type of the formed damage
25–100	Микроповреждения матрицы Matrix microdamages
130–150	Критические повреждения матрицы (межслоевые повреждения) Critical matrix damages (interlaminar damages)
150–220	Образование расслоений Delaminations
180–260	Скольжение волокон Fibers slip
270–310	Отклеивание волокон Fibers debonding
360–400	Излом волокон Fibers failure

с процессом образования расслоений, а в работах [10, 19] – с микроповреждениями матрицы. Различие в литературных данных по классификации повреждений привело к необходимости внесения корректировок в характеристические диапазоны пиковых частот. На основании качественного анализа данных по результатам повреждений образцов было принято считать диапазоны частот 25–100 кГц и 130–150 кГц характерными для оценки микроповреждений и межслоевых повреждений полимерной матрицы.

Образование расслоений характеризуется излучением сигналов АЭ с более высокими частотами в сравнении с повреждениями матрицы. В работах [2–4, 10, 11, 21, 22, 26, 31] нижняя граница частотного диапазона образования расслоений характеризуется частотой 150 кГц, а верхняя граница находится в диапазоне частот 200–250 кГц. На основании собственных наблюдений результатов испытаний для процесса образования расслоений был принят характеристический диапазон частот 150–220 кГц.

Образование расслоений, отклеивание и скольжение волокон, в силу общей природы (нарушение адгезии) зачастую принадлежат общему или пересекающимся диапазонам частот. Для скольжения волокон был принят диапазон частот 180–260 кГц, а для отклеивания волокон – 270–310 кГц [2, 4, 10, 11, 22, 31]. Излому стекловолокон ПКМ были сопоставлены сигналы АЭ, регистрируемые в диапазоне частот 360–400 кГц.

Характеристика диапазонов пиковых частот, используемая в данной работе, представлена в табл. 1. В табл. 2 дано описание полученных кластеров на основании их частотного диапазона.

На рис. 5 представлено количественное содержание кластеров в виде гистограмм для каждого типа образцов.

По количеству зарегистрированных событий, отнесенных к каждому кластеру, можно оценить преобладание того или иного типа повреждения для каждого из испытания. Для оценки процесса разрушения анализируется накопление каждого из кластеров. На рис. 6–9 приведены кривые накопления кластеров для испытания каждого из исследуемых образцов, совмещенные с графиками зависимости напряжений от времени. Кластеры с незначительным накоплением не отображены.

Для образцов, выдержанных при температуре 60 °С, среднее значение максимального напряжения составило 432 МПа, для образцов с температурой выдержки 100 °С – 421 МПа, для образцов с температурой выдержки 120 °С – 405 МПа и для образцов с температурой выдержки 200 °С – 395 МПа.

Увеличение времени выдержки ПКМ при критических температурах или в условиях воздействия агрессивной среды приводит к снижению прочности материала преимущественно за счет деградации полимерной матрицы, так как стекловолокно обладает большей стойкостью к неблагоприятным условиям. В связи с этим наибольшее внимание в анализе уделялось процессам разрушения в матрице.

При испытании образцов, выдержанных при температуре 60 °С (см. рис. 6), процесс разрушения большей частью сопровождается накоплением кластера 10 в течение всего испытания, что характеризуется межслоевыми повреждениями матрицы с незначительным по числу изломом волокон. Менее выражено накопление кластеров 6 и 8, характерных повреждению отдельных волокон и межслоевым повреждениям матрицы с изломом волокон соответственно. Выявленная кинетика образования повреждений проявляется преимущественно при испытании изгибом стеклопластика с малым числом используемых слоев стеклоткани. Из анализа можно сделать вывод об отсутствии влияния деградации матрицы, вызванной температурным воздействием, на характер разрушения ПКМ.

Таблица 2

Характеристика кластеров по совокупным повреждениям

Table 2

Characteristics of the clusters by cumulative damage

Номер кластера Claster Number	Частоты, кГц Frequencies, kHz	Описание Description
C1	270–340, 370–380	Отклеивание волокон, менее выражен излом волокон Fibers debonding, less pronounced fibers failure
C2	190–270, 365–395	Излом с выскальзыванием волокон, менее выражены межслоевые повреждения матрицы по типу расслоений Fibers failure with slipping, less pronounced interlaminar matrix damages by the type of delamination
C3	235–300, 360–400	Излом, отклеивание и скольжение стекловолокон Failure, debonding and fibers slipping
C4	145–290, 360–400	Излом стекловолокон с их отклеиванием и скольжением, межслоевые повреждения матрицы Fibers failure with debonding and slipping, interlaminar matrix damages
C5	190–250 (пик 220) 190–250 (peak 220)	Критические повреждения матрицы, образование расслоений Critical matrix damages, forming of delamination
C6	365–400 (пик 380) 365–400 (peak 380)	Излом стекловолокон Fibers failure
C7	90–275, 360–400 (пик 380) 90–275, 360–400 (peak 380)	Повреждения материала смешанной природы, преобладает излом стекловолокон Damage to material of mixed nature, predominantly fibers failure
C8	160–220, 245–280, 360–400 (пик 190) 160–220, 245–280, 360–400 (peak 190)	Межслоевые повреждения матрицы по типу расслоений, излом волокон Interlaminar matrix damages by the type of delamination, fibers failure
C9	25 (низкие 85–255, 370–380) 25 (low 85–255, 370–380)	Микроповреждения матрицы и не классифицируемые микроповреждения материала Matrix microdamages and unclassified microdamages to material
C10	160–220, 370–380, (пик 180) 160–220, 370–380, (peak 180)	Межслоевые повреждения матрицы по типу расслоений, незначителен излом волокон Interlaminar matrix damages by the type of delamination, slight fibers failure
C11	80–185 (пик 90–100) 80–185 (peak 90–100)	Повреждения матрицы по типу образования и роста трещин, межслоевые повреждения Matrix damages by the type of formation and growth of cracks, interlaminar damages

При испытании образцов, выдержанных при температуре 100 °С (см. рис. 7), наибольшее число событий содержат кластеры 4 и 8, активность которых существенно возрастает при достижении изгибного механического напряжения, равного 60–65 % от максимального напряжения. Кластеры 4 и 8 соответствуют повреждению волокон с межслоевыми повреждениями матрицы. Менее выражена активность кластеров 10 (межслоевые повреждения с незначительным изломом волокон), 6 (излом волокон), 9 (микроповреждения матрицы) и 5 (критические повреждения матрицы, образование расслоений), которые начинают накопление событий ближе к моменту разрушения образцов.

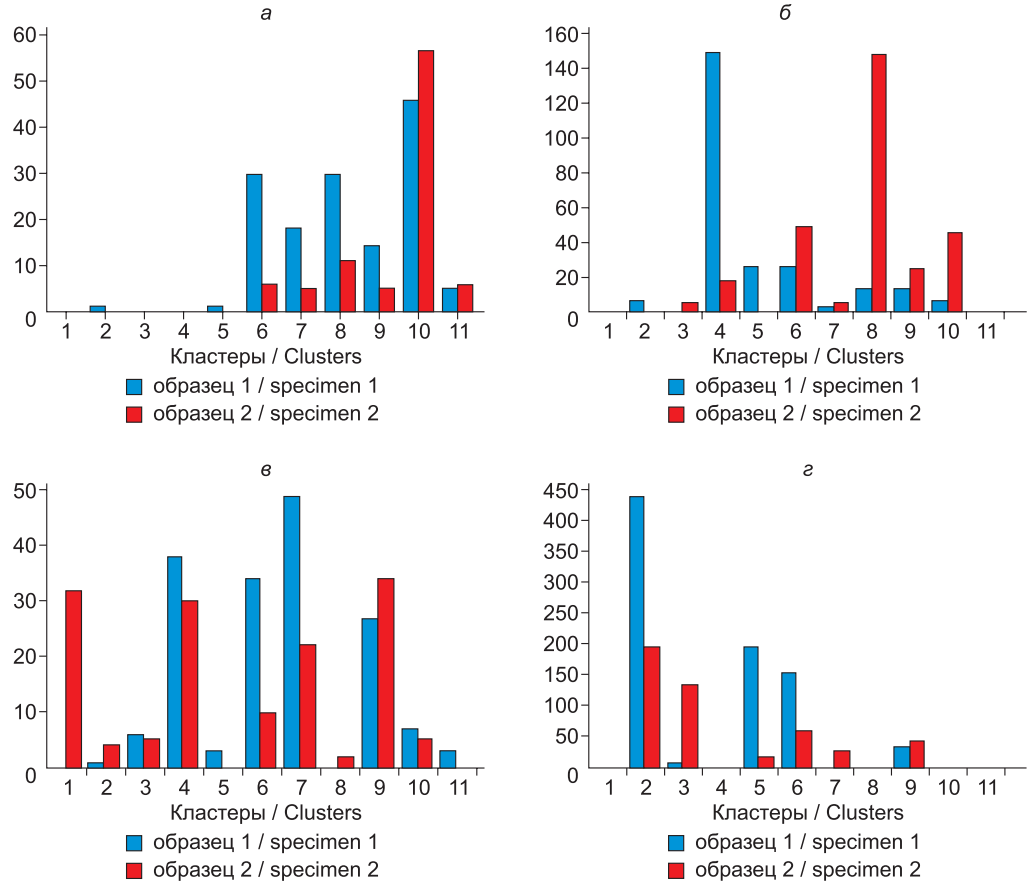


Рис. 5. Количество сигналов в каждом кластере, при температурах выдержки, °С:
а – 60; *б* – 100; *в* – 120; *г* – 200.

Fig. 5. Number of signals in each cluster, at holding temperatures, °C:
а – 60; *б* – 100; *в* – 120; *г* – 200.

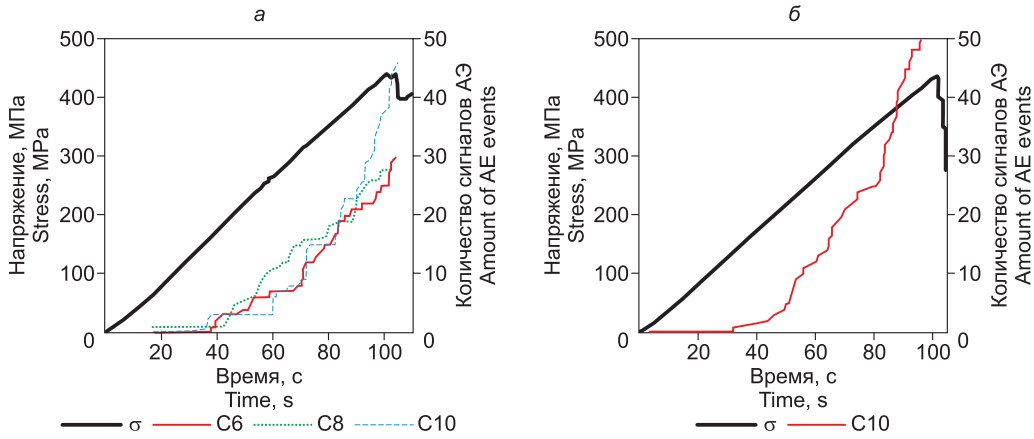


Рис. 6. Накопление кластеров в ходе испытания образцов (*а* – № 1; *б* – № 2), выдержанных при 60 °С.

Fig. 6. Accumulation of the clusters during testing of the samples (*а* – specimen 1; *б* – specimen 2) held at 60 °C.

В сравнении с образцами, выдержанными при 60 °С, регистрация отдельных повреждений практически отсутствует, а увеличение числа комбинированных повреждений матрицы и волокон, отдельных микроповреждений матрицы указывает на достижение не-

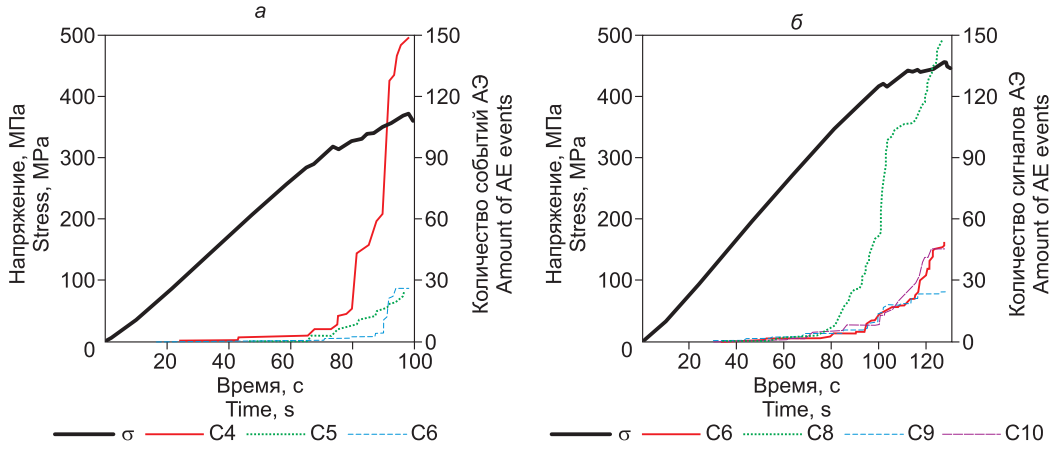


Рис. 7. Накопление кластеров в ходе испытания образцов (*а* – № 1; *б* – № 2), выдержанных при 100 °С.

Fig. 7. Accumulation of the clusters during testing of the samples (*а* – specimen 1; *б* – specimen 2) held at 100 °С.

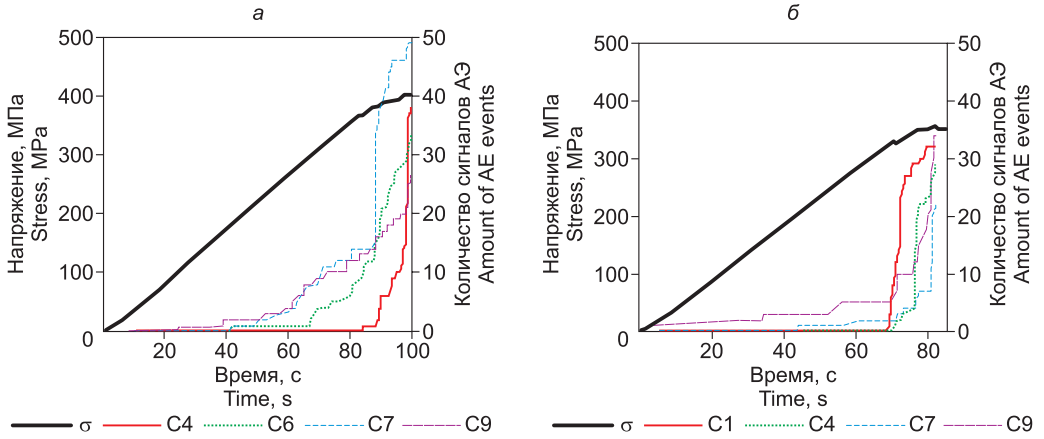


Рис. 8. Накопление кластеров в ходе испытания образцов (*а* – № 1; *б* – № 2), выдержанных при 120 °С.

Fig. 8. Accumulation of the clusters during testing of the samples (*а* – specimen 1; *б* – specimen 2) held at 120 °С.

большой степени деградации полимерной матрицы ПКМ.

При испытании образцов, выдержанных при температуре 120 °С (см. рис. 8), накопление повреждений приобретает более резкий характер. Наиболее крупными являются кластеры 7 (повреждения смешанной природы с преобладанием излома волокон) и 9 (микроповреждения матрицы). Менее выражены кластеры 4 (комплексное повреждение волокон, межслоевые повреждения матрицы), 1 (отклеивание волокон) и 6 (излом волокон).

При дальнейшем увеличении температуры термообработки до 200 °С помимо повреждений смешанной природы и отдельного излома волокон проявляется кластеры, характеризующие нарушение адгезии матрицы к волокнам (см. рис. 9). Деградация матрицы начинает сказываться на способности матрицы к распределению напряжений по объему наполнителя и может считаться критической.

При испытании образцов, выдержанных при температуре 200 °С (рис. 9), отмечается существенное увеличение числа зарегистрированных сигналов АЭ и постепенное накопление кластеров в течение эксперимента. Максимальное накопление наблюдается в кластере 2 (излом с выскальзыванием волокон, менее выражены межслоевые повреждения матрицы) и менее выражено в кластерах 5 (критические повреждения матрицы), 6 (излом волокон), 3 (излом, отклеивание и скольжение волокон) и 9 (микроповреждения матрицы).

На рис. 10 представлены результаты микроскопического исследования. Снимки производились в центре плоскости поперечного сечения в

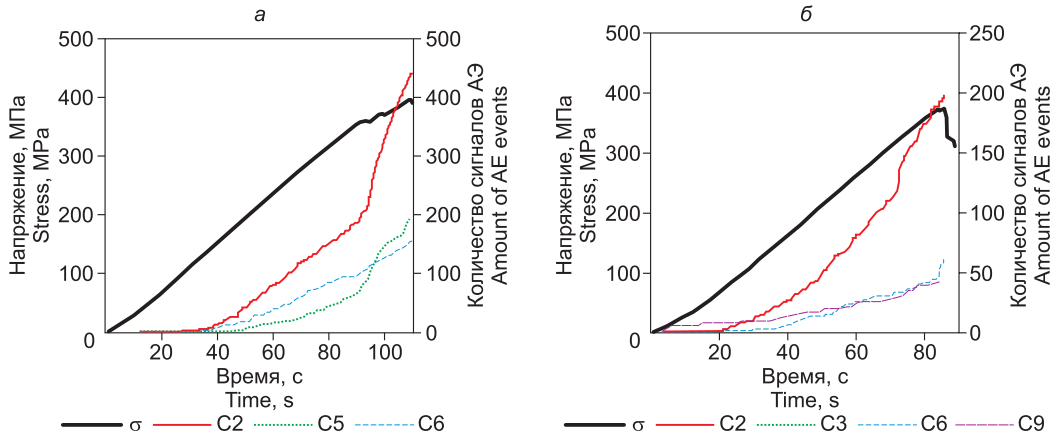


Рис. 9. Накопление кластеров в ходе испытания образцов (*а* – № 1; *б* – № 2), выдержанных при 200 °С.

Fig. 9. Accumulation of the clusters during testing of the samples (*а* – specimen 1; *б* – specimen 2) held at 200 °C.

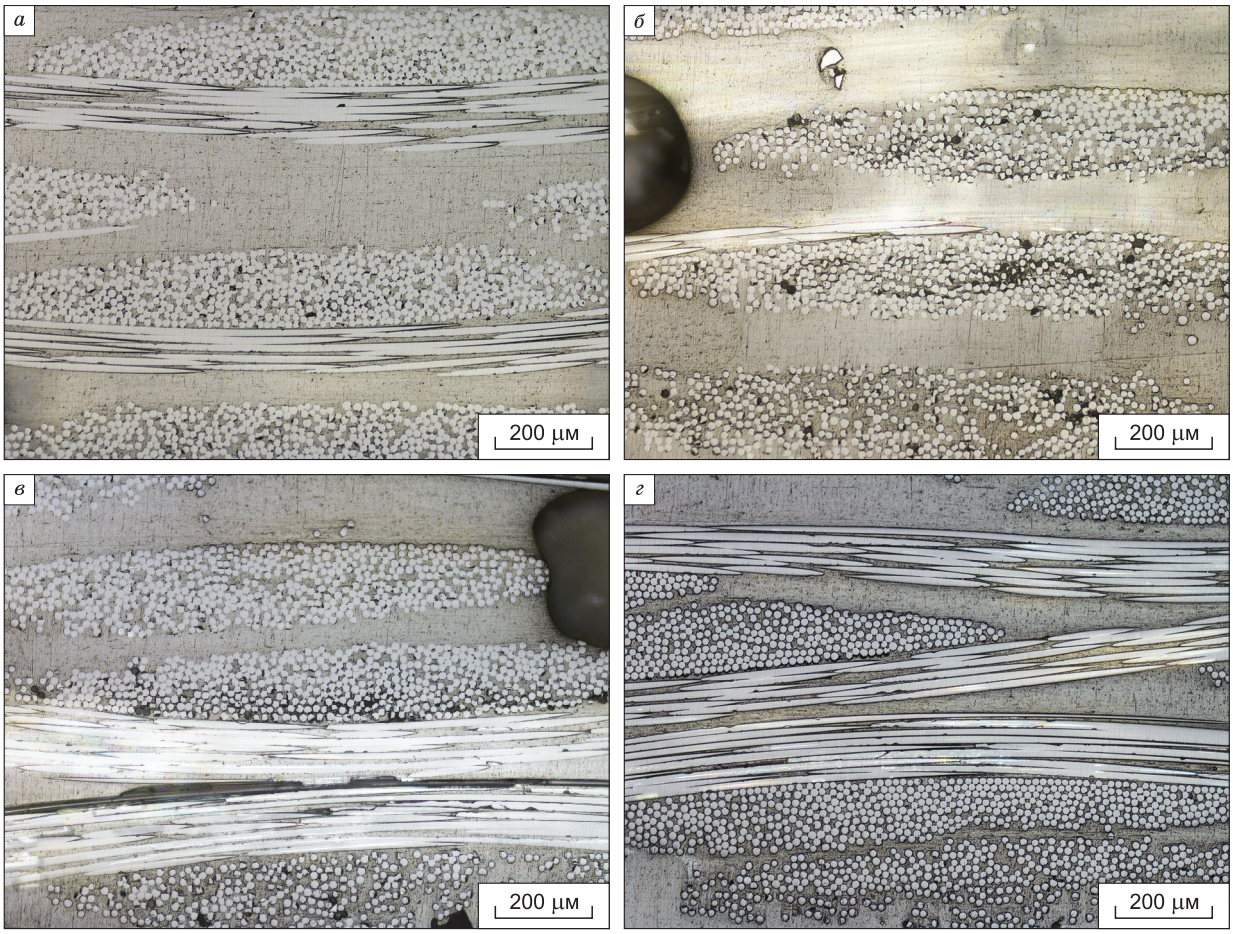


Рис. 10. Структура образцов в области разрушения при температурах, °С:
а – 60; *б* – 100; *в* – 120; *г* – 200.

Fig. 10. Structure of samples in the area of destruction at temperatures, °C:
а – 60; *б* – 100; *в* – 120; *г* – 200.

области разрушения с увеличением микроскопа 100 крат.

На полученных изображениях микроструктуры образцов (рис. 10) с температурой 100 °С и выше наблюдается деградация матрицы на границе со стекловолокнами. Явных повреждений, вызванных термоокислительным старением, при температуре 60 °С не наблюдаются. При температурах 100 °С и 120 °С видны повреждения матрицы по границах фазы волокно/матрица, которые впоследствии приводят к снижению способности матрицы связующего распределять напряжения в объеме ПКМ. При температуре 200 °С масштаб повреждений матрицы достигает уровня границ между матрицей и отдельными пучками стекловолокон, что сказывается на выскальзывании стекловолокон из мест их размещения и их разрушении при меньших напряжениях, чем в образцах с меньшей температурой термоокислительного старения.

На основании качественного описания характера повреждений по регистрируемым сигналам АЭ, подтвержденного микроскопическим анализом структурной деградации ПКМ, можно утверждать, что увеличение температуры выдержки ПКМ до 200 °С приводит к критическому разрушению матрицы и нарушению ее функции распределения напряжения по наполнителю в условиях приложения внешней нагрузки.

Выводы

На основании результатов применения метода кластеризации данных АЭ, зарегистрированной при механических испытаниях трехточечным изгибом образцов ПКМ, получена характеристика влияния повышения температуры эксплуатации на протекание процесса накопления структурных повреждений.

В условиях воздействия высокой температуры наибольшее негативное воздействие оказывается на матрицу ПКМ. При выдержке в условиях повышенной температуры до 100 °С деградация матрицы проявляется незначительно за счет увеличения микроповреждений матрицы. Однако в условиях выдержки при температурах свыше 120 °С значительно увеличивается доля повреждений по типу нарушения адгезии между матрицей и армирующим материалом, вызывая снижение прочности полимерной матрицы и ее неспособность к эффективному распределению внутренних напряжений по объему ПКМ.

Литература

1. *Kensche C.W.* Fatigue of composites for wind turbines // International journal of fatigue. 2006. Vol. 28, No. 10. P. 1363–1374. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2006.02.040

2. *Saeedifar M. et al.* Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 144. P. 206–219. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.028

3. *Bohmann T., Schlamp M., Ehrlich I.* Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics //Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 155. P. 444–451. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.09.018

4. *Ramesh C. et al.* Effect of hydrolytic ageing on Kevlar/polyester using acoustic emission monitoring // Journal of Nondestructive Evaluation. 2012. Vol. 31, No. 2. P. 140–147. DOI:10.1007/s10921-012-0129-9

5. *Shin P.S. et al.* Interfacial properties and water resistance of epoxy and CNT-epoxy adhesives on GFRP composites // Composites Science and Technology. 2017. Vol. 142. P. 98–106. DOI:10.1016/j.compscitech. 2017.01.026

6. *Doan D.D. et al.* An unsupervised pattern recognition approach for AE data originating from fatigue tests on polymer–composite materials // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 64. P. 465–478. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.04.011

7. *Philippidis T.P., Assimakopoulou T.T.* Strength degradation due to fatigue-induced matrix cracking in FRP composites: An acoustic emission predictive model // Composites science and technology. 2008. Vol. 68, No. 15-16. P. 3272–3277. DOI:10.1016/j.compscitech. 2008.08.020

8. *Ohtsu M., Ono K.* Pattern recognition analysis of acoustic emission from unidirectional carbon fiber-epoxy composites by using autoregressive modeling // Journal of Acoustic Emission. 1987. Vol. 6. P. 61–71.

9. *Heidary H. et al.* Clustering of acoustic emission signals collected during drilling process of composite materials using unsupervised classifiers // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. No. 5. P. 559–571. DOI:10.1177/0021998314521258

10. *Zhou W., Zhang P., Zhang Y.* Acoustic emission based on cluster and sentry function to monitor tensile progressive damage of carbon fiber woven composites // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 2265. DOI: 10.3390/app8112265

11. *Nazmdar Shahri M. et al.* Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // Journal of Composite Materials. 2016. Vol. 50. No. 14. P. 1897–1907. DOI:10.1177/ 0021998315597555

12. *Godin N., Reynaud P., Fantozzi G.* Challenges and limitations in the identification of acoustic emission signature of damage mechanisms in composites materials // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, No. 8. P. 1267. DOI:10.3390/app8081267

13. *Pineau P., Dau F.* Subsampling and homogenization to investigate variability of composite material mechanical properties // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2012. Vol. 241. P. 238–245. DOI:10.1016/j.cma.2012.06.003

14. *Calabrese L., Campanella G., Proverbio E.* Noise removal by cluster analysis after long time AE corrosion monitoring of steel reinforcement in concrete // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 34. P. 362–371. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.046

15. *Rescalvo F.J. et al.* Health monitoring of timber beams retrofitted with carbon fiber composites via the acoustic emission technique // Composite structures. 2018. Vol. 206. P. 392–402. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.08.068

16. *Crivelli D., Guagliano M., Monici A.* Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. P. 948–959. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.09.005

17. *Roundi W. et al.* Acoustic emission monitoring of damage progression in glass/epoxy composites during static and fatigue tensile tests //Applied Acoustics. 2018. Vol. 132. P. 124–134. DOI:10.1016/j.apacoust.2017.11.017

18. *Ech-Choudany Y. et al.* Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // Applied Acoustics. 2017. Vol. 123. P. 123–132. DOI:10.1016/j.apacoust.2017.03.008

19. *Sause M.G.R.* On use of signal features for acoustic emission source identification in fibre-reinforced composites //Journal of Acoustic Emission. 2018. Vol. 35. P. 129–140.

20. *Zhou W. et al.* Cluster analysis of acoustic emission signals and deformation measurement for delaminated glass fiber epoxy composites // Composite Structures. 2018. Vol. 195. P. 349–358. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.04.081

21. *Karimi N.Z., Minak G., Kianfar P.* Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission //Composite Structures. 2015. Vol. 131. P. 107–114. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.04.025

22. *Gutkin R. et al.* On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical systems and signal processing. 2011. Vol. 25, No. 4. P. 1393–1407. DOI:10.1016/j.ymssp.2010.11.014

23. *Eaton M.J. et al.* Principal component analysis of acoustic emission signals from landing gear components: an aid to fatigue fracture detection // Strain. 2011. Vol. 47. P. e588-e594. DOI:10.1111/j.1475-1305.2009.00661.x

24. *De Oliveira R., Marques A.T.* Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks // Computers & structures. 2008. Vol. 86. No. 3-5. P. 367–373. DOI:10.1016/j.compstruc.2007.02.015

25. *Enoki M., Muto Y., Shiraiwa T.* Evaluation of deformation behavior in LPSO-magnesium alloys by AE clusteringand inverse analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S71–S71.

26. *Sause M.G.R.* Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S223–S223.

27. *Брянский А.А., Башков О.В.* Кластеризация сигналов акустической эмиссии при анализе кинетики накопления повреждений в полимерном композиционном материале // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021). 2021. P. 124.

28. *McCrory J.P. et al.* Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques //Composites Part B: Engineering. 2015. Vol. 68. P. 424–430. DOI:10.1016/j.compositesb.2014.08.046

29. *Hao W. et al.* Acoustic emission monitoring of damage progression in 3D braiding composite shafts during torsional tests // Composite Structures. 2019. Vol. 208. P. 141–149. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.10.011

30. *Boominathan R. et al.* Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon/epoxy laminates // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. P. 591–598. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.09.002

31. *Willems F., Benz J., Bonten C.* Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. 261–270

Поступила в редакцию 20.05.2021
Принята к публикации 07.07.2021

Об авторах

БРЯНСКИЙ Антон Александрович, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Россия,
http://orcid.org/0000-0001-7992-0165, M-4658-2016, bryansky.aa@yandex.ru;

БАШКОВ Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Россия,
http://orcid.org/0000-0002-3910-9797, A-3441-2013, bashkov_ov@mail.ru;

МАЛЫШЕВА Дарья Павловна, аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Россия,
http://orcid.org/0000-0002-0738-9640.

Информация для цитирования

Брянский А.А., Башков О.В., Малышева Д.П. Исследование термоокислительного старения ПКМ с использованием метода акустической эмиссии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 3. С. 155–168. https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-155–168

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-3-155–168

Investigation on thermooxidative aging of the polymer composite material by acoustic emission

A.A. Bryansky*, O.V. Bashkov, D.P. Malysheva

Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia
**bryansky.aa@yandex.ru*

Abstract. *Results of the investigation on the effect of thermooxidative aging conditions on the destruction of polymer composite material (PCM) based on recordable parameters of acoustic emission (AE) are reported. The objects of investigation were the samples cut out of a fiberglass plate. The plate was made by vacuum infusion using the Derakane 411-350 binder and 9 layers of St-62004 glass fabric. Samples were aged by exposing in the muffle furnace for 96 hours at a temperature of 60, 100, 120 and 200 °C. Mechanical tests were carried out by three-point static bending. AE was recorded with the hardware and software complex deleloped at the Komsomolsk-na-Amure State University. Two-stage clusterization of the frequency components of the signal spectra of the detected AE was carried out using the Kohonen self-organizing map according to the procedure developed previously and tested by the authors. The types of damage of PCM structure are characterized over the centroids of the resulting clusters. The kinetics of destruction process is described on the basis of cluster accumulation during mechanical tests, depending on the conditions of thermooxidative aging. The negative effect of increased temperature on the degradation of the polymer matrix was determined, leading to a decrease in the ability of efficient distribution of internal strain in the matrix over the PCM volume due to distortion of the adhesion with reinforcing material.*

Keywords: polymer composite material, fiberglass, aging, destruction, acoustic emission, clustering.

Acknowledgements. *The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project number 21-19-00896).*

References

1. *Kensche C.W.* Fatigue of composites for wind turbines // International journal of fatigue. 2006. Vol. 28, No. 10. P. 1363–1374. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2006.02.040

2. *Saeedifar M. et al.* Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 144. P. 206–219. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.028

3. *Bohmann T., Schlamp M., Ehrlich I.* Acoustic emission of material damages in glass fibre-reinforced plastics //Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 155. P. 444–451. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.09.018

4. *Ramesh C. et al.* Effect of hydrolytic ageing on Kevlar/polyester using acoustic emission monitoring // Journal of Nondestructive Evaluation. 2012. Vol. 31, No. 2. P. 140–147. DOI:10.1007/s10921-012-0129-9

5. *Shin P.S. et al.* Interfacial properties and water resistance of epoxy and CNT-epoxy adhesives on GFRP composites // Composites Science and Technology. 2017. Vol. 142. P. 98–106. DOI:10.1016/j.compscitech. 2017.01.026

6. *Doan D.D. et al.* An unsupervised pattern recognition approach for AE data originating from fatigue tests on polymer–composite materials // Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. Vol. 64. P. 465–478. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.04.011

7. *Philippidis T.P., Assimakopoulou T.T.* Strength degradation due to fatigue-induced matrix cracking in FRP composites: An acoustic emission predictive model // Composites science and technology. 2008. Vol. 68, No. 15-16. P. 3272–3277. DOI:10.1016/j.compscitech.2008.08.020

8. *Ohtsu M., Ono K.* Pattern recognition analysis of acoustic emission from unidirectional carbon fiber-epoxy composites by using autoregressive modeling // Journal of Acoustic Emission. 1987. Vol. 6. P. 61–71.

9. *Heidary H. et al.* Clustering of acoustic emission signals collected during drilling process of composite materials using unsupervised classifiers // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. No. 5. P. 559–571. DOI:10.1177/0021998314521258

10. *Zhou W., Zhang P., Zhang Y.* Acoustic emission based on cluster and sentry function to monitor tensile progressive damage of carbon fiber woven composites // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. No. 11. P. 2265. DOI:10.3390/app8112265

11. *Nazmdar Shahri M. et al.* Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // Journal of Composite Materials. 2016. Vol. 50. No. 14. P. 1897–1907. DOI:10.1177/0021998315597555

12. *Godin N., Reynaud P., Fantozzi G.* Challenges and limitations in the identification of acoustic emission signature of damage mechanisms in composites materials // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, No. 8. P. 1267. DOI:10.3390/app8081267

13. *Pineau P., Dau F.* Subsampling and homogenization to investigate variability of composite material mechanical properties // Computer methods in applied mechanics and engineering. 2012. Vol. 241. P. 238–245. DOI:10.1016/j.cma.2012.06.003

14. *Calabrese L., Campanella G., Proverbio E.* Noise removal by cluster analysis after long time AE corrosion monitoring of steel reinforcement in concrete // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 34. P. 362–371. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.046

15. *Rescalvo F.J. et al.* Health monitoring of timber beams retrofitted with carbon fiber composites via the acoustic emission technique // Composite structures. 2018. Vol. 206. P. 392–402. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.08.068

16. *Crivelli D., Guagliano M., Monici A.* Development of an artificial neural network processing technique for the analysis of damage evolution in pultruded composites with acoustic emission // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. P. 948–959. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.09.005

17. *Roundi W. et al.* Acoustic emission monitoring of damage progression in glass/epoxy composites during static and fatigue tensile tests //Applied Acoustics. 2018. Vol. 132. P. 124–134. DOI:10.1016/j.apacoust.2017.11.017

18. *Ech-Choudany Y. et al.* Unsupervised clustering for building a learning database of acoustic emission signals to identify damage mechanisms in unidirectional laminates // Applied Acoustics. 2017. Vol. 123. P. 123–132. DOI:10.1016/j.apacoust.2017.03.008

19. *Sause M.G.R.* On use of signal features for acoustic emission source identification in fibre-reinforced composites //Journal of Acoustic Emission. 2018. Vol. 35. P. 129–140.

20. *Zhou W. et al.* Cluster analysis of acoustic emission signals and deformation measurement for delaminated glass fiber epoxy composites // Composite Structures. 2018. Vol. 195. P. 349–358. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.04.081

21. *Karimi N.Z., Minak G., Kianfar P.* Analysis of damage mechanisms in drilling of composite materials by acoustic emission //Composite Structures. 2015. Vol. 131. P. 107–114. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.04.025

22. *Gutkin R. et al.* On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses // Mechanical systems and signal processing. 2011. Vol. 25, No. 4. P. 1393–1407. DOI:10.1016/j.ymssp.2010.11.014

23. *Eaton M.J. et al.* Principal component analysis of acoustic emission signals from landing gear components: an aid to fatigue fracture detection // Strain. 2011. Vol. 47. P. e588-e594. DOI:10.1111/j.1475-1305.2009.00661.x

24. *De Oliveira R., Marques A.T.* Health monitoring of FRP using acoustic emission and artificial neural networks // Computers & structures. 2008. Vol. 86. No. 3-5. P. 367–373. DOI:10.1016/j.compstruc.2007.02.015

25. *Enoki M., Muto Y., Shiraiwa T.* Evaluation of deformation behavior in LPSO-magnesium alloys by AE clusteringand inverse analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S71–S71.

26. *Sause M.G.R.* Acoustic emission source identification in large scale fibre reinforced composites // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. S223–S223.

27. *Bryansky A.A., Bashkov O.V.* Klasterizaciya signalov akusticheskoj e›missii pri analize kinetiki nakopleniya povrezhdenij v polimernom kompozicionnom materiale // Vserossijskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem «Aktual'nye problemy metoda akusticheskoj e'missii» (APMAE›-2021). 2021. P. 124.

28. *McCrory J.P. et al.* Damage classification in carbon fibre composites using acoustic emission: A comparison of three techniques //Composites Part B: Engineering. 2015. Vol. 68. P. 424–430. DOI:10.1016/j.compositesb.2014.08.046

29. *Hao W. et al.* Acoustic emission monitoring of damage progression in 3D braiding composite shafts during torsional tests // Composite Structures. 2019. Vol. 208. P. 141–149. DOI:10.1016/j.compstruct.2018.10.011

30. *Boominathan R. et al.* Acoustic emission characterization of the temperature effect on falling weight impact damage in carbon/epoxy laminates // Composites Part B: Engineering. 2014. Vol. 56. P. 591–598. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.09.002

31. *Willems F., Benz J., Bonten C.* Detecting the critical strain of fiber reinforced plastics by means of acoustic emission analysis // Journal of Acoustic Emission. 2016. Vol. 33. P. 261–270

About the authors

BRYANSKY, Anton Aleksandrovich, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia,
http://orcid.org/0000-0001-7992-0165, M-4658-2016, bryansky.aa@yandex.ru;

BASHKOV, Oleg Viktorovich, Dr. Sci. (Eng.), professor, head of the department, Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-3910-9797, A-3441-2013, bashkov_ov@mail.ru;

MALYSHEVA, Darya Pavlovna, postgraduate student, Komsomolsk-na-Amure State University, 27 Lenina pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russia,
http://orcid.org/0000-0002-0738-9640.

Citation

Bryansky A.A., Bashkov O.V., Malysheva D.P. Investigation on thermooxidative aging of the polymer composite material by acoustic emission // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2021, Vol. 26, No. 3. pp. 155–168. (In Russ.) https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-3-155–168