

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 26, № 1 (январь – март), 2023 г.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ
БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ



EARTH SCIENCES
BIOLOGICAL SCIENCES

Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 26, N 1 (January – March), 2023

16+

ISSN 1560-9278
eISSN 1997-4736

Вестник МГТУ

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТОМ 26, № 1 (январь – март), 2023 г.**



Vestnik of MSTU

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE
TECHNICAL UNIVERSITY
VOLUME 26, N 1 (January – March), 2023**

**Мурманск
2023**

ВЕСТНИК МГТУ
Том 26, № 1 (январь – март), 2023 г.
Научный журнал
Издается с января 1998 г.
Выходит один раз в три месяца

Учредитель

ФГАОУ ВО "Мурманский государственный
технический университет"

Главный редактор

Власов А. Б., д-р техн. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

**Редакционная коллегия
по направлению "Науки о Земле"**

Заместитель главного редактора

Козлов Н. Е., д-р геол.-минерал. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

по направлению "Биологические науки"

Заместитель главного редактора

Шошина Е. В., д-р биол. наук, профессор
(Мурманск, Россия)

Члены редакционной коллегии:

Войтеховский Ю. Л., д-р геол.-минерал. наук,
профессор (Апатиты, Россия)

Вревский А. Б., д-р геол.-минерал. наук
(Санкт-Петербург, Россия)

Жиров В. К., д-р биол. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

Каулина Т. В., д-р геол.-минерал. наук
(Апатиты, Россия)

Козырев А. А., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

Макаров Д. В., д-р техн. наук, доцент
(Апатиты, Россия)

Маслобоев В. А., д-р техн. наук
(Апатиты, Россия)

Никифоров С. Л., д-р геогр. наук
(Москва, Россия)

Николаев А. И., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

Скублов С. Г., д-р геол.-минерал. наук, доцент
(Санкт-Петербург, Россия)

Скуфьин П. К., д-р геол.-минерал. наук
(Апатиты, Россия)

Смирнов М. Ю., канд. физ.-мат. наук,
адъюнкт-профессор (Лулео, Швеция)

Сорохтин Н. О., д-р геол.-минерал. наук
(Москва, Россия)

Терехова В. А., д-р биол. наук, доцент
(Москва, Россия)

Терещенко С. В., д-р техн. наук, профессор
(Апатиты, Россия)

Янг Д., д-р (Пекин, Китай)

Адрес редакции

183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.
Тел.: (8152) 40-33-56.
E-mail: redvst@mstu.edu.ru

VESTNIK OF MSTU
Volume 26, N 1 (January – March), 2023
Scientific journal
Published since January 1998
Issued quarterly

Founder

FSAEI HE "Murmansk State
Technical University"

Editor-in-Chief

Vlasov A. B., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Murmansk, Russia)

**The Editorial Board
(Earth Sciences)**

Deputy Editor

Kozlov N. E., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Professor (Apatity, Russia)

Biological Sciences

Deputy Editor

Shoshina E. V., Dr Sci. (Biology), Professor
(Murmansk, Russia)

The Editorial Board Members:

Voytekhovskiy Yu. L., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Professor (Apatity, Russia)

Vrevskiy A. B., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Saint Petersburg, Russia)

Zhirov V. K., Dr Sci. (Biology), Professor
(Apatity, Russia)

Kaulina T. V., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Apatity, Russia)

Kozyrev A. A., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Apatity, Russia)

Makarov D. V., Dr Sci. (Engineering),
Ass. Professor (Apatity, Russia)

Masloboev V. A., Dr Sci. (Engineering)
(Apatity, Russia)

Nikiforov S. L., Dr Sci. (Geography)
(Moscow, Russia)

Nikolaev A. I., Dr Sci. (Engineering), Professor
(Apatity, Russia)

Skublov S. G., Dr Sci. (Geol.&Min.),
Ass. Professor (Saint Petersburg, Russia)

Skuf'in P. K., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Apatity, Russia)

Smirnov M. Yu., Cand. Sci. (Phys.&Math.),
Adjunct Professor (Luleå, Sweden)

Sorokhtin N. O., Dr Sci. (Geol.&Min.)
(Moscow, Russia)

Terekhova V. A., Dr Sci. (Biology),
Ass. Professor (Moscow, Russia)

Tereshchenko S. V., Dr Sci. (Engineering),
Professor (Apatity, Russia)

Yang J., Dr (Peking, China)

The Editorial Office address

MSTU, Sportivnaya St., 13, 183010, Murmansk, RUSSIA.
Phone: (8152) 40-33-56.
E-mail: redvst@mstu.edu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

ISSN 1560-9278 (Print) © ФГАОУ ВО "Мурманский государственный технический университет", 2023
ISSN 1997-4736 (Online) © FSAEI HE "Murmansk State Technical University", 2023

СО Д Е Р Ж А Н И Е

Науки о Земле

Геология

- Калинин А. А., Кудряшов Н. М., Савченко Е. Э.** Малъявр – первое рудопроявление золота в архейских конгломератах Кольского региона..... 5
- Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Марчук Т. С.** Развитие Кейвского домена в докембрии..... 18

Геоэкология

- Амосов П. В., Бакланов А. А.** Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL..... 25
- Васильева Ж. В., Васильев А. Г., Кирдишова Е. А.** Анализ неточностей и несоответствий в актуальной редакции стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009..... 45

Палеоботаника

- Наугольных С. В., Линкевич В. В.** Новые находки остатков среднекаменноугольных растений в Ростовской области..... 57

Биологические науки

Морская зоология

- Копий В. Г.** Характеристика таксономического состава полихет в акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море)..... 69

Биоэкология

- Петров А. Н., Неврова Е. Л.** Экспериментальная оценка токсикорезистентности бентосной микроводоросли *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) при воздействии ионов меди..... 78

C O N T E N T S

Earth Sciences

Geology

- Kalinin A. A., Kudryashov N. M., Savchenko Ye. E.** Mal'javr – the first gold prospect in the Archean conglomerates, the Kola region..... 5
- Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Marchuk T. S.** Evolution of the Keivy domain in the Precambrian..... 18

Geoecology

- Amosov P. V., Baklanov A. A.** Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for studying dusting processes at tailings dumps using COMSOL software..... 25
- Vasileva Zh. V., Vasilev A. G., Kirdishova E. A.** Analysis of errors and inaccuracies in the current edition of the GOST R ISO 7730-2009 standard..... 45

Palaeobotany

- Naugolnykh S. V., Linkevich V. V.** New data on Carboniferous plants of the Rostov-on-Don Region (Russia)..... 57

Biological Sciences

Marine Zoology

- Kopiy V. G.** Taxocene of polychaeta of the Laspi Bay water area (the Crimea, Black Sea)..... 69

Bioecology

- Petrov A. N., Nevrova E. L.** Experimental evaluation of toxic resistance of benthic microalgae *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) under the copper ions impact..... 78

УДК 553.411+553.22+552.2 (470.21)

Мальявр – первое рудопроявление золота в архейских конгломератах Кольского региона

А. А. Калинин*, Н. М. Кудряшов, Е. Э. Савченко

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
21.12.2022;

получена
после доработки
18.01.2023;

принята к публикации
20.01.2023

Ключевые слова:

Урагубский
зеленокаменный пояс,
конгломераты,
метасоматоз,
золото,
арсенопирит

В статье рассматриваются особенности геологического строения и минералого-геохимические характеристики нового для Кольского региона типа проявления минерализации золота. Рудопроявление Мальявр расположено на юго-западном фланге Урагубского зеленокаменного пояса, в пределах толщи биотитовых гнейсов – метаморфизованных осадочных пород, представленных чередованием слоев полимиктовых конгломератов, гравелитов и песчаников. Золотосодержащая сульфидная минерализация связана с метасоматитами, образующими серию линзовидных тел, размещение которых контролируется сдвиговой зоной северо-северо-восточного простирания. Тела метасоматитов зональные: центральная часть сложена кварц-гранатовой породой, занимающей 50–80 % объема линзы, промежуточная зона имеет биотит-гранатовый состав, внешняя зона – геденбергит-амфиболовая, но она иногда бывает редуцирована. В составе породы при развитии метасоматитов возрастает содержание железа, снижается содержание алюминия, кремния и щелочных металлов – натрия и калия, кальций перераспределяется во внешние зоны метасоматических образований, наиболее инертно ведет себя магний. По сравнению с малоизмененными биотитовыми гнейсами в метасоматитах снижается концентрация Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb, легких редкоземельных элементов, U, Pb, возрастает содержание Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi, т. е. элементов-спутников золота. Сульфидная минерализация с золотом характерна для всех зон метасоматической колонки. В составе минерализации преобладают пирротин, ильменит и арсенопирит, второстепенные и редкие минералы – халькопирит, пентландит, магнетит, точилинит, самородное золото, поздние пирит и марказит. Развитие метасоматитов и минерализации в них происходило при высокой температуре (> 600 °С), более поздние процессы – около 400 °С. Предполагается, что золото-арсенопиритовая минерализация формировалась за счет мышьяка и золота, мобилизованных из вмещающих биотитовых гнейсов при региональном метаморфизме или при внедрении пегматитов.

Для цитирования

Калинин А. А. и др. Мальявр – первое рудопроявление золота в архейских конгломератах Кольского региона. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-5-17>.

Mal'javr – the first gold prospect in the Archean conglomerates, the Kola region

Arkadiy A. Kalinin*, Nikolay M. Kudryashov, Yevgeniy E. Savchenko

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk Region, Russia;
e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Article info

Received
21.12.2022;

received
in revised form
18.01.2023;

accepted
20.01.2023

Key words:

Uragubsky
greenstone belt,
conglomerate,
alteration,
gold,
arsenopyrite

Abstract

A new type of prospects of gold mineralization in the Kola region is considered in the paper. The Mal'javr prospect is located in the south-western flank of the Uragubsky greenstone belt in biotite gneiss – the metamorphosed sedimentary rocks with interlayering of polymictic conglomerate, gravelite, and sandstone. Gold-bearing sulfide mineralization was found in altered rocks, which form a series of lens-shaped bodies, concentrated along a shear zone of NNE strike. The bodies of altered rocks are zonal: the central zone makes 50–80 % of the lens volume, it consists of garnet and quartz, the intermediate zone is of garnet-biotite mineral composition, and in the outer zone, which is often reduced, the main minerals are hedenbergite, hornblende, and grunerite. The metasomatic alteration is connected with an increase of iron content, decrease of Al, Si, and alkaline metals Na and K, redistribution of calcium to the outer zone of metasomatic lenses; and magnesium is inert. If compared to the unaltered gneiss, the altered rocks are depleted in Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb; and content of Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi (all these elements are known to associate with gold) increases. All zones of altered rocks are rich in sulfide mineralization. Pyrrhotite and arsenopyrite are the main sulfide minerals, minor minerals are chalcopyrite, pentlandite, magnetite, tochiinite, native gold, and late pyrite and marcasite. Rock alteration and formation of sulfide mineralization happened at a high temperature > 600 °С, and the late alteration processes at ~400 °С. The arsenopyrite-gold mineralization probably formed with As and Au mobilized from the host biotite gneiss during regional metamorphism or due to pegmatite vein intrusion.

For citation

Kalinin, A. A. et al. 2023. Mal'javr – the first gold prospect in the Archean conglomerates, the Kola region. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 5–17. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-5-17>.

Введение

Конгломераты докембрия являются одним из основных источников золота на Земле: половина всего добытого из недр золота была извлечена из конгломератов бассейна Витватерсранд в Южной Африке (Tucker et al., 2016). Месторождения золота в конгломератах известны и в других регионах мира, в частности, в Гане (Западная Африка) – Тарква (Smith et al., 2016), Австралии – в кратоне Пилбара (Munroe et al., 2018), Бразилии – Якобина (Milesi et al., 2002), Индии – в кратоне Сингхбхум (Chakravarti et al., 2017), Канаде – Пардо (Ulrich et al., 2011; Long et al., 2011).

Общими для месторождений золота в конгломератах раннего докембрия являются следующие характеристики:

- золотоносными могут быть конгломераты как кварцевые, так и полимиктовые с галькой разного состава вплоть до гальки ультраосновных пород;
- в большинстве случаев золото связано с аллювиальными россыпями, вытянутыми по речным палеодолинам, но известны и морские переработанные россыпи;
- золото отмечается только в цементе конгломератов, гальки всегда безрудные;
- цемент может быть разным – глинистым, песчанистым, вплоть до грубообломочных песков;
- как правило, золото палеороссыпей переработано и переотложено в ходе более поздних гидротермально-метасоматических процессов.

На Фенноскандинавском щите месторождения золота в конгломератах не разрабатываются, но проявления этой генетической группы известны в Онежской и Лехтинской структурах палеопротерозойского возраста в Карелии, данные проявления связаны с переработанными россыпями в пределах веерных палеодельт¹.

В северо-восточной части Фенноскандинавского щита минерализация золота, связанная с конгломератами, до последнего времени не была известна, и рудопоявление Мальявр является первым объектом этого рода в Кольском регионе.

Цель работы – изучение особенностей геологического строения и минералого-геохимических характеристик нового для Кольского региона типа проявления минерализации золота – рудопоявления Мальявр.

Методы исследований

Материал для исследований собран авторами во время проведения полевых работ в Урагубском поясе летом 2022 г. В ходе геологических маршрутов изучались геолого-структурные особенности участка рудопоявления золота Мальявр, геологические взаимоотношения рудоносных и вмещающих пород, отбирались штучные и сколковые пробы, образцы, сколки на шлифы и аншлифы.

Химический анализ горных пород выполнен в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН (ГИ КНЦ РАН) по методикам, разработанным в лаборатории и приведенным на сайте института. Содержание благородных металлов определялось также в химико-аналитической лаборатории Геологического института КНЦ РАН методом атомной абсорбции с предварительным концентрированием алкиланилином и сульфидами нефти. ИСП-анализ пород на малые элементы выполнен в ЦКП "Геоаналитик" Института геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Минералогические и петрографические исследования проводились с помощью оптического микроскопа AxioPlan, снабженного блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете.

Исследования фазовой и внутрифазовой неоднородности минеральных индивидов, изучение химического состава минералов осуществлялось методами электронной микроскопии и электроннозондового микроанализа в лаборатории физических исследований пород руд и минералов в ГИ КНЦ РАН. Предварительная оценка состава минералов выполнялась с помощью энергодисперсионных приставок Röntec и Bruker X Flash-5010, установленных на сканирующем микроскопе LEO-1450 методом нестандартного анализа при помощи программного обеспечения QUANTAX 200 (что позволяет уточнить перечень элементов для последующего микронзондового анализа). При этом также получались изображения анализируемого материала в обратно рассеянных электронах.

Микронзондовый анализ для определения содержания основных компонентов и элементов-примесей выполнялся на микроанализаторе MS-46 CAMECA для зерен размером более 20 мкм. Условия съемки: ускоряющее напряжение – 22 кВ; ток зонда 30–40 нА, диаметр пучка зонда от 2 до 10 мкм в зависимости от устойчивости материала к току зонда. Время измерения – 10 с для главных элементов, 20 с – для элементов-примесей. Результаты 4–5 измерений усреднялись.

Результаты исследований

Рудопоявление золота Мальявр было обнаружено в ходе работ ВСЕГЕИ по геологическому доизучению поверхности в масштабе 1 : 200000 в пределах листов R-36-XXVII, XXVIII (Мурманск), первая информация о нем опубликована в работе (Вороняева и др., 2021).

¹ Сайт Управления недропользования Министерства по природопользованию и экологии Республики Карелия. URL: http://nedrark.karelia.ru/mnia/au_karelia.htm <http://gtkdata.gtk.fi/MDaE/>.

Рудопроявление Мальярв расположено в Титовско-Поросозерской шовной зоне, трассирующей сочленение Мурманского и Кольского мегаблоков Фенноскандинавского щита, в Урагубском зеленокаменном поясе, который является северо-западным продолжением зеленокаменного пояса Колмозеро-Воронья.

Слагающие Урагубский пояс супракристалльные породы отнесены к титовской толще среднего лопия, которая по геологическому положению и возрасту пород сопоставляется с колмозерской серией пояса Колмозеро-Воронья, но отличается от последней преобладанием в ее составе метаосадочных пород – биотитовых гнейсов – при подчиненной роли метавулканитов от ультраосновного до кислого состава, доля которых постепенно увеличивается вверх по разрезу толщи. В составе титовской толщи присутствуют также горизонты железистых кварцитов. Возраст вулканитов титовской толщи получен по магматическим цирконам из глиноземистых гнейсов (метадацитов), он составляет $2\,838 \pm 23$ млн лет (U-Pb, SHRIMP II) (Мыскова и др., 2005).

В основании разреза вулканогенно-осадочных пород зеленокаменного пояса на тектонизированном контакте с гранито-гнейсами Кольского мегаблока залегают галечные конгломераты (Богданова и др., 1965). Линзы аналогичных конгломератов отмечаются среди биотитовых гнейсов также и выше по разрезу. На таких участках породы сохранили элементы первичной слоистости – в разрезе чередуются песчаники, гравелиты, галечные конгломераты (рис. 1). Мощность отдельных слоев составляет десятки сантиметров. Обломочный материал песчаников, гравий в гравелитах и гальки в конгломератах имеют эллипсоидальную форму, представлены преимущественно материалом плагиогранитов (до диоритов), реже отмечаются кварцевые гальки. Гальки и гравий плагиогранитов сложены крупнозернистым олигоклазом № 11–20, частью серицитизированным (около 50 об.%), кварцем и биотитом (менее 5 %), отмечен также турмалин. Состав цемента конгломератов (кварц, плагиоклаз-лабрадор, биотит) аналогичен составу вмещающих и вышележащих биотитовых парагнейсов. Из аксессуарных минералов были установлены апатит, циркон, эпидот, хлорит, турмалин, алланит. Породы иногда в значительной степени мусковитизированы.



Рис. 1. Первичная осадочная слоистость в толще биотитовых гнейсов в расчистке (слева) и в глыбах (справа)
Fig. 1. Primary sedimentary bedding in biotite gneisses in clearing (left) and in blocks (right)

Вулканогенно-осадочные породы пояса метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации; возраст метаморфизма, установленный по цирконам метаморфического генезиса, составил $2\,786 \pm 31$ и $2\,774 \pm 12$ млн лет (Мыскова и др., 2005).

Золоторудное проявление расположено на юго-западном фланге пояса на участке, где биотитовые гнейсы прорываются жиллой турмалиновых пегматитов. Простириание биотитовых гнейсов (и пегматитовой жилы) субмеридиональное до 10° СВ, т. е. секущее по отношению к простирианию пояса в целом: супракристалльные породы образуют здесь открытую антиклинальную складку с шарниром, погружающимся на юго-запад.

Пегматитовая жила субмеридионального простириания достигает примерно 40 м мощности. В составе пегматитов преобладают кварц и плагиоклаз (альбит-олигоклаз), турмалин (шерл), мусковит, кроме того, отмечены биотит, апатит, циркон. Западный контакт пегматитовой жилы с гнейсами – резкий линейный, согласный простирианию вмещающих пород, восточный – через зоны интенсивной мигматизации мощностью

до 10 м и смятия гнейсов (рис. 2, 3). В зоне смятия гальки кварц-плаггиоклазового состава деформированы вместе с цементом.

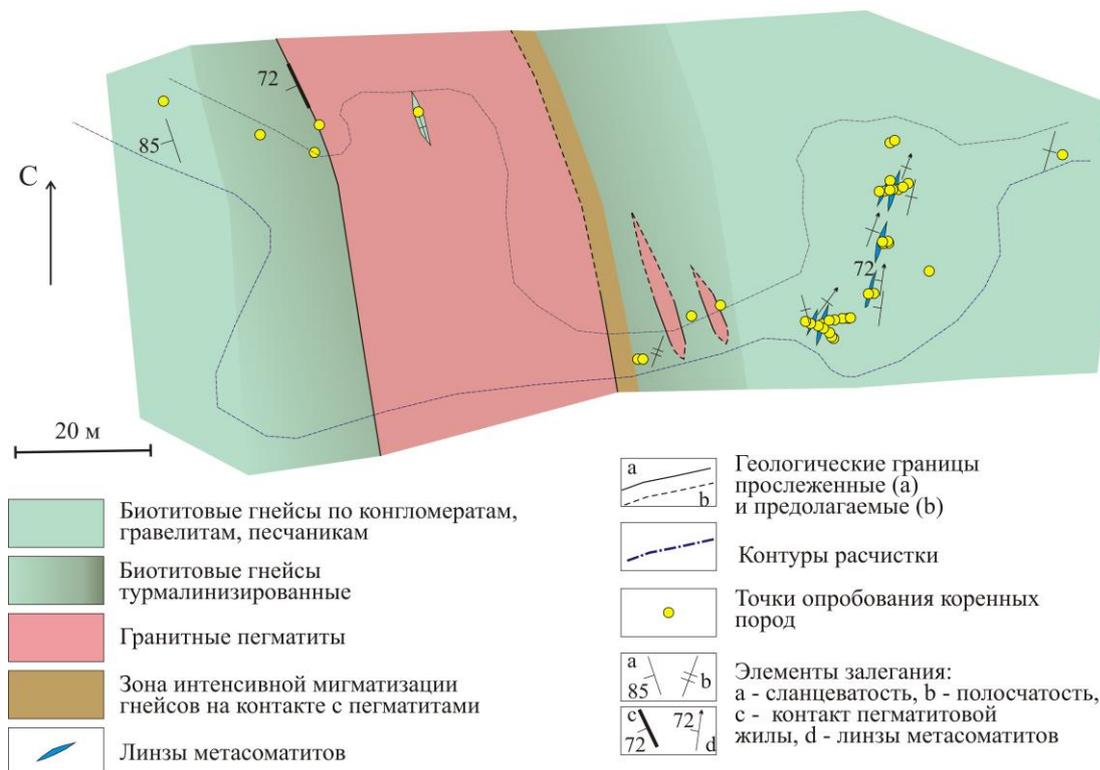


Рис. 2. Документация расчистки на г. Лисьей. Выполнена А. А. Калининым при участии студента МГТУ А. Ермолина

Fig. 2. Documentation of clearing on Lisyá mountain. Made by A. A. Kalinin with the participation of A. Yermolin (MSTU student)



Рис. 3. Смятые в складки биотитовые гнейсы-метакогломераты (слева) и метагравелиты (справа)
Fig. 3. Wrinkled biotite gneisses-metaconglomerates (left) and metagravels (right)

В пегматитах установлены ксенолиты вмещающих гнейсов, а в гнейсах присутствуют линзовидные тела пегматитов размером от десятков сантиметров до 20 м по длинной оси, секущие слоистость вмещающих пород (рис. 4). Вмещающие гнейсы турмалинизованы под воздействием пегматитов. Интенсивность турмалинизации и степень деформированности в гнейсах снижаются по мере удаления от пегматитовой жилы, сходя на нет через ~20 м.

Серия линзовидных тел метасоматитов, несущих сульфидную с золотом минерализацию, прослеживается в виде зоны мощностью около 10 м северо-северо-восточного простирания (10–15° СВ) согласно простиранию и сланцеватости вмещающих биотитовых сланцев. Размеры отдельных линз по длинной оси достигают 10 м, по мощности – до 1 м (рис. 2). Строение линз зональное: внешняя зона геденбергит-роговообманковая, далее следует зона биотит-гранатовая, а центральная часть линз сложена кварц-гранатовыми породами,

вплоть до гранатов (рис. 5). Границы зон в большинстве случаев резкие. Внешняя зона часто редуцирована и отмечена далеко не в каждом теле метасоматитов.



Рис. 4. Вверху – линзы турмалинсодержащих кварц-плагиоглазовых пегматитов в биотитовых гнейсах-метапесчаниках (слева) и метаконгломератах (справа), внизу слева – ксенолит биотитовых гнейсов в пегматите, справа – мигматизированный контакт пегматита с биотитовыми гнейсами

Fig. 4. Top – lenses of tourmaline-bearing quartz-plagioclase pegmatites in biotite gneisses-metasandstones (left) and metaconglomerates (right), bottom left – xenolith of biotite gneisses in pegmatite, right – migmatized contact of pegmatite with biotite gneisses



Рис. 5. Линзы метасоматических пород в биотитовых гнейсах-метаконгломератах
Fig. 5. Lenses of metasomatic rocks in biotite gneisses-metacglomerates

Породы всех зон пронизаны более поздними кварцевыми прожилками (рис. 5), ориентированными преимущественно по простиранию линзы. Текстура метасоматических пород массивная, породы крупнозернистые: размер зерен граната достигает 1 см, остальных минералов – первые миллиметры.

Изменение химического состава пород при развитии метасоматитов заключается в возрастании содержания железа при снижении алюминия, кремния и щелочных металлов – натрия и калия (табл. 1, рис. 6). Натрий выносятся практически полностью, а содержание алюминия и калия зависит от содержания в породе граната и биотита соответственно. Геденбергит-роговообманковая зона несколько обогащена кальцием.

Таблица 1. Химический состав горных пород рудопроявления Мальявр, мас. %
Table 1. Chemical composition of rocks of the Mal'javr ore occurrence, wt. %

Компоненты	ТУ-1	ТУ-36	ТУ-25	ТУ-33	ТУ-28	ТУ-29	ТУ-30	ТУ-31	ТУ-32	ТУ-35
SiO ₂	65,62	65,23	60,00	59,83	50,96	53,35	57,28	55,32	55,98	53,34
TiO ₂	0,51	0,55	0,73	0,13	0,11	0,25	0,34	0,33	0,3	0,38
Al ₂ O ₃	14,46	15,82	17,61	8,55	6,99	8,17	9,94	12,64	12,61	16,72
Fe ₂ O ₃	1,85	0,00	1,12	5,74	10,05	3,10	3,18	2,68	0,73	4,07
FeO	5,62	6,15	7,05	11,52	16,56	22,58	17,25	19,05	20,63	13,80
FeO*	6,91	5,54	7,47	16,11	24,95	23,42	18,71	19,83	19,30	16,49
MnO	0,07	0,21	0,13	0,14	0,12	0,11	0,15	0,18	0,20	0,29
MgO	1,80	2,22	2,95	2,36	2,72	2,66	2,84	3,03	3,11	3,01
CaO	2,03	2,07	1,78	4,62	2,85	2,24	1,44	2,71	3,07	1,90
Na ₂ O	3,08	3,29	3,02	0,16	0,094	0,049	0,19	0,061	0,086	0,78
K ₂ O	2,72	2,20	2,81	0,32	0,28	0,48	1,28	0,85	0,50	1,51
H ₂ O	0,15	0,10	0,06	0,28	0,04	0,00	0,09	0,09	0,06	0,26
ппп	0,00	1,78	1,26	2,35	0,83	1,40	2,39	1,88	1,98	1,84
S	0,03	0,05	0,04	3,08	7,11	5,11	2,84	0,79	0,52	1,63
P ₂ O ₅	0,09	0,10	0,09	0,50	0,49	0,41	0,28	0,22	0,07	0,21
CO ₂	1,82	< 0,1	0,83	< 0,1	0,41	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,14	< 0,1
F	0,049	0,032	0,038	0,032	0,031	0,03	0,033	0,026	0,014	0,033
Cl	0,012	0,018	0,011	0,008	0,007	0,009	0,015	0,011	0,011	0,012
Сумма	99,96	99,85	99,57	99,63	99,66	99,96	99,55	99,88	100,02	99,80
Au	0,004	0,004	0,004	0,23	0,2	1,22	0,25	0,052	0,039	0,049
Ag	0,21	0,19	0,15	0,94	1,42	1,71	0,98	1,28	0,28	0,68

Примечание. ТУ-1 и ТУ-36 – биотитовые гнейсы-метапесчаники, ТУ-25 – биотитовые гнейсы с гранатом на контакте с линзой метасоматитов, ТУ-33 – метасоматическая порода из геденбергит-роговообманковой зоны, ТУ-28, 29, 30, 31, 32, 35 – породы из кварц-гранатовой зоны.

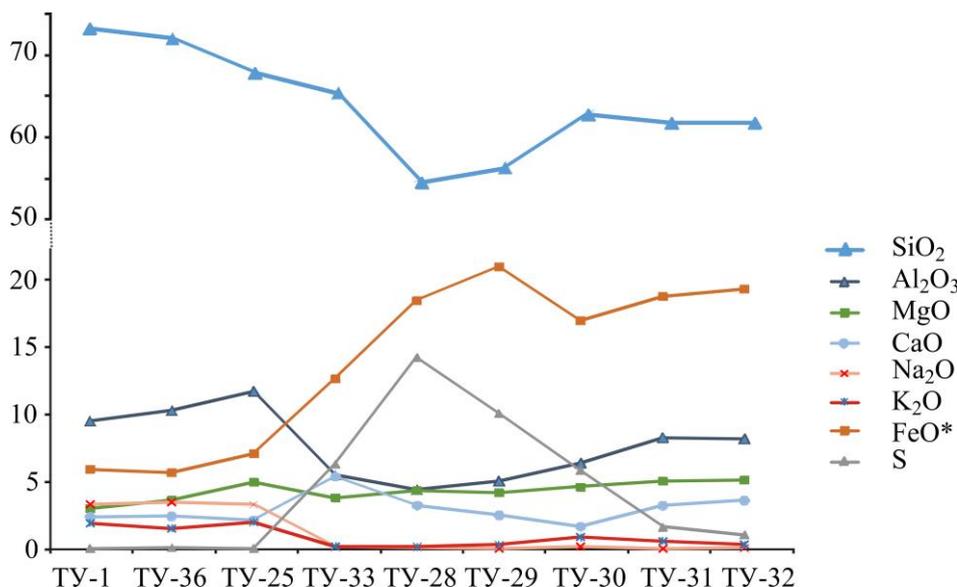


Рис. 6. Изменение содержания петрогенных элементов при формировании кварц-гранатовых метасоматитов, в мольных %. Типы пород – см. примечание к табл. 1. FeO* = FeO + 0,9×Fe₂O₃
Fig. 6. Change in the content of petrogenic elements during the formation of quartz-garnet metasomatites, in mole %. Rock types – see note to Table 1. FeO* = FeO + 0,9×Fe₂O₃

В метасоматитах по сравнению с биотитовыми гнейсами снижается концентрация Rb, Cs, Sr, Ba, Zr, Nb, легких редкоземельных элементов, U, Pb, возрастает содержание Cu, Zn, Mn, As, Ag, Te, W, Bi, Y (табл. 2), при этом для мышьяка и вольфрама характерен значительный разброс значений. Следует отметить высокий фон мышьяка в биотитовых гнейсах (табл. 2), в 3–15 раз превышающий кларковые значения для земной коры.

Таблица 2. Содержание малых элементов (в г/т) в породах рудопроявления Мальявр
Table 2. The content of trace elements (in g/t) in the rocks of the Mal'javr ore occurrence

Компоненты	ТУ-1	ТУ-36	ТУ-25	ТУ-28	ТУ-33	ТУ-29	ТУ-30	ТУ-31	ТУ-32	ТУ-35
Li	40	26	30	16	23	23	50	30	30	80
Be	1,2	1	0,6	0,18	1,4	0,08	0,18	0,33	0,4	0,7
Sc	5	7	11	6	5	5	10	13	7	11
Ti	1 600	1 700	2 000	400	500	1 100	1 500	1 800	1 300	1 600
V	50	60	70	26	40	40	60	80	60	70
Cr	60	80	100	25	50	33	80	150	90	100
Mn	310	900	600	1 000	1 000	800	1 200	1 600	1 400	2 000
Co	13	17	22	50	27	24	28	19	10	31
Ni	38	60	80	110	80	70	90	110	32	130
Cu	13,8	24	12,2	600	460	370	380	500	150	500
Zn	40	60	60	60	120	60	90	70	70	90
Ga	14	15	17	8	15	9	13	12	13	15
Ge	1,9	1,5	1,3	4	3	3	3	5	6	3
As	83	15,6	203	1 920	7,8	21,1	224	87	21,9	6,8
Se	0,17	0,22	0,26	3,8	2,1	3,2	1,9	< 0,07	0,63	1,46
Rb	85	47	61	11	11	19	49	22	18	56
Sr	170	110	100	11	24	15	27	19	17	50
Y	3	4	9	8	8	10	11	9	8	10
Zr	78	65	76	18	13	54	50	40,5	38,8	40,4
Nb	4,1	5	5	0,9	1,1	2,1	2,6	2,2	2,1	2,5
Mo	0,8	1,6	1,3	2,9	1	1,6	2,4	2,6	0,8	3,1
Ag	0,25	0,3	0,25	0,76	0,57	0,79	0,67	0,66	0,25	0,56
Cd	0,18	0,26	0,18	0,2	0,19	0,3	0,3	0,4	0,3	0,5
Sn	2,4	1,7	1,8	0,9	2,9	0,8	1,2	1,3	1,5	1,3
Sb	0,04	0,07	0,04	0,08	0,12	0,06	0,08	0,1	0,08	0,07
Te	0,033	0,029	0,02	0,52	0,36	0,61	0,3	< 0,01	0,1	0,19
Cs	19	3,4	7,8	1,1	0,9	1,9	5,5	2,7	2,1	6
Ba	370	270	400	19	12	40	170	60	50	160
LREE	55,3	52,1	74	31	24,6	55,5	55,6	26,7	22,4	28,9
HREE	7,61	8,77	13,24	8,13	8,87	11,15	12,58	10,43	8,59	10,02
Hf	2,3	2	2,4	0,57	0,4	1,5	1,4	1,7	1,2	1,2
Ta	0,5	1	0,45	0,24	0,16	0,37	0,35	0,39	0,32	0,4
W	0,9	1,6	1,3	0,7	30	0,4	1	140	0,6	1,5
Tl	0,6	0,4	0,4	0,05	0,04	0,08	0,21	0,13	0,08	0,24
Pb	10	10	10	1,2	2,4	1,7	1,8	1,8	1,5	3
Bi	0,128	0,32	0,088	3,2	7	8	2,6	0,8	1,5	2
Th	3,2	2,5	4	2,2	1,2	4	3,8	3,2	2,2	2,3
U	1,9	2,1	3,1	0,8	0,8	1,1	0,9	0,8	0,6	0,9

Железо-магнезиальные силикаты в метасоматических породах относятся к железистым разновидностям этих минералов – к геденбергиту, феррогорнблендиту (железистая роговая обманка), шамозиту, железистому биотиту (табл. 3).

Гранат во вмещающих гнейсах в экзоконтактовой зоне линзы метасоматитов представлен альмандином. Во внутренней зоне кристалла альмандина из гнейсов на контакте с линзой метасоматитов доля пироповой составляющей около 10 %, спессартиновой – 8 %, гроссуляровой – менее 4 %, во внешней зоне – 8, 4 и 10 % соответственно. В метасоматических породах геденбергит-роговообманкой зоны гранат относится к ряду альмандин – гроссуляр, доля гроссулярового минала 14–28 %, пиропового до 5 %, спессартинового близка к 0. В кварц-гранатовой зоне пироповый и гроссуляровый миналы в альмандине составляют примерно по 10 % каждый (табл. 4). Зональность состава в зернах граната заключается в некотором увеличении гроссулярового минала во внешней зоне.

Таблица 3. Химический состав железо-магнезиальных силикатных минералов, мас. %
Table 3. Chemical composition of iron-magnesian silicate minerals, wt. %

Компоненты	ТУ-25	ТУ-31	ТУ-43	ТУ-41	ТУ-41	ТУ-45	ТУ-43	ТУ-43	ТУ-31	ТУ-41	ТУ-45	ТУ-45
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	36,11	35,66	48,91	41,41	52,06	52,16	37,94	37,17	25,27	23,71	21,52	23,14
TiO ₂	1,45	1,50	0,03	0,23	0,05	0,00	0,07	0,07	0,06	0,08	0,03	0,06
Al ₂ O ₃	19,09	16,78	0,25	16,04	0,87	0,29	21,28	21,68	22,28	19,84	19,52	18,95
FeO	20,58	20,57	26,46	20,28	29,35	32,68	16,23	14,59	26,35	30,71	38,23	33,89
MgO	9,62	10,53	1,42	5,61	13,99	13,21	0,00	0,00	15,18	12,07	6,17	9,76
MnO	0,03	0,00	0,37	0,05	0,11	0,00	0,07	0,09	0,00	0,00	0,02	0,00
CaO	0,00	0,00	22,48	11,10	1,00	0,31	22,97	23,49	0,01	0,00	0,04	0,04
Na ₂ O	0,13	0,11	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	9,68	8,85	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00
V ₂ O ₃	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	не опр.	0,03	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,07	0,05	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	не опр.	0,00	0,00	0,00
NiO	0,07	0,00	не опр.	0,00	0,00	0,00	не опр.	не опр.	не опр.	0,00	не опр.	не опр.
ZnO	0,04	0,00	0,00	0,00	0,06	0,04	0,00	0,00	не опр.	0,00	не опр.	не опр.
Cl	0,05	0,08	не опр.	0,26	0,02	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	0,04	не опр.	не опр.
Сумма	96,94	94,17	99,91	97,40	97,51	99,09	98,55	97,08	89,39	86,89	85,82	85,95
Коэффициенты кристаллохимической формулы												
Si	3,029	3,075	1,997	6,370	7,860	7,881	3,150	3,128	2,626	2,627	2,536	2,638
Ti	0,091	0,097	0,001	0,026	0,006	0,000	0,004	0,004	0,004	0,006	0,003	0,005
Al ^{IV}	0,880	0,827	0,012	1,604	0,155	0,051	–	–	1,370	1,373	1,461	1,357
Al ^{VI}	1,007	0,878	–	1,284	–	–	2,082	2,150	1,359	1,218	1,250	1,189
Fe	1,444	1,484	0,904	2,609	3,706	4,130	1,014	0,924	2,290	2,846	3,766	3,231
Mg	1,202	1,354	0,086	1,286	3,148	2,977	0,000	0,000	2,352	1,994	1,083	1,659
Mn	0,002	0,000	0,013	0,006	0,014	0,000	0,005	0,006	0,000	0,000	0,002	0,000
Ca	0,000	0,000	0,984	1,830	0,162	0,050	2,043	2,118	0,001	0,000	0,004	0,004
Na	0,021	0,019	0,000	0,342	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	1,036	0,973	0,000	0,079	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,005	0,004	0,000
V	0,003	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	–	0,003	0,000	0,000
Cr	0,005	0,004	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	–	0,000	0,000	0,000
Ni	0,005	0,000	–	0,000	0,000	0,000	–	–	–	0,000	–	–
Zn	0,002	0,000	0,000	0,000	0,004	0,004	0,000	0,000	–	0,000	–	–

Примечание. 1, 2 – биотит, 3 – геденбергит, 4 – роговая обманка, 5–6 – грюнерит, 7–8 – эпидот, 9–12 – шамозит.

Таблица 4. Химический состав гранатов, мас. %
Table 4. Chemical composition of garnets, wt. %

Компоненты	ТУ-25	ТУ-25	ТУ-31	ТУ-31	ТУ-41	ТУ-41	ТУ-43	ТУ-43	ТУ-45	ТУ-45
SiO ₂	36,78	36,93	37,07	36,95	37,61	37,75	36,13	36,91	36,59	36,13
TiO ₂	0,00	0,04	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	0,09	0,05	0,00
Al ₂ O ₃	20,82	20,77	19,50	19,81	18,85	18,90	19,20	19,14	19,22	19,38
FeO	34,07	34,17	36,00	35,28	34,03	33,05	30,99	27,56	36,64	36,68
MgO	2,82	1,98	2,85	2,78	2,21	2,31	0,11	0,09	1,32	1,55
MnO	3,56	1,97	0,28	0,28	0,73	0,70	2,03	1,49	0,32	0,22
CaO	1,39	3,59	4,08	4,54	5,89	5,96	10,16	13,86	5,34	4,99
Сумма	99,43	99,46	99,88	99,69	99,46	98,74	98,67	99,14	99,90	99,39
Коэффициенты кристаллохимической формулы										
Si	2,991	3,001	3,012	3,001	3,062	3,082	2,991	3,012	3,011	2,989
Ti	0,000	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003	0,005	0,003	0,000
Al	1,995	1,989	1,867	1,897	1,808	1,819	1,873	1,841	1,864	1,890
Fe	2,318	2,322	2,446	2,396	2,317	2,257	2,145	1,880	2,522	2,538
Mg	0,341	0,240	0,345	0,336	0,268	0,281	0,014	0,011	0,162	0,191
Mn	0,245	0,135	0,020	0,019	0,050	0,048	0,142	0,103	0,022	0,016
Ca	0,121	0,313	0,355	0,395	0,513	0,521	0,901	1,211	0,471	0,442

Доли миналов альмандина (Alm), пиропа (Pyr), спессартина (Sps) и гроссуляра (Grs), %										
Alm	77	77	77	76	74	73	67	59	79	80
Pyr	11	8	11	11	9	9	0	0	5	6
Sps	8	4	1	1	2	2	4	3	1	0
Grs	4	10	11	13	16	17	28	38	15	14

Примечание. ТУ-25 – гнейсы на контакте с линзой метасоматитов, ТУ-31 – кварц-гранатовый метасоматит, ТУ-41, 43, 45 – метасоматиты геденбергит-амфиболовой зоны. Формулы биотитов рассчитаны на 12 атомов кислорода, геденбергита – на 6, амфиболов – на 23, эпидотов – на 13, хлоритов – на 14, гранатов – на 12 атомов кислорода.

Сульфидная минерализация в слабоизмененных биотитовых гнейсах-метапесчаниках и в цементе конгломератов представлена единичными мелкими (сотые доли миллиметра) зернами арсенопирита, пирротина, халькопирита и позднего, наложенного пирита. Среди оксидов преобладает ильменит, отмечены также единичные зерна магнетита. В биотитовых гнейсах в зоне мигматизации на контакте с пегматитовой жилой сульфидная минерализация не отмечена.

В линзах метасоматитов содержание рудных минералов возрастает в отдельных пробах до 20 %, хотя распределены они крайне неравномерно, и богатые сульфидами участки могут встретиться в любой зоне метасоматической колонки. Текстура сульфидного оруденения прожилково-вкрапленная, гнездовая, минеральный состав очень простой.

Основным рудным минералом является пирротин, образующий ксеноморфные зерна размером до нескольких миллиметров с вростками халькопирита и пламеневидного пентландита. В некоторых зернах пирротина отмечена структура распада с троилитом (рис. 7). Арсенопирит образует гипидиоморфные до идиоморфных зерна ромбического сечения размером до 1 мм, как правило, зонального строения (рис. 7): внутренние зоны зерен арсенопирита обогащены кобальтом и никелем, и характеризуются высоким отношением As/S (табл. 5), во внешних зонах содержание примесей Ni, Co и величина As/S отношения снижаются. Пирит встречается относительно редко, для него характерны агрегаты мелких кубических кристаллов, с другими сульфидами пирит не ассоциирует. Кроме указанных сульфидных минералов были отмечены леллингит и минерал группы валлериита (группа гидросульфидов), предположительно точилит. В статье (Вороняева и др., 2021) упоминаются также присутствующие в единичных знаках в протоличных пробах герсдорфит, молибденит, галенит, самородный висмут, теллуrowисмутит, золото и ауристобит.

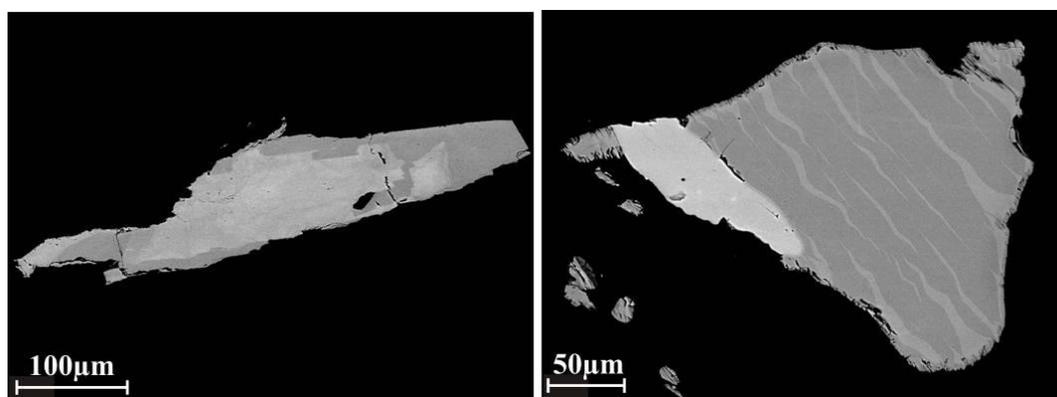


Рис. 7. Слева – зональное зерно арсенопирита, справа – вростки троилита в пирротине, светлое – арсенопирит. Фотографии сделаны в обратно-рассеянных электронах
Fig. 7. The left photo – zonal arsenopyrite grain, the right photo – troilite ingrowths in pyrrhotite, light color – arsenopyrite. Photographs are made in back-scattered electrons

Таблица 5. Химический состав арсенопирита рудопроявления Мальъявр, мас.%
Table 5. Chemical composition of arsenopyrite from the Mal'javr ore occurrence, wt.%

Номер пробы	ТУ-25 1С	ТУ-25 1R	ТУ-25 2С	ТУ-25 2R	ТУ-31 1С	ТУ-31 1R	ТУ-41 1С	ТУ-41 1R	ТУ-45 1С	ТУ-45 1R
Fe	26,46	31,40	27,92	30,56	27,73	31,49	33,15	34,61	31,89	33,65
Co	3,76	2,32	3,12	2,44	4,11	2,23	0,47	0,13	1,28	0,48
Ni	2,89	0,64	2,25	0,81	1,62	0,38	0,24	0,00	0,29	0,02
As	51,83	47,69	50,57	47,45	50,93	46,80	47,86	45,47	48,52	46,38
S	14,94	18,32	16,08	18,94	15,49	18,36	18,16	20,03	17,93	19,28
Сумма	99,88	100,37	99,93	100,20	99,88	99,26	99,88	100,25	99,91	99,81

Коэффициенты кристаллохимической формулы										
Fe	0,819	0,931	0,850	0,894	0,854	0,942	0,985	1,006	0,946	0,987
Co	0,110	0,065	0,090	0,068	0,120	0,063	0,013	0,004	0,036	0,013
Ni	0,085	0,018	0,065	0,023	0,048	0,011	0,007	0,000	0,008	0,001
As	1,195	1,054	1,148	1,035	1,169	1,043	1,060	0,986	1,073	1,014
S	0,805	0,946	0,852	0,965	0,831	0,957	0,940	1,014	0,927	0,986
at % As	39,7	35,0	38,2	34,7	38,7	34,6	35,3	32,7	35,9	33,8

Примечание. Индексами С и R в номере образца обозначены центр и край одного и того же проанализированного зерна.

Среди оксидов преобладает, как правило, ильменит, но в некоторых образцах метасоматитов из геденбергит-роговообманковой зоны отмечается обильная тонкая вкрапленность магнетита до 25 об. % породы.

Содержание золота в биотитовых гнейсах близко к кларковым значениям для этого элемента и возрастает в метасоматитах (табл. 1). Согласно (Вороняева и др., 2021) по результатам бороздowego опробования в одной из линз метасоматитов выявлено содержание золота 1,78 г/т на мощность 0,8 м, а в штучных пробах золото достигает 30 г/т. Золото – среднепробное до высокопробного: от Au 71,54, Ag 28,46 до Au 92,94, Ag 7,06 (Вороняева и др., 2021), из элементов примесей данными авторами упоминается только серебро.

Результаты и обсуждение

Размещение рудоносных метасоматитов на рудопроявлении Мальявр контролируется участками растяжения в сдвиговой зоне северо-северо-восточного простирания. Об условиях растяжения свидетельствуют, во-первых, отсутствие ориентировки чешуек биотита и кристаллов амфиболов в метасоматических породах среди рассланцованных метаосадочных пород, во-вторых, развитие поздних кварцевых прожилков, выполняющих согласные простиранию пород трещины.

В метасоматических телах сформировалась метасоматическая зональность: тыловая зона колонки представлена кварц-гранатовой породой, вплоть до гранатита, для промежуточной зоны характерна ассоциация граната, биотита и кварца, во фронтальной зоне колонки основными породообразующими минералами являются роговая обманка, геденбергит, присутствуют также эпидот, гранат. Химизм процесса можно охарактеризовать как железистый метасоматоз: содержание железа закономерно возрастает от внешних к внутренним зонам тел метасоматитов. При этом выносятся алюминий, кремний, титан и щелочные металлы, а наиболее инертное поведение характерно для магния (рис. 6). В ходе метасоматических процессов происходит разложение плагиоклаза и перекристаллизация биотита и кварца исходных пород. Высвободившийся при разложении плагиоклаза натрия выносятся и нигде не фиксируется, кальций перераспределяется во внешние геденбергит-амфиболовые зоны тел метасоматитов. Во внутренней и промежуточной зонах за счет глинозема плагиоклаза и привнесенного железа развивается гранат.

Рассматриваемые метасоматиты можно сравнить с метасоматическими образованиями Северо-Карельской зоны, также развивающимися по биотитовым плагиогнейсам, метаморфизованным в условиях амфиболитовой фации. В гнейсах Северо-Карельской зоны, как и в нашем случае, отмечаются кварц-гранатовые и биотит-гранатовые ассоциации во внутренних зонах метасоматической колонки. В целом, можно говорить о том, что развитие кварц-гранатовой ассоциации в центральных зонах метасоматических колонок является характерным для метасоматитов в глубоко метаморфизованных комплексах. Фронтальные зоны метасоматитов в Северо-Карельской зоне представлены минеральными ассоциациями с участием глиноземистых минералов (кианит, ставролит и др.), что объясняется инертным поведением глинозема при метасоматозе, тогда как на рудопроявлении Мальявр во внешних зонах метасоматических колонок развиваются кальцийсодержащие амфиболы и пироксены. Метасоматоз в Северо-Карельской зоне связан с метаморфизмом среднетемпературной амфиболитовой фации повышенных давлений, происходил в условиях его пика (600–650 °С, 7–8 кбар), а размещение метасоматитов контролируется участками растяжения в сдвиговых зонах, метасоматоз происходит одновременно с деформацией (Азимов, 2012), что также сближает метасоматиты Северо-Карельской зоны с рассматриваемыми нами образованиями.

О высокой температуре развития метасоматических образований на рудопроявлении Мальявр говорит состав сосуществующих биотита и граната из образцов ТУ-25 и ТУ-31 (табл. 3 и 4), указывающий на температуру образования этой ассоциации 600–650 °С (гранат-биотитовый геотермометр – *Термо-и барометрия...*, 1977; Гульбин, 2010).

Подтверждается высокая температура минералообразования в метасоматитах и с помощью арсенопиритового геотермометра (Kretschmar et al., 1976). Использование состава арсенопирита для термометрии возможно только для зерен с содержанием примесей Ni и Co менее 0,5 мас. % (Kretschmar et al., 1976; Тюкова и др., 2007), поэтому оценка температуры проведена для арсенопирита из образцов ТУ-41 и ТУ-45 (рис. 8). Состав арсенопирита и его ассоциация с пирротинном говорят о температуре формирования

внутренних зон зерен арсенипирита в метасоматитах геденбергит-амфиболовой зоны от 500 до 600 °С, а внешних – 400–510 °С.

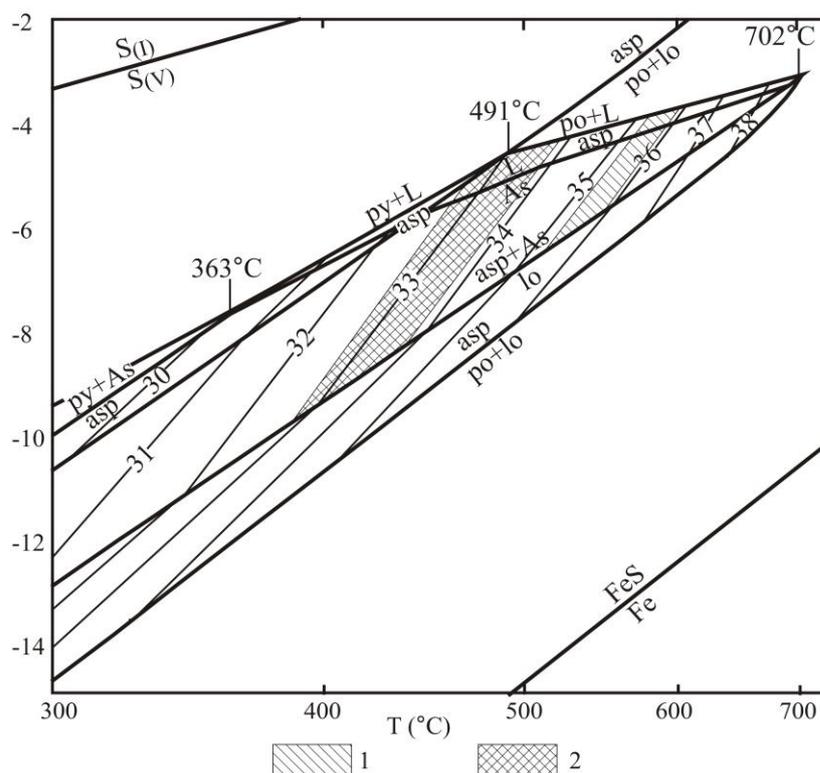


Рис. 8. Поля устойчивости арсенипиритов разных составов (As в ат.%) на диаграмме фугитивность серы – температура для системы Fe-As-S (no Kretschmar et al., 1976): 1 – поле арсенипиритов из внутренней части зерен; 2 – поле арсенипиритов из внешней части зерен.

Asp – арсенипирит; Lo – леллингит; Po – пирротин; Py – пирит

Fig. 8. Stability fields of arsenopyrites of different compositions (As in at.%) on the sulfur fugacity – temperature diagram for the Fe-As-S system (according to Kretschmar et al., 1976): 1 – arsenopyrite field from the inner part of the grains; 2 – arsenopyrite field from the outer part of the grains. Asp – arsenopyrite; Lo – lellingite; Po – pyrrhotite; Py – pyrite

Заключение

Рудопроявление Мальевр – первое в Кольском регионе проявление золота, связанное с конгломератами. Вполне вероятно, что формированию минерализации золота способствовала обогащенность вмещающих метасоматические образования парагнейсов-метаконгломератов и метапесчаников мышьяком – наиболее надежным геохимическим спутником и одновременно индикатором золотой минерализации. Мобилизация мышьяка из вмещающих толщ и перераспределение его в зону развития метасоматитов вполне могли способствовать концентрации золота в метасоматических новообразованиях. Следует отметить, что и другие малые элементы, которыми обогащены метасоматиты (за исключением иттрия), известны как элементы-спутники золота. Повышенное содержание иттрия в рассматриваемых породах, по всей видимости, обусловлено высоким содержанием граната, концентрирующего иттрий.

Пока не определена роль пегматитов в формировании рудопроявления. Нельзя исключать, что именно внедрение пегматитовых жил способствовало мобилизации компонентов из вмещающих толщ (в частности, выносу железа, мышьяка и серы из зоны мигматизации гнейсов), их миграции в зоны разуплотнения и дальнейшему формированию золотосодержащих метасоматических пород.

Благодарности

Авторы благодарят студента МГТУ Александра Ермолина за помощь в проведении полевых работ на объекте и канд. геол.-минерал. наук Е. А. Селиванову, заведующую лабораторией ГИ КНЦ РАН, за выполнение рентгеновских исследований минералов.

Исследования проведены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-27-00589.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Азимов П. Я. Соотношение метасоматических образований и структурных элементов в зонах сдвиговых деформаций при метаморфизме: зона сочленения Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона (Фенноскандинавский щит) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докладов Всерос. конф., г. Москва, 8–12 октября 2012 г. В 2 т. / Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. Москва, 2012. Т. 1. С. 341–342.
- Богданова В. С., Дагелайский В. Б. Возрастное положение пород тундровой серии и конгломератов района р. Уры (Кольский полуостров) / Абсолютный возраст докембрийских пород СССР : сб. ст. / отв. ред. С. В. Обручев. М. ; Л. : Наука, 1965. С. 74–83.
- Вороняева Л. В., Крупеник З. В. Новое проявление золота Титовско-Урагубской зеленокаменной структуры позднего архея (Кольский регион) // Региональная геология и металлогения. 2021. № 86. С. 82–91. DOI: https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_82-91. EDN: KOGXFY.
- Гульбин Ю. Л. Оптимизация гранат-биотитового термометра. I. Температурные тренды // Записки Российского минералогического общества. 2010. Т. 139, № 5. С. 1–17. EDN: MXTDOS.
- Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Богомолов Е. С., Гусева В. Ф. Новые данные о составе и возрасте протолита глиноземистых гнейсов кольской и тундровой серий Центрально-Кольского блока Балтийского щита // Геология и геодинамика архея: материалы I Российской конф. по проблемам геологии и геодинамики докембрия, 27–29 сентября 2005 г. Санкт-Петербург, 2005. С. 272–275.
- Термо- и барометрия метаморфических пород / отв. ред. В. А. Глебовицкий. Л. : Наука, 1977. 207 с.
- Тюкова Е. Э., Ворошин С. В. Состав и парагенезисы арсенопирита в месторождениях и вмещающих породах Верхне-Колымского региона (к интерпретации генезиса сульфидных ассоциаций). Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2007. 108 с.
- Chakravarti R., Singh S., Venkatesh A. S. Gold mineralisation within quartz pebble conglomerates of Gorumahisani Badampahar Schist belt, Singhbhum Craton, Eastern India // Journal of Geosciences Research. 2017. Special Vol. 1. P. 27–34.
- Kretschmar U., Scott S. D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application // The Canadian Mineralogist. 1976. Vol. 14, Iss. 3. P. 364–386.
- Long D. G. F., Ulrich T., Kamber B. S. Laterally extensive modified placer gold deposits in the Paleoproterozoic Mississagi Formation, Clement and Pardo Townships, Ontario // Canadian Journal of Earth Sciences. 2011. Vol. 48, Iss. 5. P. 779–792. DOI: <https://doi.org/10.1139/e10-101>.
- Milesi J. P., Ledru P., Marcoux E., Mougeot R. [et al.]. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: A "hydrothermal shear – reservoir" model // Ore Geology Reviews. 2002. Vol. 19, Iss. 1–2. P. 95–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00038-5).
- Munroe S., Cunningham M. The Pilbara's conglomerate gold // Australian Resources and Investment. 2018. Vol. 12, N 2. P. 74–76.
- Smith A. J. B., Henry G., Frost-Killian S. A review of the Birimian Supergroup- and Tarkwaian Group-hosted gold deposits of Ghana // Episodes. 2016. Vol. 39, Iss. 2. P. 177–197. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95775>.
- Tucker R. F., Viljoen R. P., Viljoen M. J. A review of the Witwatersrand basin – the world's greatest goldfield // Episodes. 2016. Vol. 39, Iss. 2. P. 105–133. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95771>.
- Ulrich T., Long D. G. F., Kamber B. S., Whitehouse M. J. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada // Economic Geology. 2011. Vol. 106, Iss. 4. P. 667–686. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.4.667>.

References

- Azimov, P. Ya. 2012. Interrelations of alteration and structural elements in shear zones of deformation during metamorphism: The zone of junction of the Belomorian mobile belt and the Karelian craton (the Fennoscandian Shield). In the 3rd Tectonophysics Conference *Tectonophysics and Actual Problems of the Earth Sciences*, 8–12 October, 2012. In 2 vol. Moscow, Vol. 1, pp. 341–342. (In Russ.)
- Bogdanova, V. S., Dagelayskiy, V. B. 1965. Age position of the rocks of the Tundrovaya series and conglomerates in the area of the Ura River (the Kola Peninsula). In coll. articles *Absolute age of the Precambrian rocks in the USSR*. Ed. S. V. Obruchev. Moscow; Leningrad, pp. 74–83. (In Russ.)
- Voronyayeva, L. V., Krupenik, Z. V. 2021. A new gold prospect in the Titovsko-Uragubskaya greenstone Late Archean structure (the Kola region). *Regional Geology and Metallogeny*, 86, pp. 82–91. DOI: https://doi.org/10.52349/08697892_2021_86_82-91. EDN: KOGXFY. (In Russ.)
- Gul'bin, Yu. L. 2010. Optimization of the garnet-biotite geothermometer. 1. Temperature trends. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva*, 139(5), pp. 1–17. EDN: MXTDOS. (In Russ.)

- Myskova, T. A., Mil'kevich, R. I., Bogomolov, Ye. S., Guseva, V. F. 2005. New data on composition and age of the protolith of the high-alumina gneisses of the Kolskaya and Tundrovaya series of the Central Kola block of the Baltic Shield. In *Geology and Geodynamics of the Archean: Proceedings of the I Russian Conference on the Problems in Geology and Geodynamics of the Precambrian*, 27–29 September, 2005. Saint-Petersburg, pp. 272–275. (In Russ.)
- Thermo- and barometry of metamorphic rocks. 1977. Ed. Glebovitsky V. A. Leningrad. (In Russ.)
- Tyukova, Ye. E., Voroshin, S. V. 2007. Arsenopyrite mineral composition and parageneses in ore deposits and host rocks throughout the Upper Kolyma River area (interpreting the genesis of sulfide mineral assemblages). Magadan. (In Russ.)
- Chakravarti, R., Singh, S., Venkatesh, A. S. 2017. Gold mineralisation within quartz pebble conglomerates of Gorumahisani Badampahar Schist belt, Singhbhum Craton, Eastern India. *Journal of Geosciences Research*, Special Vol., 1, pp. 27–34.
- Kretschmar, U., Scott, S. D. 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application. *The Canadian Mineralogist*, 14(3), pp. 364–386.
- Long, D. G. F., Ulrich, T., Kamber, B. S. 2011. Laterally extensive modified placer gold deposits in the Paleoproterozoic Mississagi Formation, Clement and Pardo Townships, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(5), pp. 779–792. DOI: <https://doi.org/10.1139/e10-101>.
- Milesi, J. P., Ledru, P., Marcoux, E., Mougéot, R. et al. 2002. The Jacobina Paleoproterozoic gold-bearing conglomerates, Bahia, Brazil: A "hydrothermal shear – reservoir" model. *Ore Geology Reviews*, 19(1–2), pp. 95–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(01)00038-5).
- Munroe, S., Cunningham, M. 2018. The Pilbara's conglomerate gold. *Australian Resources and Investment*, 12(2), pp. 74–76.
- Smith, A. J. B., Henry, G., Frost-Killian, S. 2016. A review of the Birimian Supergroup- and Tarkwaian Group-hosted gold deposits of Ghana. *Episodes*, 39(2), pp. 177–197. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95775>.
- Tucker, R. F., Viljoen, R. P., Viljoen, M. J. 2016. A review of the Witwatersrand basin – the world's greatest goldfield. *Episodes*, 39(2), pp. 105–133. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2016/v39i2/95771>.
- Ulrich, T., Long, D. G. F., Kamber, B. S., Whitehouse, M. J. 2011. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada. *Economic Geology*, 106(4), pp. 667–686. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.4.667>.

Сведения об авторах

Аркадий Авенирович Калинин – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Arkadiy A. Kalinin – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Leading Researcher; e-mail: kalinin@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-0333>

Николай Михайлович Кудряшов – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: nik@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-1995>

Nikolay M. Kudryashov – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geol. & Miner.), Leading Researcher; e-mail: nik@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0918-1995>

Евгений Элланович Савченко – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

Yevgeny E. Savchenko – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk Region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Researcher; e-mail: evsav@geoksc.apatity.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5639-1907>

УДК 551+552.4 (234.74)

Развитие Кейвского домена в докембрии

Н. Е. Козлов*, Н. О. Сорохтин, Т. С. Марчук

*Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
20.01.2023;

принята
к публикации
08.02.2023

Ключевые слова:

докембрий,
Арктическая зона,
Фенноскандинавский
щит,
реконструкция
протоприроды,
супракrustальные
породы,
эволюция состава,
геодинамическая
эволюция Кейвской
структуры

Детальные геолого-петрогеохимические исследования, проведенные с использованием разработанных авторами методик, позволили дополнить картину образования супракrustальных комплексов Кейвской структуры. Исследования показали, что метаосадочные комплексы червуртской и выхчуртской свит формировались преимущественно за счет вещества подстилающих их толщ. В формировании выхчуртской свиты, начиная с ее верхов, принимает активное участие вещество окружающих Кейвы доменов. Авторы пришли к заключению о формировании как минимум средней части кейвского разреза в результате перемыва и переотложения вещества самой структуры, что подтверждает выводы о наличии в пределах Кейв переотложенных кор выветривания. Полученные результаты свидетельствуют о верности сделанного ранее вывода о формировании Кейвской структуры в условиях, наиболее сходных со срединными массивами, и в определенной мере объясняют формирование в пределах Кейв гигантского по объему месторождения алюминиевого сырья.

Для цитирования

Козлов Н. Е. и др. Развитие Кейвского домена в докембрии. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-18-24>.

Evolution of the Keivy domain in the Precambrian

Nikolay E. Kozlov*, Nikolay O. Sorokhtin, Tatyana S. Marchuk

*Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Article info

Received
20.01.2023;

accepted
08.02.2023

Key words:

Precambrian,
Arctic zone,
Fennoscandian Shield,
protonature
reconstruction,
supracrustal rocks,
compositional evolution,
geodynamic evolution
of Keivy structure

Abstract

Detailed geological and petrogeochemical studies carried out using the techniques developed by the authors have made it possible to complete the picture of the formation of supracrustal complexes of the Keivy structure. The studies have shown that the metasedimentary complexes of the Chervurt and Vykchurt suites were formed mainly due to the material of the underlying strata. In the development of the Vykchurt Formation, starting from its upper part, the material of the domains surrounding the Keivy takes an active part. The authors have come to the conclusion that at least the middle part of the Keivy section was formed as a result of washing and redeposition of the material of the structure itself, it confirms the conclusions about the presence of redeposited weathering crusts within the Keivy. The results obtained testify to the correctness of the earlier conclusion about the formation of the Keivy structure under conditions most similar to the middle massifs, and to a certain extent explain the formation of a giant deposit of aluminum raw materials within the Keivy.

For citation

Kozlov, N. E. et al. 2023. Evolution of the Keivy domain in the Precambrian. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 18–24. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-18-24>.

Введение

Настоящая работа продолжает цикл наших публикаций по истории образования и эволюции супракрустальных комплексов Кейвского домена. Кейвский домен располагается в центральной части Кольского полуострова, на западе граничит с Кольско-Норвежским, на севере – с супракрустальными комплексами Мурманского домена. На юге-юго-западе его обрамляет Имандра-Варзугская структура, основанием которой служат метаморфиты Терского домена и Беломорского подвижного пояса (рис.). По нашим представлениям, Кейвский микроконтинент представляет собой срединный массив, сформированный в период максимального проявления неоархейских коллизионных процессов, которые привели к его перекрытию сопредельными микроконтинентами (Kozlov et al., 2020; Sorokhtin et al., 2020). При этом, находясь в створе оси максимального проявления коллизии, он не испытал столь значимых метаморфических преобразований, как соседние с ним домены. В ходе формирования Кейвского микроконтинента на его поверхность сносился терригенный материал соседних структур, в итоге был сформирован осадочный чехол.

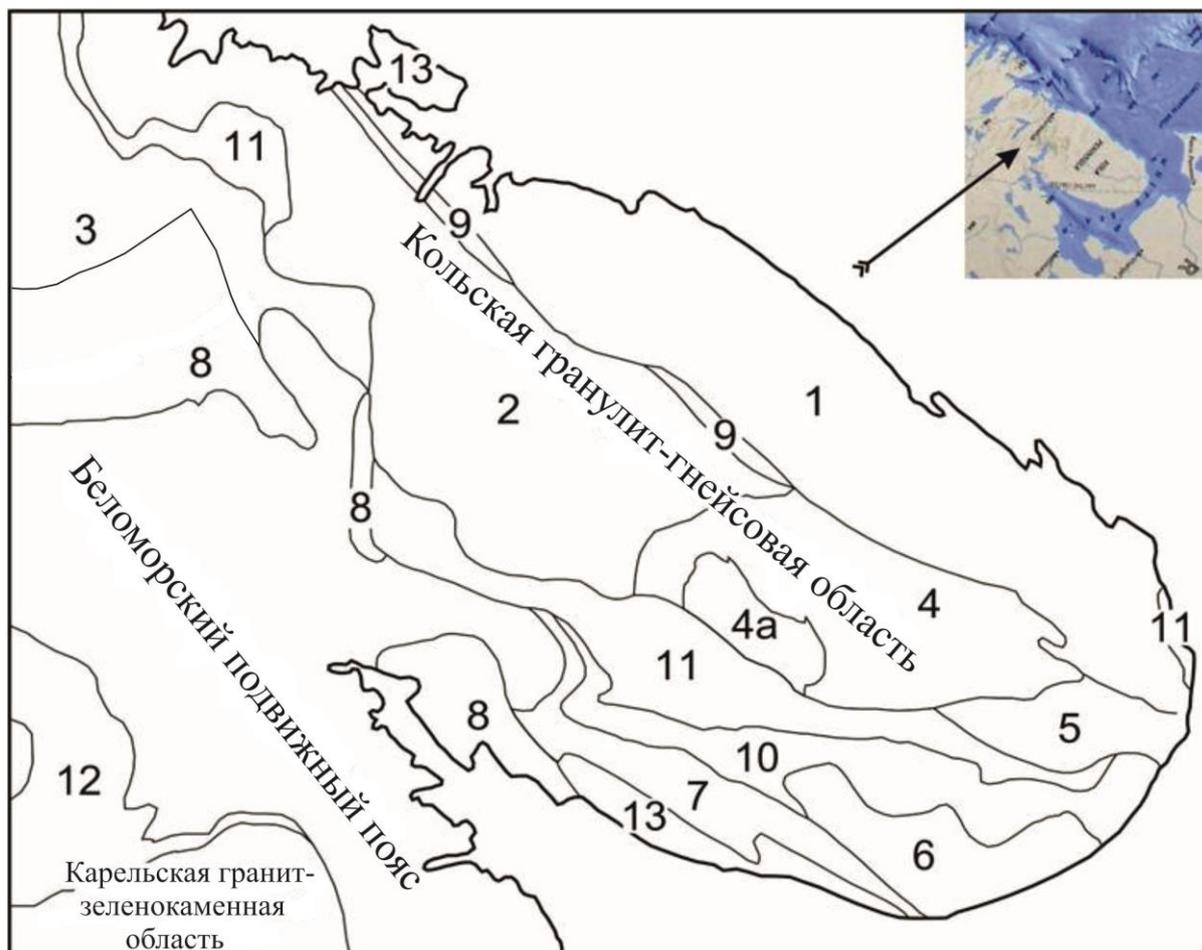


Рис. Схема районирования раннедокембрийских геоструктурных элементов земной коры северо-восточной части Балтийского щита (по Sorokhtin et al., 2020; Kozlov et al., 2018; Kozlov et al., 2020; Kozlov et al., 2021). Домены коры: 1 – Мурманский, 2 – Кольско-Норвежский, 3 – Лоттинский, 4 – Кейвский, 4а – Верхнепонойский, 5 – Восточно-Кольский, 6 – Чапомский, 7 – Терский. Зеленокаменные и гранулитовые пояса: 8–10 – архейские: 8 – Лапландско-Колвицкий; 9 – Титовско-Колмозерский (Колмозеро-Воронья); 10 – Сергозерско-Стрельнинский; 11, 12 – неопротерозойские: 11 – Печенга-Имандра-Варзуга-Устьпонойский; 12 – Северо-Карельский; 13 – рифтогенные и окраинно-континентальные отложения рифейского возраста

Fig. Scheme of regional zoning of Early Precambrian geosubstructural elements of the Earth's crust in the north-eastern Baltic Shield (after Sorokhtin et al., 2020; Kozlov et al., 2018; Kozlov et al., 2020; Kozlov et al., 2021).

Crustal domains: 1 – Murmansk, 2 – Kola-Norwegian, 3 – Lotta, 4 – Keivy, 4a – Upper Ponooy (Verkhneponoysky), 5 – East-Kola, 6 – Chapoma, 7 – Tersky. Greenstone and granulite belts: 8–10 – Archaean: 8 – Lapland-Kolvitsa; 9 – Titovka-Kolmozero (Kolmozero-Voronya); 10 – Sergozero-Strelna; 11, 12 – Neoproterozoic: 11 – Pechenga-Imandra-Varzuga-Ust'-Ponooy; 12 – North-Kalerian; 13 – Rhiphaean rift and marginal-continental sediments

Заметим, что интенсивность ребольского тектогенеза в пределах Карельского и Мурманского доменов была заметно слабее, чем в других регионах. Столкновение литосферных плит, представленных сегодня Карельской и Мурманской гранит-зеленокаменными областями, привело к возникновению Кольской гранулитогнейсовой области, являющейся осевой частью неоархейского коллизииона (Sorokhtin et al., 2020). Наблюдается пространственное омоложение коллизионных событий в юго-западном направлении. При этом можно предполагать, что максимально близкие к оси складчатости структуры подвергались наиболее интенсивному воздействию тектонических процессов. Это относится, в первую очередь, к комплексам Мурманского домена, которые подвергались процессам денудации в большей степени, чем иные, контактирующие с Кейвами области континентальной палеокоры. Поэтому метаосадочные комплексы Кейвского срединного массива в значительной мере формировались за счет терригенного материала, который был снесен с его территории. В то же время активность денудации была импульсной и в период формирования червуртской и выхчуртской свит интенсивность сноса терригенного материала как с Мурманского домена, так и с других сопредельных с ним доменов была существенно сниженной (Козлов и др., 2021).

Именно этот факт заставил нас продолжить исследование особенностей осадконакопления в пределах Кейвской структуры. Цель исследований – выяснить, что могло быть главным источником вещества для метаосадочных комплексов Кейвского домена на тех этапах, когда их подпитка терригенным материалом с окружающих эту структуру доменов была минимальной.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи нами было проведено сравнение состава пород различных свит Кейвской структуры не только с веществом окружающих ее доменов, но также и образованиями подстилающих их комплексов. Отметим, что ввиду неопределенности, с одной стороны, корреляции снежноборской свиты Малых Кейв с образованиями разреза Больших Кейв (Предовский и др., 1987), с другой – принимая во внимание мнение большинства исследователей, что она наиболее близка по составу к образованиям песчовотундровской свиты¹, при решении данной задачи были рассмотрены два варианта – с учетом сведений о ее составе и без них.

Необходимо напомнить, что формирование значительной части кейвского разреза, а именно, червуртской и выхчуртской свит, происходило в условиях максимального проявления процессов выветривания, сопровождавшегося образованием мощных толщ глин (Козлов и др., 2015) (табл. 1). Эту информацию дополняют полученные ранее данные о том, что в состав этих породных комплексов входят коры выветривания (Мирская, 1982; Предовский и др., 1987), т. е. они формировались, главным образом, за счет собственного материала Кейв. Сопоставление каждой из свит и подсвит Кейвской структуры со всеми нижележащими комплексами позволяет получить количественную оценку их близости. Методика сопоставления материалов, разработанная Е. В. Мартыновым, детально описана ранее (Козлов и др., 2021).

Таблица 1. Изменение некоторых петрогеохимических параметров в супракрустальных образованиях Кейвского домена (по Козлов и др., 2015)

Параметры	Номера групп пород*		
	1	2	3
Количество проб метаосадочных пород в группах	39**	183	77
	85	202	101
Количество метapelитов в группе метаосадочных пород, %	12,8	88,5***	48,1
	5,9	80,2	36,6
Интенсивность выветривания W_1 (Предовский, 1980)	27,1	198,5	88,5
	12,9	182,3	75,2
Химический индекс изменения CIA (Nesbitt et al., 1982)	59,7	84,1	71,6
	55,9	81,9	69,3
Индекс изменения плагиоклаза PIA (Fedo et al., 1995)	63,4	88,5	80,1
	58,7	86,6	78,2

Примечание. * – номера групп архейских образований: 1 – лебяжинская и патчервотундровская свиты, 2 – червуртская и выхчуртская свиты, 3 – песчовотундровская свита; ** – в числителе – количество проб и значения соответствующих показателей при их расчете лишь для тех пород, осадочная протоприрода которых распознается однозначно, в знаменателе – эти же данные для групп, где все неоднозначно определенные (нераспознанные) породы отнесены к группе метаосадочных. Поскольку поле метapelитов не перекрывается с полем метамагматитов, для них значение неизменно при любом варианте реконструкции

¹ Объяснительная записка к Геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1 : 500000. Радченко А. Т., Балаганский В. В., Басалаев А. А., Беляев О. А. [и др.]. Апатиты, 1994, 95 с.

первичной природы пород в выборке; *** – жирным шрифтом выделены максимальные значения параметров, характеризующих максимальную степень выветривания.

Table 1. Alterations of some petrogeochemical parameters in supracrustal formations of the Keivy domain (after Kozlov et al., 2015)

Parameters	Rock group numbers*		
	1	2	3
Number of samples of metasedimentary rocks in groups	<u>39**</u> 85	<u>183</u> 202	<u>77</u> 101
Number of metapelites in metasedimentary rocks group, %	<u>12.8</u> 5.9	88.5*** 80.2	<u>48.1</u> 36.6
Weathering intensity W_1 (Predovsky, 1980)	<u>27.1</u> 12.9	198.5 182.3	<u>88.5</u> 75.2
Chemical index of alteration CIA (Nesbitt et al., 1982)	<u>59.7</u> 55.9	84.1 81.9	<u>71.6</u> 69.3
Plagioclase index of alteration PIA (Fedo et al., 1995)	<u>63.4</u> 58.7	88.5 86.6	<u>80.1</u> 78.2

Note. * – group numbers for Archaean formations: 1 – Lebyazhinskaya and Patcherva Tundra formations, 2 – Chervurt and Vychchurt formations, 3 – Pestsovaya Tundra formation; ** – numerator – number of samples and corresponding values calculated only for the rocks, which sedimentary protonature is clearly determined, nomenator – the same data for the groups, where all ambiguously determined (unidentified) rocks are referred to the metasedimentary group. Since the field of metapelites does not overlap with the field of pegmatites, their value is conservative with any reconstruction pattern of the primary nature of rocks in the sample set; *** – maximal values of parameters indicating the maximal degree of their weathering are in bold.

Напомним, что данная методика позволяет вычислять коэффициенты близости сравниваемых объектов, при этом минимальная их величина означает, что вещество комплексов, для которых они вычислены, имеет максимальное сходство. Таким образом, проведя сравнение состава различных свит и подсвит Кейв с более древними образованиями, которые могли служить для них источником терригенного материала, можно с достаточно высокой долей вероятности ответить на вопрос, откуда могло поступать обломочное вещество, необходимое для формирования тех или иных толщ. Для решения данной задачи использовалась аналитическая база, включающая в себя 384 полных силикатных анализов пород Кейвской структуры, из которых 302 надежно распознаются как характеризующие метаосадочные образования.

Результаты и обсуждение

Проведенное сопоставление показало, что для пород червуртской и выхуртской свит можно со всей определенностью сделать вывод об их формировании за счет вещества подстилающих их толщ (табл. 2). Так, комплексы низов червуртской свиты (нижнечервуртская подсвита) по составу максимально близки к породам верхов лебяжинской свиты, в то время как метаосадочные породы верхней части разреза червуртской свиты (верхнечервуртская подсвита) имеют максимальное сходство с породами низов этой же свиты. В меньшей степени, но в целом аналогичные закономерности фиксируются и для метаосадочных комплексов выхуртской свиты, где нижневыхуртская подсвита наиболее сходна с червуртскими образованиями, в то время как верхневыхуртская подсвита по составу максимально близка к ее низам.

Таблица 2. Сравнение вещества различных свит Кейвской структуры с веществом потенциальных источников их терригенного материала

Свиты, комплексы*	ЛБЖН	ЛБЖВ	ЧРВН	ЧРВВ	ВХЧН	ВХЧВ	МБ	КН	ТЕР	БЛМР
ЧРВН	10,46	9,54**	–	10,11	–	–	13,20	16,79	18,19	24,46
ЧРВВ	20,67	22,59	7,64	–	–	–	19,55	18,47	18,84	20,79
ВХЧН	25,28	21,79	17,54	21,86	–	–	28,73	35,85	37,44	42,58
ВХЧВ	16,02	16,62	18,01	8,92	8,21	–	16,45	15,46	15,04	17,93
ПСЦ+СНБО	28,03	21,17	19,01	18,63	15,98	15,56	10,59	17,78	18,34	18,37
ПСЦ	20,24	19,61	17,20	16,93	15,27	14,89	10,21	18,13	20,88	16,41

Примечание. * – сокращения для свит и комплексов: ЛБЖН, ЛБЖВ – лебяжинская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ЧРВН, ЧРВВ – червуртская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ВХЧН, ВХЧВ – выхуртская свита, нижняя и верхняя подсвиты соответственно; ПСЦ –

песчовотундровская свита; СНБО – снежноборская свита; МБ – Мурманский домен; КН – Кольско-Норвежский домен; ТЕР – Терский домен; БЛМР – Беломорский подвижный пояс; ** – жирным шрифтом выделены минимальные значения коэффициентов близости тех или иных объектов.

Table 2. Comparison of the matter of different formations in the Keivy structure with the matter of potential sources for their terrigenous material

Formations, complexes *	LBZL	LBZU	CRVL	CRVU	VKCL	VKCU	MB	KN	TER	BLMR
CRVL	10.46	9.54**	–	10.11	–	–	13.20	16.79	18.19	24.46
CRVU	20.67	22.59	7.64	–	–	–	19.55	18.47	18.84	20.79
VKCL	25.28	21.79	17.54	21.86	–	–	28.73	35.85	37.44	42.58
VKCU	16.02	16.62	18.01	8.92	8.21	–	16.45	15.46	15.04	17.93
PST+SNBO	28.03	21.17	19.01	18.63	15.98	15.56	10.59	17.78	18.34	18.37
PST	20.24	19.61	17.20	16.93	15.27	14.89	10.21	18.13	20.88	16.41

Note. * – abbreviations for formations and complexes: LBZL, LBZU – Lebyazhinskaya formation, lower and upper subformation, respectively; CRVL, CRVU – Chervurt formation, lower and upper subformation, respectively; VKCL, VKCU – Vykchurt formation, lower and upper subformation, respectively; PST – Pestsovaya Tundra formation; SNBO – Snezhnoborskaya formation; MD – Murmansk domain, KN – Kola-Norwegian domain, TER – Tersky domain, BLMR – Belomorian Mobile Belt; ** – minimal values of proximity coefficients for certain objects are in bold.

При этом, начиная с комплексов верхнечервуртской подсвиты, в формировании осадочного разреза Кейв начинает принимать в меньшей, но при этом достаточно заметной степени, обломочный материал как самой Кейвской структуры, там и вещество окружающих Кейвы доменов. В еще большей степени эта тенденция проявлена для песчовотундровской свиты, и отдельно, и совместно со снежноборской свитой, метаосадочные породы которых наиболее сходны с веществом Мурманского домена (табл. 2), как было описано ранее (Козлов и др., 2021). Таким образом, можно достаточно уверенно говорить о формировании средней части кейвского разреза в значительной степени в результате перемыва и переотложения вещества самой структуры, что является подтверждением ранее высказанного вывода о наличии в пределах Кейв переотложенных кор выветривания.

Полученные результаты подтверждают высказанное нами ранее предположение о формировании Кейвской структуры в условиях, наиболее сходных со срединными массивами (Sorokhtin et al., 2020). Это предполагает замкнутость процессов разрушения близлежащих орогенов, сноса с них материала на поверхность Кейвской структуры, их чередование с процессами стабилизации и развитием, а затем разрушением и переотложением кор выветривания физико-химическими минеральными преобразованиями пород, как результат – накопление довольно мощного осадочного чехла. Благодаря именно такому развитию, по нашему мнению, в Кейвском срединном массиве были сформированы гигантские по объемам месторождения алюминиевого сырья.

Заключение

Геолого-петрогеохимические исследования, проведенные с использованием разработанных авторами методик, позволяют дополнить картину образования супракрустальных комплексов Кейвской структуры. Установлено, что метаосадочные комплексы червуртской и выхчуртской свиты формировались преимущественно за счет вещества подстилающих их толщ кейвского разреза. При этом, начиная с верхов выхчуртской толщи, в ее формировании принимает в меньшей, но все же заметной степени вещество окружающих Кейвы доменов. Для верхов разреза Кейвской структуры (песчовотундровская свита) преобладающую роль играет вещество Мурманского домена. Вместе с тем песчовотундровская свита из всех включенных в круг сопоставления объектов имеет минимальное сходство с породами лебяжинской свиты, что опровергает сделанный ранее вывод о ее формировании за счет размыва последней (Пожиленко и др., 2002). Заметим, что полученные данные не исключают возможной корреляции снежноборской и песчовотундровской толщ, хотя данный вопрос нуждается в дополнительном исследовании.

Таким образом, можно сделать вывод о формировании, как минимум, средней части кейвского разреза (червуртской и выхчуртской свит) в результате перемыва и переотложения вещества самой структуры, что подтверждает выводы о наличии в пределах Кейв переотложенных кор выветривания, а также вывод о формировании Кейвской структуры в условиях, наиболее сходных со срединными массивами, что, в свою очередь, в определенной мере объясняет формирование в пределах Кейв гигантского по объему месторождения алюминиевого сырья.

Реконструированная история образования метаосадочных разрезов Кейвской структуры с существованием во время формирования значительной части ее разрезов (червуртской и выхчуртской свит) в условиях стабилизации предполагает достаточную длительность геологической истории Кейв. Это, как и многие иные, перечисленные нами ранее факты (Козлов и др., 2021), находится в противоречии с опубликованными недавно (Balagansky et al., 2021) цифрами более молодого, чем предполагалось ранее, времени заложения и достаточно быстрого развития Кейвской структуры.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № FMWE-2021-0004, АААА-А19-119100290148-4 (FMEZ 2022-0025), АААА-А19-119100290147-7 (FMEZ 2022-0026).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Мартынов Е. В. Эволюция вещественного состава супракрустальных комплексов архея Кольского региона // Вестник Института геологии Коми научного центра УрО РАН. 2015. № 1. С. 7–11. EDN: TWPZJJ.
- Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Мартынов Е. В., Марчук Т. С. Особенности формирования супракомплексов Кейвского домена // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24, № 1. С. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-35-45>. EDN: OAJHRI.
- Мирская Д. Д. Предчервуртские терригенные породы и уровни выветривания // Вулканизм и седиментогенез докембрия Кольского полуострова / отв. ред. А. А. Предовский. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1982. С. 40–50.
- Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области / ред. Ф. П. Митрофанов, Н. И. Бичук. Апатиты : КНЦ РАН, 2002. 359 с.
- Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л. : Наука, 1980. 152 с.
- Предовский А. А., Мележик В. А., Болотов В. И., Федотов Ж. А. [и др.]. Вулканизм и седиментогенез докембрия северо-востока Балтийского щита / отв. ред. А. А. Предовский. Л. : Наука, 1987. 185 с.
- Balagansky V. V., Myskova T. A., Lvov P. A., Larionov A. N. [et al.]. Neoarchean A-type acid metavolcanics in the Keivy Terrane, northeastern Fennoscandian Shield: Geochemistry, age, and origin // *Lithos*. 2021. Vol. 380–381. Article number: 105899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105899>. EDN: DFLWNS.
- Fedo C. M., Nesbitt H. W., Young G. M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*. 1995. Vol. 23, Iss. 10. P. 921–924. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2).
- Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the Northwestern Russian Arctic // *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 12. Article number: 573. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8120573>. EDN: TEEQQK.
- Kozlov N. E., Sorokhtin N. O., Martynov E. V., Marchuk T. S. Geodynamics and metallogeny of the Keivy domain (Baltic Shield) // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 1. С. 38–45. DOI: [10.21443/1560-9278-2020-23-1-38-45](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-38-45). EDN: NQOJKX.
- Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. Vol. 299. P. 715–717. DOI: <https://doi.org/10.1038/299715a0>.
- Sorokhtin N. O., Kozlov N. E., Glaznev V. N., Martynov E. V. A study in Earth's geological evolution. The Baltic Shield. John Wiley & Sons, Inc., 2020. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119651208>.

References

- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Martynov, E. V. 2015. Evolution of the material composition of Archaean supracrustal complexes in the Murmansk region. *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 1, pp. 7–11. EDN: TWPZJJ. (In Russ.)
- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Martynov, E. V., Marchuk, T. S. 2021. Peculiar features of formation of supracomplexes in the Keivy domain. *Vestnik of MSTU*, 24(1), pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-35-45>. EDN: OAJHRI. (In Russ.)
- Mirskaya, D. D. 1982. Pre-Chervurt terrigenous rocks and weathering levels. In *Precambrian volcanism and sediment genesis on the Kola Peninsula*. Ed. A. A. Predovsky. Apatity. (In Russ.)
- Pozhilenko, V. I., Gavrilenko, B. V., Zhirov, D. V., Zhabin, S. V. 2002. Geology of mineral areas of the Murmansk region. Apatity. (In Russ.)

- Predovsky, A. A. 1980. Reconstruction of conditions of sediment genesis and volcanism in the Early Precambrian. (In Russ.)
- Predovsky, A. A., Melezhik, V. A., Bolotov, V. I., Fedotov, G. A. et al. 1987. Volcanism and sedimentation genesis in the Precambrian in the NE Baltic Shield. Leningrad. (In Russ.)
- Balagansky, V. V., Myskova, T. A., Lvov, P. A., Larionov, A. N. et al. 2021. Neoproterozoic A-type acid metavolcanics in the Keivy Terrane, northeastern Fennoscandian Shield: Geochemistry, age, and origin. *Lithos*, 380–381. Article number: 105899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105899>. EDN: DFLWNS.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10), pp. 921–924. DOI: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2).
- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Martynov, E. V. 2018. Geodynamic evolution and metallogeny of Archaean structural and compositional complexes in the Northwestern Russian Arctic. *Minerals*, 8(12). Article number: 573. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8120573>. EDN: TEEQQK.
- Kozlov, N. E., Sorokhtin, N. O., Martynov, E. V., Marchuk, T. S. 2020. Geodynamics and metallogeny of the Keivy domain (Baltic Shield). *Vestnik of MSTU*, 23(1), pp. 38–45. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-38-45. EDN: NQOJKX.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, pp. 715–717. DOI: <https://doi.org/10.1038/299715a0>.
- Sorokhtin, N. O., Kozlov, N. E., Glaznev, V. N., Martynov, E. V. 2020. A study in Earth's geological evolution. The Baltic Shield. John Wiley & Sons, Inc., URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119651208>.

Сведения об авторах

Козлов Николай Евгеньевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук, профессор; e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Nikolay E. Kozlov – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Professor; e-mail: kozlov.n.e@yandex.ru

Сорохтин Николай Олегович – Нахимовский пр., 36, Москва, Россия, 117997; Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Nikolay O. Sorokhtin – 36 Nakhimovsky Ave., Moscow, Russia, 117997; Shirshov Institute of Oceanology RAS, Dr Sci. (Geol.-Mineral.), Chief Researcher; e-mail: nsorokhtin@mail.ru

Марчук Татьяна Сергеевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, вед. инженер; e-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

Tatyana S. Marchuk – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Leading Engineer; e-mail: marchuk@geoksc.apatity.ru

УДК 622.4.3:519.67

Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL

П. В. Амосов*, А. А. Бакланов

*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
28.01.2023;

принята к публикации
07.02.2023

Ключевые слова:

CFD-модель
атмосферы,
программные коды,
параметры конвекции
и фоновой
стратификации,
интенсивность
пыления

Для цитирования

В статье представлен обзор исследований аэротермодинамики и загрязнения атмосферы на объектах горной промышленности с использованием программных комплексов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование), включающий специализированные и неспециализированные программы (FLOWVISION, ANSYS FLUENT, COMSOL). Описана аэротермодинамическая модель атмосферы, в которой уравнения динамики в приближении несжимаемой жидкости дополнены уравнением переноса тепла и параметрами Кориолиса, конвекции (плаваемости), фоновой стратификации и потока радиации; рассмотрены необходимые модификации в программной среде COMSOL, обеспечивающие возможность выполнения исследований аэротермодинамики с учетом различных состояний атмосферы. Построена и апробирована на упрощенном представлении хвостохранилища двухмерная CFD-модель атмосферы. При фиксированной скорости ветрового потока 5 м/с и вариации параметра фоновой стратификации (от $-0,05$ до $+0,05$ °C/м) выполнены численные эксперименты, в ходе которых отмечены различия в аэродинамических параметрах потоков и пространственного распределения температуры в условиях разных состояний атмосферы. Анализ динамической скорости на высоте пыления и вертикального потока массы осуществлен с использованием эмпирической зависимости интенсивности пыления. Показана асимметричность (относительно нейтрального состояния атмосферы) величины вертикального потока массы в сравнении с неустойчивым и инверсионным состояниями. При устойчивых состояниях атмосферы величина вертикального потока массы пыли, а значит, и загрязнения атмосферы вниз по потоку будет заметно выше, чем при неустойчивых состояниях.

Амосов П. В. и др. Разработка модели аэротермодинамики атмосферы для исследования процессов пыления на хвостохранилищах с использованием программы COMSOL. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 25–44. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44).

Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for the study of dusting processes at tailings dumps using COMSOL software

Pavel V. Amosov*, Alexander A. Baklanov

*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;
e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Article info

Received
28.01.2023;

Accepted
07.02.2023

Key words:

CFD-model
of atmosphere,
software codes,
convection
and background
stratification parameters,
dusting intensity

For citation

Abstract

An overview of studies of aerothermodynamics and atmospheric pollution at mining facilities using computational fluid dynamics software systems (CFD modeling) has been presented. Both specialized and non-specialized software are marked. The review focuses on the studies performed using the FLOWVISION, ANSYS FLUENT and COMSOL software codes. An aerothermodynamic model of the atmosphere is described in which the equations of dynamics in the incompressible fluid approximation are supplemented by the heat transfer equation and the parameters of Coriolis, convection (buoyancy), background stratification and radiation flux. The necessary modifications in the COMSOL software are described, which make it possible to carry out studies of atmospheric aerothermodynamics under various atmospheric conditions. A two-dimensional CFD model of the atmosphere has been built and tested on a simplified representation of the tailings dump. At a fixed wind flow velocity of 5 m/s and variations in the background stratification parameter (from -0.05 to $+0.05$ °C/m), numerical experiments have been performed and the calculation results have been analyzed. Differences in the aerodynamic parameters of the flows and the spatial distribution of temperature under different atmospheric conditions are noted. Estimates of the dynamic velocity at the dusting height and the vertical mass flux using the empirical dependence of the dusting intensity are performed. The analytical dependence of the vertical mass flux as a function of the stratification parameter is discussed. The asymmetry (relative to the neutral state of the atmosphere) of the magnitude of the vertical mass flux in comparison with the unstable and inversion states is shown. In stable atmospheric conditions, the magnitude of the vertical flux of the dust mass, and hence the pollution of the atmosphere downstream, will be noticeably higher than in unstable states.

Amosov, P. V. et al. 2023. Development of a model of atmospheric aerothermodynamics for the study of dusting processes at tailings dumps using COMSOL software. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 25–44. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-25-44).

Введение

Компьютерное моделирование на базе верифицированных программ (FLOWVISION, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, COMSOL и др.) используется для решения задач на объектах рудничной аэрологии (карьеры, подземные выработки) и горнопромышленных предприятиях, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (хвостохранилища). Повышение интереса к компьютерному моделированию обусловлено созданием высокопроизводительных компьютеров, разработкой верифицированных программных комплексов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование), а также подготовкой поколения специалистов в области информационных технологий.

Обзор программных продуктов, используемых в оценке качества атмосферы

Специализированные и собственные программы. В настоящее время известно большое количество специализированных CFD-моделей аэротермодинамики и переноса загрязнений в атмосфере. Например, на сайте Университета в г. Гамбурге содержится актуальная (май 2022 г.) база данных (более сотни) программных продуктов¹, разработанная в рамках проекта COST728 "Enhancing Meso-scale Meteorological Modelling Capabilities for Air Pollution and Dispersion Applications". Авторы проекта классифицировали эти программы как по пространственному масштабу, так и по областям приложения кодов.

В силу недоступности и сложности в применении профессиональных программных продуктов, ограниченности финансовых средств часто приходится применять доступные ресурсы; сделать это можно либо посредством разработки собственных программ, либо при использовании неспециализированных (коммерческих) программных кодов, настраивая их под конкретные задачи.

Многие исследовательские группы настроены на разработку собственных компьютерных программ и моделей, например:

– группа ученых Тульского государственного университета под руководством Качурина Н. М. изучали процессы переноса загрязнений на объектах горной промышленности на базе численного моделирования (Качурин и др., 2016);

– сотрудники Института динамики геосфер им. М. А. Садовского РАН (Хазинс В. М. с коллегами) разработали эйлерову модель, предназначенную для моделирования начальной стадии образования и подъема пылевого облака (Khazis et al., 2020);

– томские специалисты (Нутерман Р. Б., Старченко А. В. и др.) выполнили значительный объем исследований по разработке математической модели аэродинамики и переноса примеси от выбросов автотранспорта в элементах городской застройки, изучали структуры течений над взлетно-посадочной полосой аэропорта и др. (Nuterman et al., 2010; Старченко и др., 2015);

– сотрудники факультета геофизики чилийского университета г. Сантьяго (Flores et al., 2014) изучали проблему циркуляции воздуха внутри крупных карьеров при интенсивной инсоляции, в которых преобладают механические и плавучие эффекты (имеющие решающее значение при изучении рассеивания загрязняющих веществ внутри и снаружи карьера) с использованием ранее разработанного решателя OpenFOAM.

Неспециализированные (коммерческие) программные продукты. Группы специалистов в области охраны окружающей среды (прежде всего атмосферы) и аэрологии карьеров, а также преподаватели и сотрудники вузов технического профиля в своей деятельности пытаются использовать CFD-модели, разработанные на базе неспециализированных программных кодов.

Ниже представлена собранная и проанализированная информация по примерам использования неспециализированных программ (FLOWVISION, ANSYS FLUENT, COMSOL и др.) при решении проблем оценки качества воздуха на объектах горнопромышленного комплекса (карьеры, хвостохранилища, отвалы) как в России, так и за рубежом. Ссылки на публикации, не приведенные в этом обзоре, можно найти в библиографических списках, указанных в работах упомянутых авторов.

FLOWVISION²

Для оптимизации формирования отвалов Башировым Н. Р. (Баширов, 2018) произведена компьютерная симуляция движения воздуха при разной геометрии прикарьерного пространства и различных температурах воздуха. Автором поставлена цель – обеспечить концентрацию и направление движения воздушного потока непосредственно в чашу карьера в условиях естественного проветривания путем формирования контуров отвалов.

В работах сотрудников Санкт-Петербургского горного университета (Гридина Е. Б., Петров И. А., Черкай З. Н.) (Гридина и др., 2017b) отмечается, что наиболее сложным элементом моделирования процесса проветривания карьерного пространства является температурная стратификация атмосферы карьера

¹ Model inventory. URL: https://mi-pub.cen.uni-hamburg.de/index.php?id=6295&no_cache=1 (дата обращения 7 мая 2022 г.)

² См.: Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision. Версия 3.09.04. Руководство пользователя. М., 2015. 1295 с. ; Щеляев А. FlowVision – современный российский инструмент математического моделирования. URL: <https://sapr.ru/article/21879> (дата обращения: 21.08.2018).

и учет температурных процессов. Анализ структуры ветровых потоков был выполнен на примере модели Оленегорского карьера (Кольский полуостров).

Авторы публикации (*Гридина и др., 2017a*) для моделирования естественного проветривания Оленегорского карьера и изучения распространения вредных примесей в карьерном пространстве использовали низкорейнольдсовую ($k - \varepsilon$)-модель турбулентности. На начальном этапе моделирования получена структура ветровых потоков в нижней части Оленегорского карьера. На следующем этапе рассмотрена подача отработанного воздуха из подземного рудника через порталы штолен в карьерное пространство.

ANSYS FLUENT³

В работе (*Ястребова, 2014*) построена модель процесса распространения воздушных потоков, которая позволяет изучить зависимость количества застойных зон от горнотехнических и климатических параметров с целью нормализации атмосферы карьера. В ходе исследований Ястребовой К. Н. установлено, что рост скорости ветра на площадках в карьере возрастает по мере увеличения расстояния от откоса уступа.

Сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета Гендлером С. Г. и Борисовским И. А. выполнен цикл исследований (*Гендлер и др., 2021*):

1) осуществлено математическое моделирование аэродинамических процессов при естественной вентиляции, а также комплексной вентиляции, включающей принудительную подачу воздуха в карьерное пространство по системе выработок, и установлено, что образование зон рециркуляции характерно для третьей стадии разработки, причем ее максимальный объем приурочен к завершающему этапу работ;

2) исследована аэродинамика процессов при естественном проветривании золоторудных карьеров на различных этапах отработки месторождения; решена задача по оценке эффективности естественной вентиляции на различных этапах разработки месторождения с учетом повышения глубины горных работ;

3) изучено влияние температурных инверсий на эффективность проветривания карьерного пространства. Результаты исследований свидетельствуют о том, что область применения естественной вентиляции карьеров, расположенных в Арктической зоне России, следует устанавливать с учетом стохастических законов изменения термодинамических параметров атмосферного воздуха, определяющих величину температурного градиента в воздухе.

Значительный объем исследований выполнен группой сотрудников Горного института КНЦ РАН под руководством Козырева С. А. В работе (*Козырев и др., 2017*) с использованием 3D-компьютерного моделирования исследован характер распределения воздушных потоков на поверхности и в карьерном пространстве глубоких карьеров с учетом реального рельефа местности и масштаба карьера рудника Железный Ковдорского ГОКа. Выявлено влияние породных отвалов и прибортовых зон карьера на формирование рециркуляционных зон, вихревых течений и степени ослабления воздушных потоков в различных зонах карьера в зависимости от скорости ветра на поверхности.

В работе (*Амосов и др., 2018b*) изложены отдельные моменты авторского опыта создания компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера. Авторы полагают, что изложенный материал будет полезен пользователям программы, на базе которой предпринимаются попытки моделировать аэродинамические процессы с учетом теплового фактора не только в замкнутых областях (на что изначально ориентируют разработчики программы), но и в таких открытых системах, как карьеры и хвостохранилища.

Исследования Амосова П. В. с коллегами (*Амосов и др., 2019*) посвящены сравнительному анализу результатов численного моделирования аэротермодинамики атмосферы карьеров в условиях температурной инверсии (модели несжимаемого идеального газа и несжимаемой жидкости). По результатам анализа показано, что обусловленные тепловым фактором изменения в структуре скоростного поля и значениях компонент скорости окажут существенное влияние на процесс распространения загрязнений (при прочих равных условиях), что отразится и на времени достижения нормативных показателей чистоты атмосферы.

Цель работы Назарчука О. В. (*Назарчук, 2021*) заключается в изучении закономерностей и связей распределения угарного газа в атмосфере карьера в условиях температурной инверсии и штиля. Геометрия модели учитывает сложную орографию прилегающей к карьере территории, а также перепад высот на бортах карьера. Для описания аэродинамических процессов использовано приближение несжимаемой жидкости. Для замыкания системы уравнений неразрывности и Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, использована Realizable ($k - \varepsilon$)-модель турбулентности.

В работе Yuan Wang с коллегами (*Yuan Wang et al., 2021*) на основе полевых испытаний, численного моделирования и теоретического анализа в глубоком карьере Sunken в качестве показателя степени сложности диффузии пыли выбрано время диффузии от максимальной концентрации пыли после взрывных работ до сниженной концентрации (до уровня ПДК). В ходе моделирования определено, что угол наклона длинной оси, длина длинной оси замкнутого круга, глубина карьера, скорость ветра и направление ветра являются основными факторами, влияющими на диффузию пыли в карьере Sunken.

³ См.: Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. М., 2017. 210 с. ; ANSYS Products 19.0 with Documentation. URL: <https://avxhm.se/software/ANSYS-Products-19-0-with-Documentation.html> (дата обращения: 27.11.2022).

В исследовании другой группы китайских ученых (Huang Z. с коллегами) (Huang Z. et al., 2021) изучен механизм удаления пыли. Авторами проведено численное моделирование в реальном времени процесса загрязнения взрывной пылью в карьере с использованием теории двухфазного потока "газ – твердое тело" (метод Эйлера – Лагранжа) и механики взрыва.

В 2015 г. Kumar Vaibhav Raj (Raj, 2017) представил свои изыскания на тему моделирования аэродинамики атмосферы карьера в арктических условиях. В работе представлены методы моделирования геометрической модели карьера от двумерной модели до полного 3D-моделирования. Особое внимание Raj K.V. уделил правильному подбору параметров расчетной сетки. Для изучения проблемы переноса загрязнений использовались модель с усреднением по Рейнольдсу на основе модели Навье – Стокса (RANS), Realizable ($k - \epsilon$)-модель и модель, основанная на моделировании больших вихрей (LES). Прогнозируемые показатели в значительной степени отличались, но оставались в пределах одного и того же порядка величины для всех мест, где были доступны измерения параметров загрязнения.

Сотрудники Горного института УрО РАН (Бублик С. А., Семин М. А.) в работе (Бублик и др., 2022) представили результаты математического моделирования тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании. В двумерной постановке с учетом естественной конвекции и турбулентного движения воздуха (за исключением теплообмена с горным массивом и влияния солнечной радиации) промоделированы несколько температурных режимов.

Специалистами Казанского национального исследовательского технологического университета (Купцов и др., 2014) предложена вычислительная модель горизонтально однородного пограничного слоя атмосферы, учитывающая различные варианты атмосферной устойчивости (нейтральной, устойчивой и неустойчивой стратификации). Для турбулентного замыкания использована ($k - \epsilon$)-модель турбулентности с модифицированными константами и дополнительным источниковым членом в уравнении для кинетической энергии турбулентности. Авторы отмечают, что решаемые в программном продукте уравнения не вполне адекватно описывают физику турбулентности в атмосферном пограничном слое.

COMSOL⁴

В работе Амосова П. В. с коллегами (Амосов и др., 2015) представлены описание математической модели в приближении слабой сжимаемости и результаты численных экспериментов аэротермодинамических процессов в атмосфере карьера. Задача поступления холодного и теплого воздуха в карьер решается в пространстве реального масштаба в двумерной постановке. Выполнена симуляция аэротермодинамических процессов применительно к карьерам при различных температурных градиентах и вариации скорости воздуха.

В качестве примера практического использования CFD-моделей в рудничной аэрологии в работах сотрудников Горного института КНЦ РАН приведены результаты двумерного моделирования структуры полей скорости для карьера Центральной-Глубокий КФ АО "Апатит" и карьера Железный Ковдорского ГОКа на Кольском полуострове. Полученные данные свидетельствуют о существенном ослаблении воздушных потоков на дне глубоких карьеров [более значительном, чем для карьеров средней глубины (до 350 м)]. В публикациях (Козырев и др., 2014; 2015) представлены результаты численного моделирования процессов распределения воздушных потоков в карьерном пространстве и нормализации атмосферы карьера путем нагнетательного способа проветривания; рассмотрены варианты поступления воздуха через вентиляционные восстающие и горизонтальные выработки. В ходе анализа отмечены существенные изменения в структуре скоростных потоков в пространстве карьера при использовании альтернативных способов подачи воздуха.

Результаты исследований процессов пыления на хвостохранилище АНОФ-2 на базе численного моделирования в продолжение начатых Баклановым А. А. работ еще в прошлом веке (Бакланов, 1988; Baklanov et al., 1998) опубликованы в монографии (Амосов и др., 2014), ряде статей (Амосов и др., 2018а; Амосов и др., 2022), представлены в материалах конференций разного уровня. Основные выводы приведены в готовящейся к публикации монографии сотрудников Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН.

В работе Амосова П. В. (Амосов, 2022) приведены результаты моделирования процессов проветривания карьера при вариации основных параметров модели, в частности:

– определен доминирующий фактор, оказывающий влияние на загрязнение атмосферы карьеров. В паре факторов "взрывные работы – ветровой режим", действующих на процесс естественного проветривания разнонаправлено, доминирующим является ветровой режим;

– исследовано влияние местоположения массовых взрывов и начальной высоты подъема пылегазового облака на время проветривания карьера и уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку; выполнен анализ расчетного времени естественного проветривания карьера и динамики загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку при варьировании двух параметров

⁴ См.: Интегрированная среда численного моделирования COMSOL. URL: <https://www.comsol.ru/> (дата обращения 12.01.2014) ; CFD Module. User's Guide. URL : <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> (дата обращения 16.11.2020).

модели: местоположения массовых взрывов и начальной высоты подъема пылегазового облака при фиксированных значениях начальной концентрации газовой компоненты в облаке и скорости набегающего ветрового потока;

– выполнена оценка влияния местоположения массовых взрывов, начальной высоты подъема пылегазового облака и скорости ветрового потока на верхнем борту карьера на время естественного проветривания карьера и уровень загрязнения атмосферы верхнего борта карьера вниз по ветровому потоку. В ходе анализа показано, что уменьшение высоты подъема пылегазового облака не всегда обеспечивает снижение уровня загрязнения на верхнем борту карьера вниз по потоку.

Обоснование цели исследования

Приведенные выше примеры по использованию неспециализированных программных продуктов при решении проблем обеспечения качества атмосферы, загрязняемой в результате деятельности предприятий горнопромышленного комплекса, рассматривают воздушную среду в ряде известных приближений (приближение несжимаемой жидкости, для неизотермических потоков модели несжимаемого идеального газа, Буссинеска, слабой сжимаемости), весьма далеких от реальной атмосферы.

Представляется необходимым попытаться, используя возможности неспециализированных программных комплексов (не только COMSOL), определить необходимые и реализуемые модификации программ, чтобы можно было применять их для исследований процессов пыления и переноса пылевых загрязнений при различных состояниях (неустойчивых, нейтральных, инверсионных) приземного слоя атмосферы.

В 1990-х гг. популярным было программное обеспечение PHOENICS⁵, с помощью которого предпринимались попытки численного моделирования пограничного слоя атмосферы и переноса загрязнений в сложных орографических условиях. Так, авторы работ (*Baklanov et al., 1997; Baklanov, 2000*) для численного моделирования аэротермодинамики атмосферы нейтральной устойчивости решали уравнения гидродинамики с учетом сжимаемости. Замыкание полной системы уравнений достигалось с помощью $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности с небольшими модификациями.

При этом авторы (*Baklanov et al., 1997; Baklanov, 2000*) отмечают, что большинство моделей атмосферного пограничного слоя используют систему уравнений гидротермодинамики с гидростатическим приближением в приближении Буссинеска (*Physick, 1988*) и без включения полностью сжимаемой системы.

Модель микроклимата атмосферы описана в исследованиях 1970–1990-х гг. (*Берлянд, 1975; Бакланов, 1988; Baklanov et al., 1998; Марчук, 1982; Методы ..., 1983; Пененко и др., 1985; Нормализация ..., 1986; Бакланов и др., 1995*) и в работах 2000-х гг. (*Шлычков и др., 2005; Леженин и др., 2016; Шлычков, 2005; Рапута и др., 2014*); она была реализована применительно к задаче пыления Баклановым А. А. и Ригиной О. Ю. (*Бакланов, 1988; Baklanov et al., 1998*).

В настоящее время представляется достаточно очевидной необходимость совершенствования разработанных компьютерных моделей с учетом состояния атмосферы. Такое усовершенствование можно осуществить, используя в качестве основы модель, описанную в статье Бакланова А. А. и Ригиной О. Ю. (*Baklanov et al., 1998*).

Описание моделей

Пространственная математическая модель

В работе (*Baklanov et al., 1998*) применена модель динамики пограничного слоя атмосферы, которая использует гидростатическое приближение (без учета сжимаемости атмосферы) в приближении Буссинеска. Введение потенциальной температуры и функции Экснера для давления позволяет опустить малые члены и линеаризовать нелинейные члены в уравнениях движения. Трехмерная модель динамики атмосферы в локальном масштабе над сложным рельефом, которая базируется на предыдущих работах авторов (*Бакланов, 1988; Нормализация..., 1986*), записана в следующем виде:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_j u'_i} \right) + \xi_i, \quad (1a), (1b), (1v)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} + S u_3 = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) + Q_z + J_T, \quad (3)$$

⁵ См.: Агранат В. М., Перминов В. А., Шатохин А. А. Введение в PHOENICS. Томск, 2014. 47 с. ; Компьютерное моделирование процессов теплопроводности и конвекции в программном комплексе PHOENICS : метод. указания к выполнению лабораторных работ / сост. : О. В. Воркунов, Р. А. Ишмуратов. Казань, 2013. 28 с.

где $i, j = 1, 2, 3$; $\xi_i = (lu_2, -lu_1, g\beta T)$; ρ, p, T – плотность, функция приведенного давления и потенциальной температуры воздуха; t – время; u_1, u_2, u_3 – компоненты скорости ветра вдоль осей x_1, x_2, x_3 соответственно; S, l – параметры стратификации и Кориолиса; β – коэффициент объемного расширения; ν, λ – коэффициенты молекулярно-кинематической вязкости и теплопроводности; Q_z – радиационная составляющая притока тепла; J_T – антропогенный источник; $\overline{u'_j u'_i}$ и $\overline{u'_j T'}$ – турбулентные члены, определяемые из модели замыкания.

Предлагается принять приведенную систему уравнений за основу в достижении цели, а именно определить необходимые изменения в системе уравнений, описывающих турбулентный режим движения воздуха в приближении несжимаемой жидкости в неспециализированном программном коде COMSOL, чтобы модифицированную модель можно было использовать для моделирования пограничного слоя атмосферы и последующего изучения переноса пыли.

Разработчики программы COMSOL для моделирования аэродинамических процессов в приближении несжимаемой жидкости для турбулентного режима предлагают к использованию следующую систему уравнений: уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу (4а), (4б) и (4в); уравнение неразрывности (5); уравнение нестационарного переноса тепла (6); $(k - \varepsilon)$ -модель турбулентности (7а) и (7б) и ряд вспомогательных соотношений:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_T \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x, \quad (4a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_T \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y, \quad (4б)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_T \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_z, \quad (4в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = Q + q_s \vartheta + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_T \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_T \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_T \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial y} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_T P(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_T \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon, \quad (7a)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T P(\bar{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7б)$$

где $P(\bar{u}) = \nabla \bar{u} : (\nabla u + (\nabla \bar{u})^T)$; $\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $k_T = \eta_T / Sc$; t – время; u, v, w – компоненты вектора скорости потоков в направлении осей x, y, z соответственно; ϑ – температура воздуха; ρ – плотность воздуха; p – давление; C_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении; F_x, F_y, F_z – компоненты вектора массовых сил по осям x, y, z соответственно; Q – источниковый член; q_s – коэффициент теплопереноса; η_T – коэффициент динамической турбулентной вязкости; k_T – коэффициент теплопроводности; k – удельная кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость вязкой диссипации энергии турбулентности; ∇ – оператор Гамильтона; T – транспонирование; Sc – число Прандтля – Шмидта; $C_\mu = 0,09$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – константы $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности.

Рассмотрим возможности по модификации стандартной $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности для выполнения расчетов аэротермодинамики атмосферы. В уравнениях $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности, используемой авторами версии COMSOL 3.5a, не имелось возможности внесения изменений. Это, безусловно, недостаток. По мнению ряда исследователей, использование стандартной модели требует определенных модификаций модели, включающих изменение констант турбулентности, различных граничных условий для верхней и входной границы, добавление источниковых членов и т. д.⁶ (Baklanov et al., 1997; Baklanov, 2000; Alinot et al., 2002; Alinot et al., 2005; Balogh et al., 2012; Parente et al., 2010; Pontiggia et al., 2009; Russell, 2009; Blocken et al., 2007).

⁶ Training Materials and Best Practices for Chemical Weather/Air Quality Forecasting. ETR-26. Geneva, Switzerland : World Meteorological Organization, 2020. 576 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10439.

Уравнения Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу, и уравнения теплопереноса содержат слагаемые (источниковые члены), которые можно использовать для модификации.

Перепишем систему (1)–(3) трехмерных уравнений термогидродинамики турбулентной атмосферы (без уравнения переноса влажности) в удобном для почленного сравнения в следующем виде (*Нормализация...*, 1986):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + lv + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{ux} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{uy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + J_u, \quad (8a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial y} - lv + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{vx} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{vy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + J_v, \quad (8б)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \vartheta' + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{wx} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{wy} \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_w \frac{\partial w}{\partial z} \right) + J_w, \quad (8в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vartheta'}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta'}{\partial y} + w \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} + S w = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{x\vartheta'} \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{y\vartheta'} \frac{\partial \vartheta'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_{\vartheta'} \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} \right) + R_\vartheta + J_{\vartheta'}, \quad (10)$$

где $\mu_{\alpha x}$, $\mu_{\alpha y}$, ν_α ($\alpha = u, v, w, \vartheta'$) – горизонтальные и вертикальные коэффициенты турбулентности для количества движения и тепла соответственно; l – параметр Кориолиса; ϑ' – отклонения потенциальной температуры от фоновой; π – приведенное давление; λ – параметр конвекции (плавучести) (g/\bar{T}) (знаменатель равен 273 К); S – параметр фоновой стратификации; J_u, J_v, J_w – составляющие векторов, определяющих искусственные источники (стоки) импульса по осям; $J_{\vartheta'}$ – искусственные источники (стоки) тепла, работающие по заданному режиму; R_ϑ – поток радиации.

Из почленного сравнения уравнений (1a)–(1в), (2), (3) и (8a)–(8в), (9), (10) определим необходимые модификации в уравнениях программы COMSOL:

- в уравнение (4a) добавляем $F_x = \rho lv$ (компонента силы Кориолиса);
- в уравнение (4б) добавляем $F_x = -\rho lv$ (компонента силы Кориолиса);
- в уравнение (4в) добавляем $F_z = \rho \lambda \vartheta'$ (эффект плавучести);
- в уравнение (6) добавляем $Q = -\rho C_p S w + \rho C_p R_\vartheta$ (фоновая стратификация, потоки радиации)

и используем условие $q_s = 0$.

Итоговая система уравнений трехмерной модели имеет такой вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_r \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho lv, \quad (11a)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_r \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \rho lv, \quad (11б)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_r \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho \lambda \vartheta', \quad (11в)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \vartheta'}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} + \rho C_p v \frac{\partial \vartheta'}{\partial y} + \rho C_p w \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} =$$

$$= -\rho C_p S w + \rho C_p R_\vartheta + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial \vartheta'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_r \frac{\partial \vartheta'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_r \frac{\partial \vartheta'}{\partial z} \right), \quad (13)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{\partial y} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_r P(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_r \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \epsilon, \quad (14a^{\#})$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{C_{\epsilon 1} \epsilon \eta_r P(\bar{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_r \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (14б^{\#})$$

Двухмерная математическая модель

Переход к двухмерной задаче (координаты $X-Z$) достаточно простой: исключаем все члены с переменной y , силу Кориолиса в уравнениях сохранения импульса и радиационные потоки в уравнении сохранения энергии. Именно с плоской задачи предполагается начать построение компьютерных моделей:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (15a)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \pi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho \lambda \mathcal{G}', \quad (15b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (16)$$

$$\rho C_p \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial t} + \rho C_p u \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial x} + \rho C_p w \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial z} = -\rho C_p S w + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_r \frac{\partial \mathcal{G}'}{\partial z} \right), \quad (17)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \eta_r P(\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \rho \varepsilon, \quad (18a)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \rho w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_r P(\bar{u})}{k} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (18b)$$

Коэффициент турбулентного переноса тепла в уравнении (17) определяется посредством осреднения коэффициента турбулентной вязкости по области моделирования с поправкой на число Прандтля – Шмидта (Теодорович, 1988)].

Таким образом, предстоит выполнить следующие дополнения:

– в уравнениях сохранения импульса для горизонтальной компоненты источниковый член равен нулю $J_u = 0$, а для вертикальной компоненты следует добавить член, учитывающий эффект плавучести $J_w = +\rho \cdot \lambda \cdot \mathcal{G}'$ [кг/(м²·с²)];

– в уравнении переноса тепла включен источниковый член $Q = -S \cdot C_p \cdot \rho \cdot v$ (Вт/м³). Коэффициент q_s в уравнении теплопереноса равен нулю ($q_s = 0$).

Параметр фоновой стратификации атмосферы определяем как $S = \gamma_a - \gamma$, где γ – градиент температуры, γ_a – адиабатический градиент температуры (сухоадиабатический градиент температуры равен $-0,01$ °C/м).

Напомним, что если $\gamma < -\gamma_a$, то атмосфера стратифицирована неустойчиво (развивается конвекция); если $\gamma > -\gamma_a$, то атмосфера стратифицирована устойчиво (конвекция подавляется). В соответствии с терминологией, указанной в документе "Изменение потенциальной температуры с высотой при различных видах стратификации атмосферы"⁷, где можно найти вывод параметра фоновой стратификации как

$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} = \mathcal{G} / T \cdot (\gamma_a - \gamma)$, следует, что при сухонеустойчивой стратификации $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} < 0$, при сухобезразличной

$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} = 0$, при сухоустойчивой стратификации $\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} > 0$, что согласуется с выводами, полученными качественным

методом.

Начальные и граничные условия модели

Используемые при описании граничных и начальных условий обозначения подробно описаны в документации программного продукта COMSOL.

Начальные условия при $t = 0$ таковы: $\bar{u} = \bar{u}(\bar{x})$; $\mathcal{G}' = 0$; $\pi = \pi_0$; $k = k_0$; $\varepsilon = \varepsilon_0$.

Граничные условия (H – верхняя граница модели) приняты как в исходной модели, так и установлены по умолчанию разработчиками программы (табл. 1).

Для параметров турбулентности использованы следующие граничные условия, которые установлены по умолчанию разработчиками программы (табл. 2).

⁷ Изменение потенциальной температуры с высотой при различных видах стратификации атмосферы. URL: <https://mydocx.ru/9-112360.html> (дата обращения: 17.05.2020).

Таблица 1. Граничные условия
 Table 1. Boundary conditions

Условие	Граница
$u = u_0(z), w = 0, \vartheta' = 0$	Входная граница $0 < z < H$
$\vec{n}(-k_T(\nabla\vartheta')) = 0$	Выходная граница $0 < z < H$
$\eta_T(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T)\vec{n} = 0, \pi = \pi_0$ (отсутствие вязкого напряжения)	
$u = u_0(H), w = 0, \vartheta' = 0$	Верхняя граница $z = H$
$\vartheta' = f(x, z, t)$	Подстилающая поверхность $z = \delta(x)$
$\vec{n} \cdot \vec{u} = 0, \eta_T(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T)\vec{n} = \left[\rho C_\mu^{0.25} k^{0.25} / \left(\frac{\ln(\delta_w^+)}{\kappa} + C^+ \right) \right] \vec{u}$ (логарифмическая функция стенки)	

Таблица 2. Граничные условия для параметров турбулентности
 Table 2. Boundary conditions for turbulence parameters

Условие	Граница
$k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0$	Входная граница
$\vec{n} \cdot \nabla k = 0, \vec{n} \cdot \nabla \varepsilon = 0$	Выходная граница
$k = k_0, \varepsilon = \varepsilon_0$	Верхняя граница
$\vec{n} \cdot \nabla k = 0, \varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / (\kappa \delta_w^+), \delta_w^+ = \delta_w \rho C_\mu^{0.25} k^{0.5} / \eta$ (логарифмическая функция стенки)	Подстилающая поверхность

Таким образом, в результате выполненных преобразований система уравнений (15а), (15б), (16), (17) становится подобной системе уравнений, описанной в работе (Бакланов, 1988), с соответствующим набором краевых условий, т. е. в рамках коммерческого программного продукта COMSOL создана аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы, которая учитывает параметры конвекции (плавучести) и фоновой стратификации.

Геометрическое представление аэротермодинамической модели

Работоспособность предлагаемого подхода проверена на модели, геометрия которой представлена на рис. 1, а и б. Размер области моделирования составляет $3\,000 \times 1\,000$ м. В координатах 250 и 950 м вдоль горизонтальной оси находятся начало и конец возвышенности высотой 100 м (в координатах 350 – 850 м – будущий источник пыления).

Результаты расчетов и обсуждение

Для тестирования модели приняты следующие значения:

- горизонтальная компонента скорости 5 м/с (на высоте +10 м над основанием модели; на верхней границе фиксируется значение, определяемое по логарифмическому закону 9,337 м/с);
- отклонение потенциальной температуры на границе раздела "земля – воздух" равно 0 °С;
- значение параметра стратификации варьируется в диапазоне от –0,05 до +0,05 °С/м с шагом 0,01 °С/м.

Положительные значения должны обеспечить выстраивание инверсионных состояний атмосферы, а отрицательные – стратифицированно неустойчивых состояний. Предполагается варьировать параметр фоновой стратификации в указанном интервале, чтобы оценить его влияние на величину вертикального потока массы пыли (ВПМ), который рассчитывается по зависимости, указанной в работе (Westphal et al., 1988), как функции 4-й степени динамической скорости.

Эффект влияния параметра стратификации на структуру потока выявлен посредством сравнения местоположений и формы линий тока, отвечающих различным значениям параметра фоновой стратификации. В частности, на рис. 1, а и б представлены расчетные поля скорости и линии тока для двух крайних значений параметра фоновой стратификации (–0,05 и +0,05 °С/м). Несмотря на простую геометрию модели, отклонения в местоположениях и формах линии тока достаточно очевидны, хотя и не столь значительны. Анализ осредненной по области моделирования величины коэффициента турбулентной вязкости свидетельствует о том, что интервал изменения для двух крайних значений параметра фоновой стратификации не превышает 4 %.

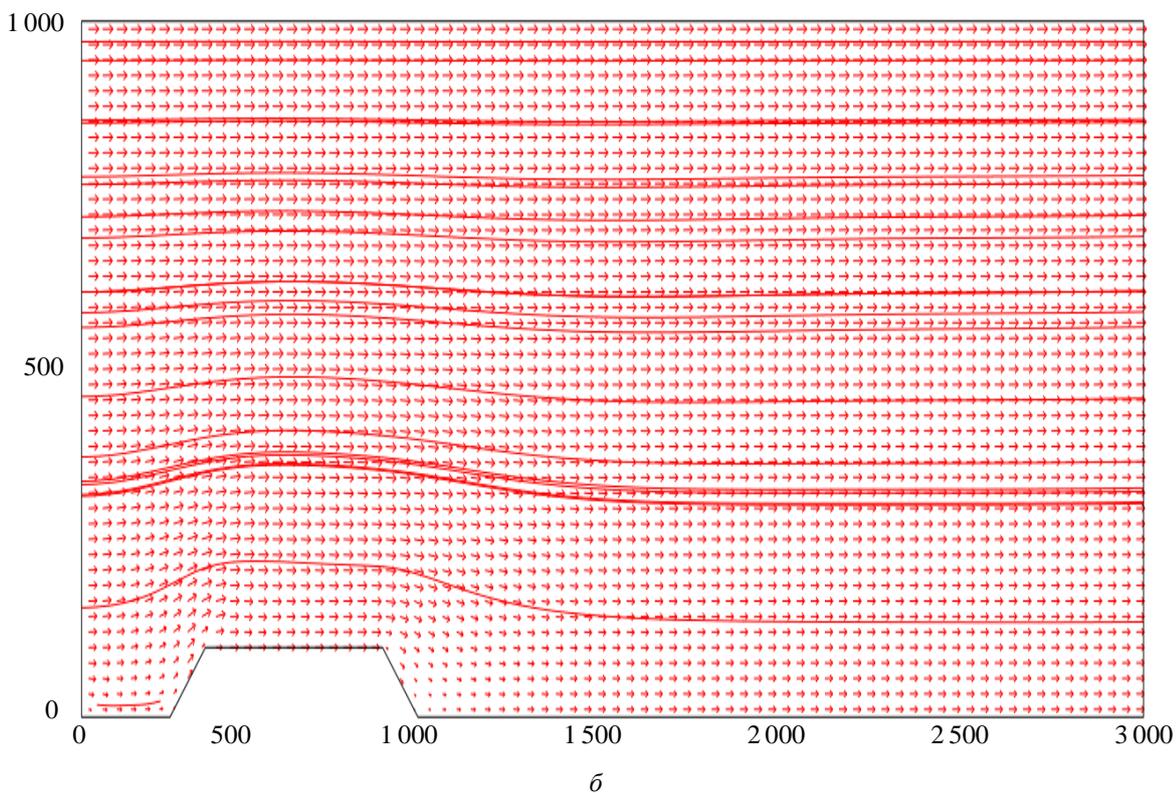
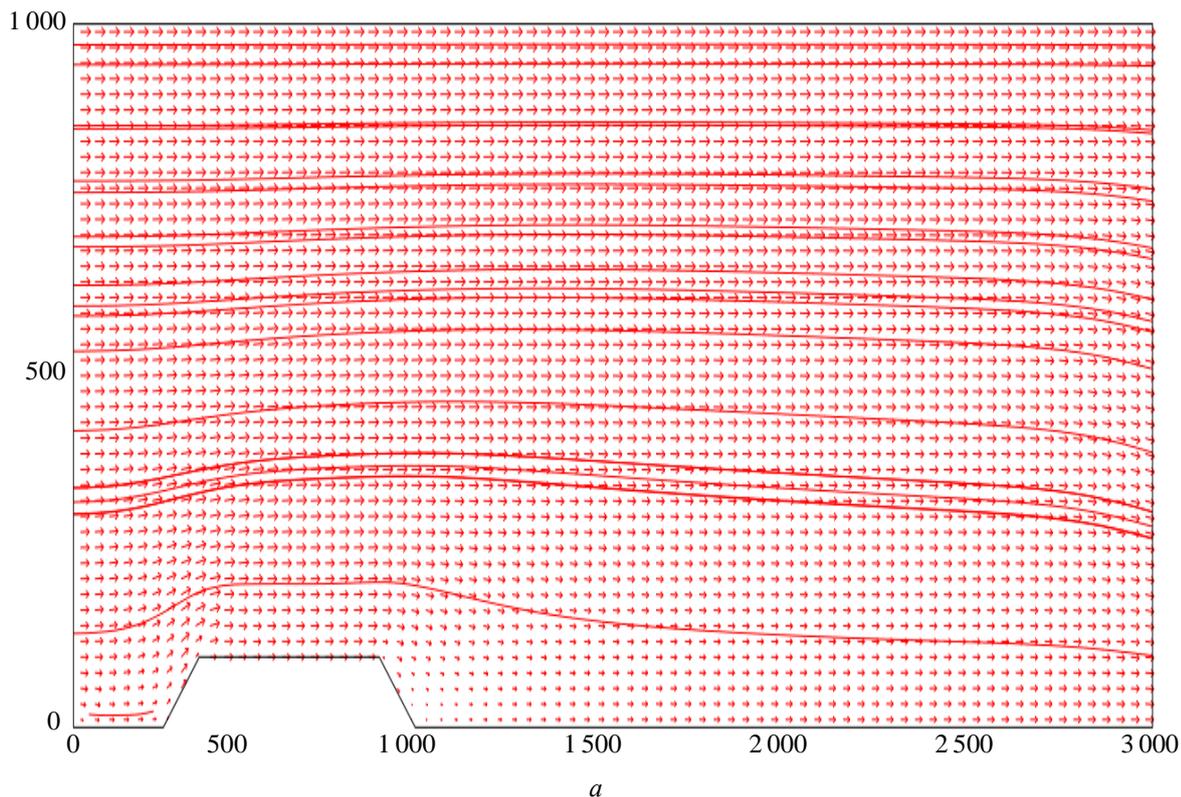


Рис. 1. Расчетное поле скорости и линии тока для двух значений параметра фоновой стратификации: $-0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (а); $+0,05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (б)
Fig. 1. Calculated velocity field and streamlines for two values of the background stratification parameter: $-0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (a); $+0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (b)

Эффект влияния параметра стратификации на пространственное распределение отклонений потенциальной температуры от фоновой качественно и количественно отражены на рис. 2, *а* и *б*. Изолинии построены на один и тот же момент времени (практически стационарный режим, время расчета продлено до 14 400 с) при отрицательном и положительном значении параметра фоновой стратификации (использовано одинаковое количество изолиний).

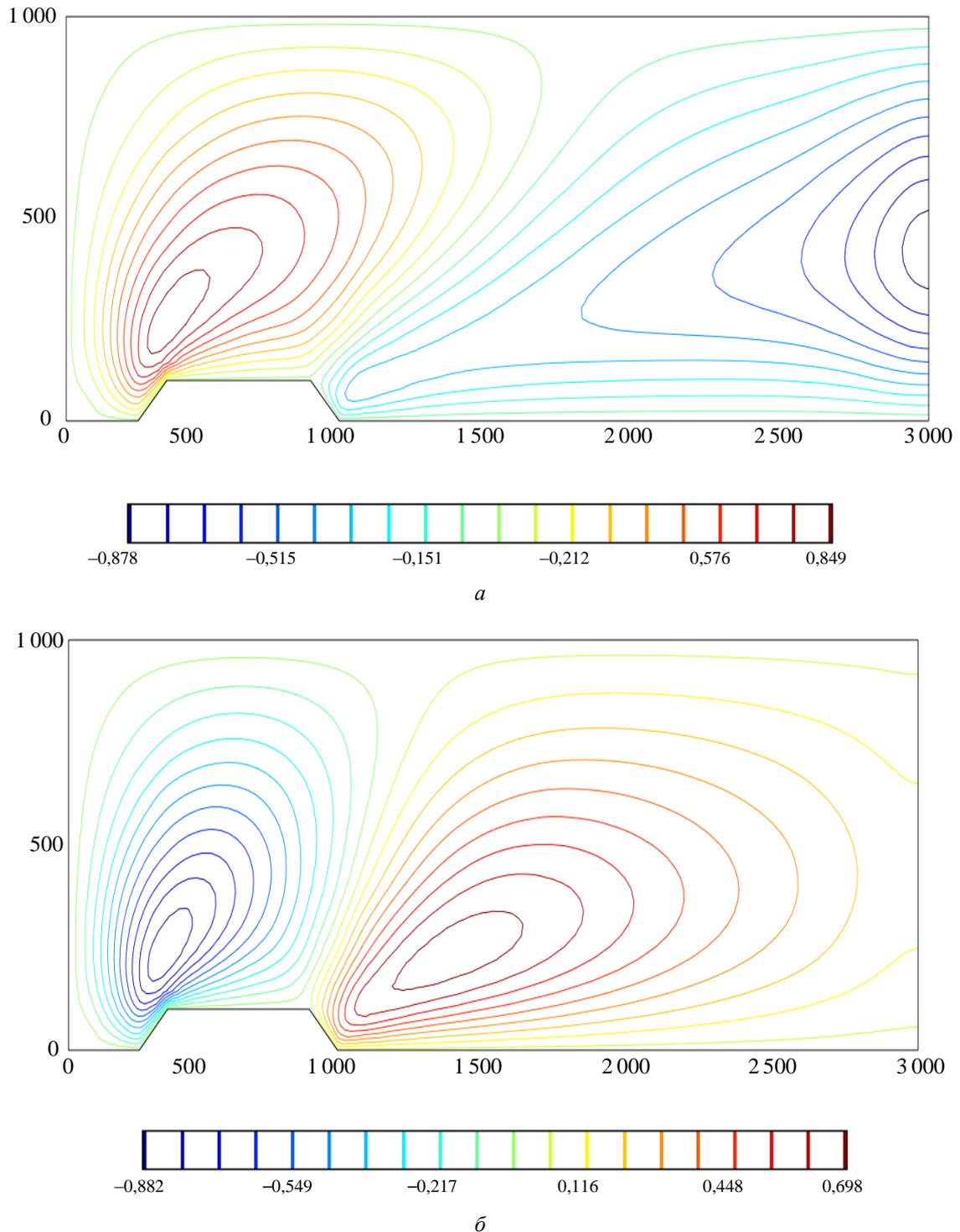


Рис. 2. Пространственные распределения отклонений потенциальной температуры от фоновой для двух значений параметра фоновой стратификации: $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (*а*); $+0,03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ (*б*)
Fig. 2. Spatial distributions of potential temperature deviations from the background temperature for two values of the background stratification parameter: $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (*а*); $+0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ (*б*)

При отрицательном значении параметра фоновой стратификации положительные значения отклонений потенциальной температуры прогнозируются в левой части области моделирования, а отрицательные значения – в правой. При положительном значении параметра наблюдается обратная картина: в набегающем потоке – отрицательные отклонения потенциальной температуры, а вниз по потоку – положительные. Форма изолиний также имеет существенные различия, особенно в правой части области моделирования.

Количественные эффекты влияния параметра фоновой стратификации на аэротермодинамику атмосферы показаны на рис. 3–5.

Распределение отклонений потенциальной температуры от фоновой по высоте (до 350 м) вдоль вертикальной оси, восстановленной к основанию в точке с координатой 2 500 м, представлено на рис. 3. Кривые, расположенные выше оси абсцисс, соответствуют положительным значениям параметра фоновой стратификации (инверсионные состояния). Графики, расположенные ниже оси абсцисс, соответствуют отрицательным значениям параметра (стратифицированы неустойчивые состояния).

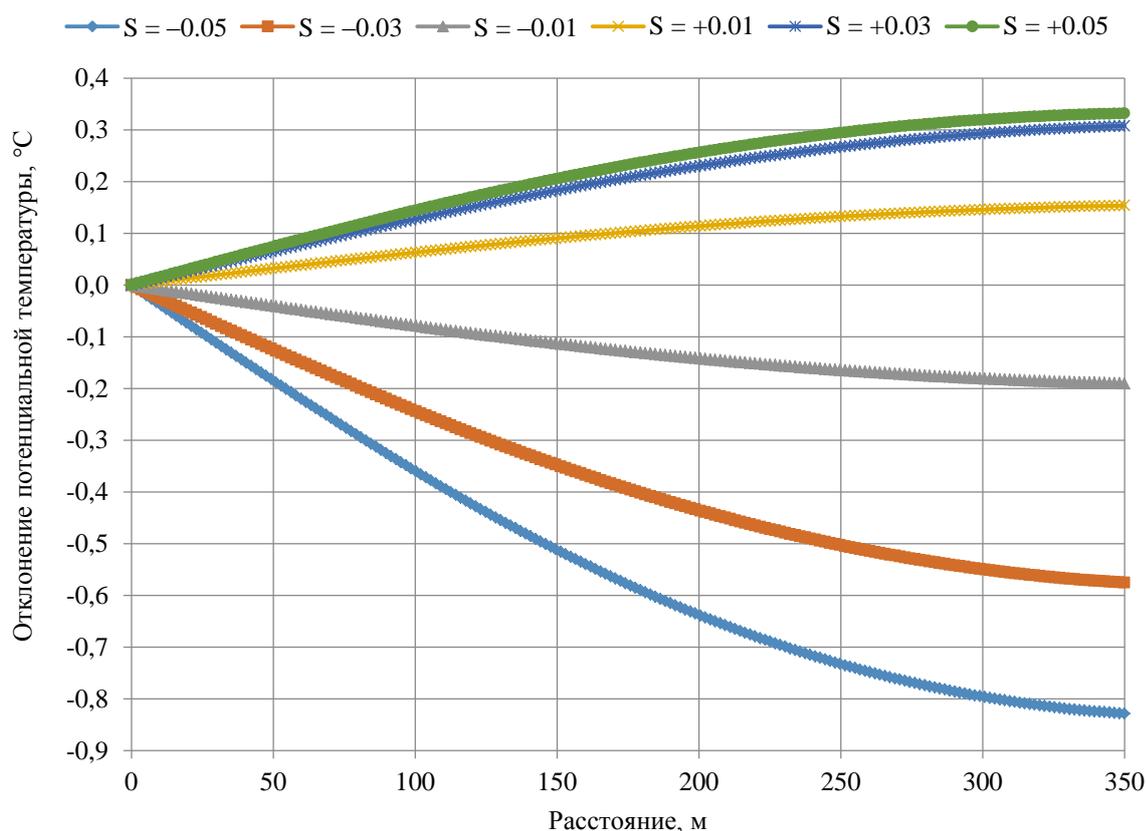
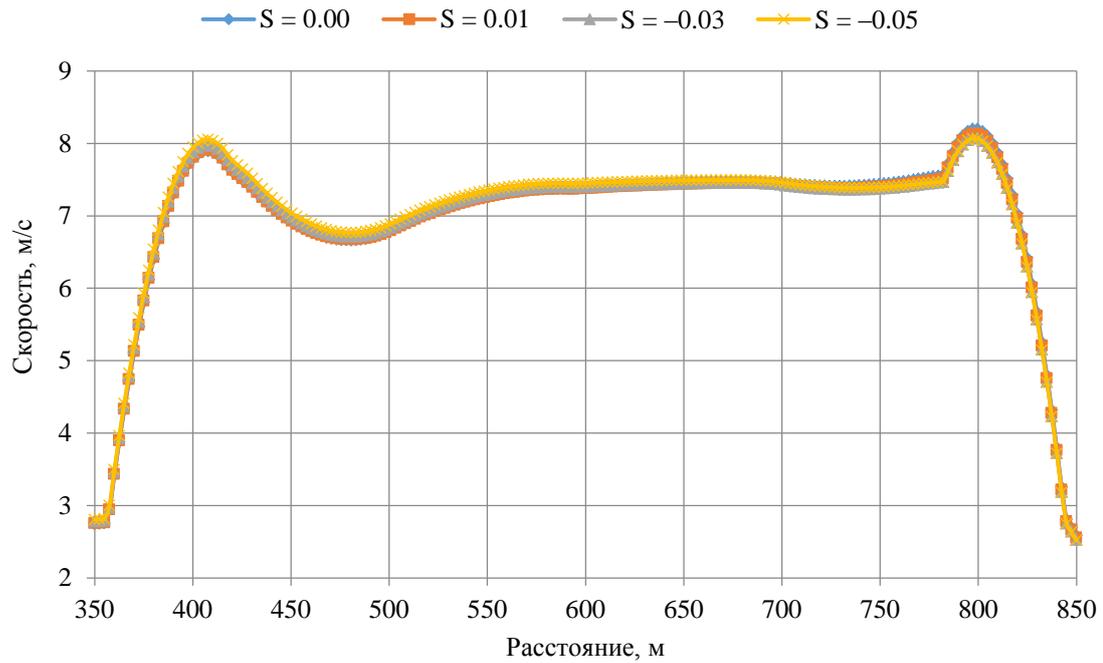


Рис. 3. Распределение отклонений потенциальной температуры от фоновой вдоль вертикальной оси при вариации параметра фоновой стратификации
 Fig. 3. Distributions of deviations of the potential temperature from the background temperature along the vertical axis with variation of the background stratification parameter

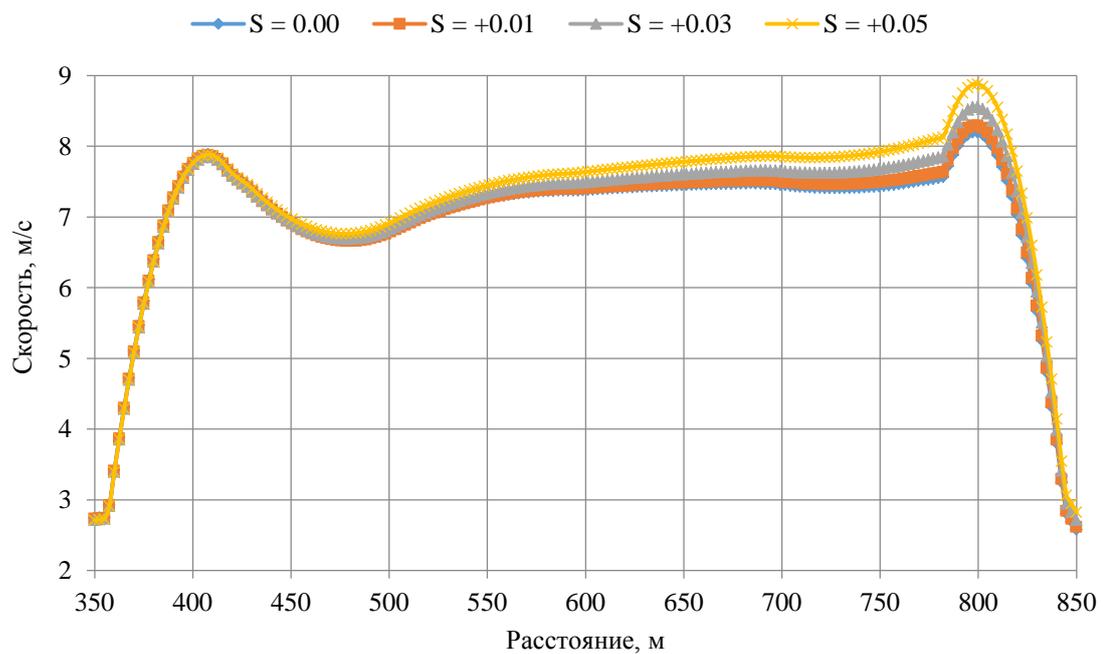
Несимметричность расположения кривых относительно горизонтальной оси соответствует определению параметра фоновой стратификации. Поведение кривых объективно отражает физику процесса. С ростом абсолютной величины параметра фоновой стратификации увеличивается модуль среднего значения градиента отклонений потенциальной температуры.

Для выполнения расчетов переноса пыли (Амосов и др., 2018) требуется знание ВПМ пыли, поэтому выполнен анализ поведения горизонтальной компоненты скорости воздуха над источником пыления. На рис. 4, а и б изображены кривые горизонтальной компоненты скорости при отрицательных и положительных значениях параметра фоновой стратификации соответственно.

Эффект параметра стратификации достаточно нагляден. Если для отрицательных значений параметра в области "плато" поведение кривых достаточно похожее, то для положительных значений параметра, наоборот: в правой половине источника пыления кривые начинают заметно расходиться и значения экстремумов увеличиваются (почти до 9 м/с).



a



b

Рис. 4. Распределение горизонтальной компоненты скорости над источником пыления при отрицательных (*a*) и положительных (*b*) значениях параметра стратификации
Fig. 4. Distribution of the horizontal velocity component over the dust source with variation of the stratification parameter: *a* – negative; *b* – positive

Интересно проследить за осредненными значениями горизонтальной компоненты скорости и, как следствие, динамической скорости на высоте пыления и ВПМ (Амосов и др., 2018), с увеличением параметра фоновой стратификации (от отрицательного к положительному). Расчетные значения динамической скорости на высоте пыления в зависимости от параметра фоновой стратификации приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения динамической скорости на высоте пыления при вариации параметра фоновой стратификации
Table 3. Dynamic velocity values at dusting height with variation of the background stratification parameter

Параметр стратификации, °С/м	Динамическая скорость, м/с
-0,05	0,54479
-0,04	0,54316
-0,03	0,54186
-0,02	0,54105
-0,01	0,54094
0,00	0,54176
0,01	0,54370
0,02	0,54685
0,03	0,55112
0,04	0,55630
0,05	0,56209

Графическое изображение функции вертикального потока массы, который рассчитан в зависимости от параметра фоновой стратификации (*Westphal et al., 1988*), представлено на рис. 5. В результате расчета прогнозируется сложное поведение величины ВПМ с переходом атмосферы из неустойчивого состояния в инверсионное с минимумом при значении, близком к сухо- и влажноадиабатическому градиенту температуры; очевиден эффект асимметрии. Если за минимальное значение ВПМ принять величину интенсивности пыления на уровне $2,48 \cdot 10^{-6}$ кг/(м²·с), то можно отметить, что переход атмосферы в инверсионное состояние приводит к более значительному увеличению величины ВПМ, чем переход в неустойчивое состояние атмосферы: при инверсионном состоянии атмосферы наблюдается рост почти 17 %; при неустойчивом – прирост менее 3 %.

Представленный на рис. 5 график хорошо описывается квадратичной функцией от параметра стратификации. Вертикальный поток массы, рассчитанный по зависимости, указанной в работе (*Westphal et al., 1988*), аппроксимируется с коэффициентом достоверности 0,9969 функцией (19):

$$F_w = 9,0527 \cdot 10^{-5} \cdot S^2 + 3,1882 \cdot 10^{-6} \cdot S + 2,5022 \cdot 10^{-6}. \quad (19)$$

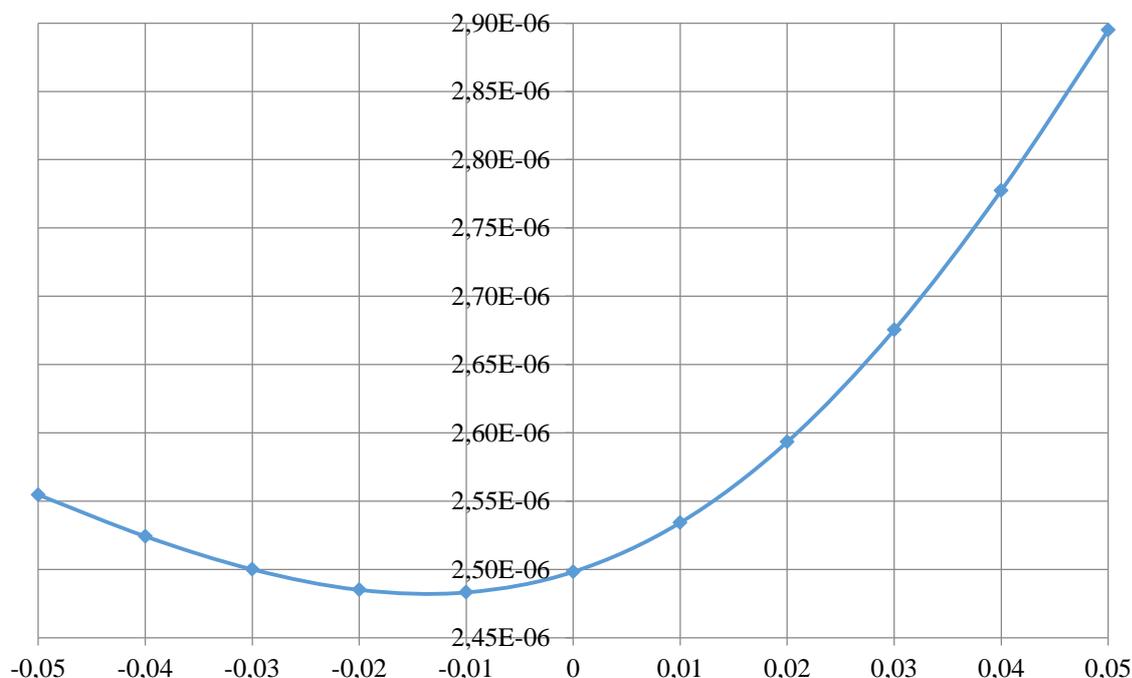


Рис. 5. Распределение вертикального потока массы при вариации параметра стратификации
Fig. 5. Distribution of vertical mass flux with variation of the stratification parameter

Таким образом, минимум величины ВПМ соответствует значению параметра фоновой стратификации, составляющему примерно $-0,018$ °С/м. Такое поведение величины ВПМ в зависимости от параметра фоновой стратификации позволяет утверждать, что и уровень загрязнения атмосферы вниз по потоку в условиях инверсионного состояния атмосферы будет превышать загрязнение в условиях неустойчивой атмосферы.

Заключение

В результате проведенного исследования:

– представлен обзор исследований аэротермодинамики и загрязнения атмосферы, выполняемых с использованием неспециализированных программных комплексов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование) в приложении к задачам на объектах горной промышленности;

– обоснована необходимость усовершенствования CFD-моделей, используемых для прогноза загрязнения атмосферы при пылении хвостохранилищ и других объектов горнодобывающей промышленности (в том числе карьеров). В качестве направления совершенствования моделей при использовании неспециализированного кода COMSOL выбран подход, используемый при решении задач охраны окружающей среды Марчуком Г. И., Пененко В. В. и др.;

– описаны необходимые дополнения к программной среде COMSOL с целью учета в модели конвекции (плавучести) и параметра фоновой стратификации, обеспечивающих расчет аэротермодинамики атмосферы при различных состояниях атмосферы;

– создана в двухмерном варианте аэротермодинамическая модель микроклимата атмосферы, учитывающая параметры конвекции (плавучести) и фоновой стратификации, и апробирована на упрощенной модели хвостохранилища. При фиксированной скорости ветрового потока выполнены численные эксперименты и проанализированы аэродинамические параметры потоков, пространственные распределения отклонений потенциальной температуры в объеме модели; выполнены расчеты динамической скорости на высоте пыления и вертикального потока массы посредством зависимости, указанной в работе (*Westphal et al., 1988*);

– рассмотрена аналитическая зависимость прогноза вертикального потока массы от величины параметра стратификации; показана асимметричность (относительно сухо- и влажноадиабатического градиента температуры) величины вертикального потока массы по сравнению с неустойчивым и инверсионным состояниями. При инверсионных состояниях атмосферы величина вертикального потока массы пыли является максимальной, значит, и уровень загрязнения атмосферы вниз по ветровому потоку будет выше по сравнению с загрязнением при нейтральном или неустойчивом состояниях.

Представляется необходимым осуществить усовершенствование объемных авторских моделей и исследовать загрязнение атмосферы при вариации скорости ветрового потока в различных условиях состояния атмосферы. Кроме того, весьма интересным является применение подобной модели к задаче проветривания карьеров при проведении взрывных работ и эксплуатации оборудования с ДВС в условиях инверсионного состояния атмосферы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР № 1021051803680-5 "Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)".

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Амосов П. В. Результаты анализа численного моделирования процесса проветривания карьера при различных местоположениях пылегазового облака и вариации скорости ветрового потока // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2022. № 60(86). С. 63–69. DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-63-69. EDN: GLRSBT.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Численное моделирование загрязнения атмосферы в подходах случайного выбора дискретных участков пыления и поинтервального распределения размера пыли // Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 1. С. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>. EDN: YVINJK.
- Амосов П. В., Бакланов А. А., Маслобоев В. А. Обоснование методического подхода к оценке интенсивности пыления на хвостохранилище // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018а. № 1. С. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228-2018-10-1-5-14>. EDN: XTAVBJ
- Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Исследование влияния теплового фактора на аэродинамические параметры атмосферы карьера на основе трехмерного компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № S 37. С. 322–332. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-322-332. EDN: TNQCCLC.

- Амосов П. В., Козырев С. А., Назарчук О. В. Разработка компьютерной модели аэротермодинамики атмосферы карьера в Ansys Fluent // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018b. № 44(70). С. 121–125. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121. EDN: XRZQYH.
- Амосов П. В., Новожилов Н. В. Исследование влияния температурного градиента на формирование метеополей атмосферы карьера (на базе численного моделирования) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S 56. С. 528–534.
- Амосов П., Бакланов А., Ригина О. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1988. 200 с.
- Бакланов А. А., Луковский В. Д., Ригина О. Ю. Современные представления о вентиляции карьеров / под ред. Г. В. Калабина. Апатиты : КНЦ РАН, 1995. 52 с.
- Баширов Н. Р. Метод динамического проектирования отвалов при предварительной симуляции воздушного потока // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 2. С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47>. EDN: YSHQWA.
- Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л. : Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
- Бублик С. А., Семин М. А. Математическое моделирование тепло- и воздухораспределения в карьерах при естественном проветривании // Горное эхо. 2022. № 1(86). С. 126–133. EDN: LWBUVJ.
- Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка особенностей формирования температурных инверсий при открытой добыче полезных ископаемых в условиях Арктики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 59–75. DOI: <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>. EDN: THVQHT.
- Гридина Е. Б., Петров И. А. Влияние отработанного воздуха подземного рудника на атмосферу глубокого карьера при комбинированном способе отработки месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017a. № S 5-1. С. 24–31. EDN: XQMDKX
- Гридина Е. Б., Петров И. А. Опыт математического моделирования процесса проветривания Оленегорского карьера в программном комплексе FlowVision // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017b. № S 5-1. С. 32–42. EDN: XQMDLF.
- Качурин Н. М., Стась Г. В., Левин А. Д., Рыбак В. Л. Аэродинамика горных отвалов угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2016. Вып. 1. С. 23–33. EDN: VTFVCSB.
- Козырев С. А., Амосов П. В. Моделирование выноса вредных примесей при проветривании глубоких карьеров с помощью вентиляционных горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S 56. С. 390–398.
- Козырев С. А., Никитин Р. М., Амосов П. В., Массан В. В. Трехмерное компьютерное моделирование аэродинамики атмосферы глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S 5-1. С. 84–92. EDN: URRDBR.
- Козырев С. А., Амосов П. В. Пути нормализации атмосферы глубоких карьеров // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 231–237. EDN: SMTOEN.
- Купцов А. И., Акберов Р. Р., Исламхузин Д. Я., Гимранов Ф. М. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–7. С. 1452–1460. EDN: SWONEJ.
- Леженин А. А., Рапута В. Ф., Ярославцева Т. В. Численный анализ атмосферной циркуляции и распространения загрязняющих примесей в окрестностях Норильского промышленного района // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 467–471. DOI: <https://doi.org/10.15372/aoo20160603>. EDN: VZJPDL.
- Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 320 с.
- Методы математического моделирования в гидродинамических задачах окружающей среды : сб. науч. тр. / под ред. В. В. Пененко. Новосибирск : ВЦ СО АН СССР, 1983. 168 с.
- Назарчук О. В. Исследование процесса загрязнения атмосферы карьерного пространства от точечных стационарных источников в условиях температурной инверсии и штиля // Проблемы недропользования. 2021. № 4(31). С. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.097>. EDN: QMDJEJ.
- Нормализация атмосферы глубоких карьеров / отв. ред. Н. З. Битколов, В. В. Пененко. Л. : Наука, 1986. 296 с.
- Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды / отв. ред. М. М. Лаврентьев. Новосибирск : Наука, 1985. 256 с.
- Рапута В. Ф., Шлычков В. А., Леженин А. А., Романов А. Н. [и др.]. Численный анализ данных аэрозольных выпадений примесей от высотного источника // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 713–718. EDN: SMGMXX.
- Старченко А. В., Нутерман Р. Б., Данилкин Е. А. Численное моделирование турбулентных течений и переноса примеси в уличных каньонах. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. 252 с.
- Теодорович Э. В. Явления турбулентного переноса и метод ренормализационной группы // Прикладная математика и механика. 1988. Т. 52, № 2. С. 218–224.

- Шлычков В. А. Численная модель пограничного слоя атмосферы с детализацией конвективных процессов на основе вихререзающего подхода // *Аэрозоли Сибири / под ред. К. П. Куценого*. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. С. 372–389.
- Шлычков В. А., Мальбахов В. М., Леженин А. А. Численное моделирование атмосферной циркуляции и переноса загрязняющих примесей в Норильской долине // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 490–496. EDN: HRPJCI.
- Ястребова К. Н. Имитационное моделирование процесса обтекания бортов открытой горной выработки естественным ветровым потоком // *Безопасность труда в промышленности*. 2014. № 8. С. 60–62. EDN: SJSJOB.
- Alinot C., Masson C. Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications // *Proceedings of the ASME 2002 Wind Energy Symposium*. ASME 2002 Wind Energy Symposium. January 14–17, 2002. Reno, Nevada, USA, 2002. P. 206–215. DOI: <https://doi.org/10.1115/WIND2002-42>.
- Alinot C., Masson C. $k-\epsilon$ model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications // *Journal of Solar Energy Engineering*. 2005. Vol. 127, Iss. 4. P. 438–443. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2035704>.
- Baklanov A. Application of CFD methods for modelling in air pollution problems: Possibilities and gaps // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2000. Vol. 65, Iss. 1–2. P. 181–189. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1006442514766>.
- Baklanov A., Burman J., Naslund E. Numerical modelling of three-dimensional flow and pollution transport over complex terrain // *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics and its Applications*. 1997. Vol. 10, N 1. P. 57–86.
- Baklanov A., Rigina O. Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia // *The XI World Clear Air and Environment Congress*, 14–18 September 1998, Durban, South Africa, IUAPPA-NACA. Durban, 1998. Vol. 1, 4F-3. P. 1–18.
- Balogh M., Parente A., Benocci C. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced $k-\epsilon$ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2012. Vol. 104–106. P. 360–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.023>.
- Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems // *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41, Iss. 2. P. 238–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.
- Flores F., Garreaud R., Muñoz R. C. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation // *Computers & Fluids*. 2014. Vol. 90. P. 72–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.012>.
- Huang Z., Ge S., Jing D., Yang L. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019. Vol. 17, Iss. 5. P. 10313–10333. DOI: https://doi.org/10.15666/aer/1705_1031310333.
- Khazins V. M., Shuvalov V. V., Soloviev S. P. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, Iss. 10. Article number: 1112. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101112>.
- Nuterman R. B., Baklanov A. A., Starchenko A. V. Modeling of aerodynamics and pollution dispersion from traffic in the urban sublayer // *Mathematical Models and Computer Simulation*. 2010. Vol. 2, Iss. 6. P. 738–752. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048210060098>.
- Parente A., Benocci C. On the RANS simulation of neutral ABL flows // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, May 23–27, 2010. Chapel Hill, North Carolina, USA, 2010. P. 1–9.
- Physick W. L. Review: Mesoscale modeling in complex terrain // *Earth-Science Reviews*. 1988. Vol. 25, Iss. 3. P. 199–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(88\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(88)90021-9).
- Pontiggia M., Derudi M., Busini V., Rota R. Hazardous gas dispersion: A CFD model accounting for atmospheric stability classes // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 171, Iss. 1–3. P. 739–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.064>.
- Raj K. V. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures. Dissertation (Ph.D.) University of Alaska Fairbanks, 2015. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756>.
- Russell A. Computational fluid dynamics modeling of atmospheric flow applied to wind energy research: A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering / Boise State University. Boise, Idaho, USA, 2009. 115 p. URL: <https://scholarworks.boisestate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=td>.

- Wang Y., Du C., Xu H. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, Iss. 1. P. 448–455. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>.
- Westphal D. L., Toon O. B., Carlson T. N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1988. Vol. 45, Iss. 15. P. 2145–2175. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2).

References

- Amosov, P. V. 2022. The results of the analysis of numerical simulation of the process of ventilation of the open pit at different locations of the dust and gas cloud and variation of wind flow velocity. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 60(86), pp. 63–69. DOI: 10.36807/1998-9849-2022-60-86-63-69. EDN: GLRSBT. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Makarov, D. V., Masloboev, V. A. 2022. Numerical modeling of atmospheric pollution in the approaches of random selection of discrete dusting sites and interval distribution of dust size. *Vestnik of MSTU*, 25(1), pp. 61–73. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-1-61-73>. EDN: YBIHJK. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Baklanov, A. A., Masloboev, V. A. 2018a. Justification of the methodical approach to estimation of dust intensity at tailing dump. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra*, 1(10), pp. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228-2018-10-1-5-14>. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Kozyrev, S. A., Nazarchuk, O. V. 2019. Investigation of the influence of the thermal factor on the aerodynamic parameters of the open-pit atmosphere based on three-dimensional computer modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 11(S37), pp. 322–332. EDN: TNQCLC. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Kozyrev, S. A., Nazarchuk, O. V. 2018b. Development of a computer model of atmospheric aerothermodynamics open-pit at Ansys Fluent. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 44(70), pp. 121–125. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.121. (In Russ.)
- Amosov, P. V., Novozhilova, N. V. 2015. Investigation of the influence of the temperature gradient on the formation of the meteofields of the open-pit atmosphere on the basis of numerical modeling. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S56, pp. 528–534. (In Russ.)
- Amosov, P., Baklanov, A., Rigina, O. 2014. Numerical modeling of tailings dusting processes. LAP LAMBERT Academic Publishing. (In Russ.)
- Baklanov, A. A. 1988. Numerical modeling in mine aerology. Apatity. (In Russ.)
- Baklanov, A. A., Lukovskyi, V. D., Rigina, O. Yu. 1995. Modern ideas about ventilation of open-pits. Apatity. (In Russ.)
- Bashirov, N. R. 2018. Method of dynamic design of dumps with preliminary simulation of air flow. *Minerals and Mining Engineering*, 2, pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-2-40-47>. EDN: YSHQWA. (In Russ.)
- Berlyand, M. E. 1975. Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution. Leningrad. (In Russ.)
- Bublik, S. A., Semin, M. A. 2022. Mathematical modeling of heat and air distribution in open-pits with natural ventilation. *Gornoe echo*, 1(86), pp. 126–133. EDN: LWBUVJ. (In Russ.)
- Gendler, S. G., Borisovskij, I. A. 2021. Assessment of the features of the formation of temperature inversions during open-pit mining in the Arctic. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*, 4, pp. 59–75. DOI: <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2021-4-1-59-75>. EDN: THVQHT. (In Russ.)
- Gridina, E. B., Petrov, I. A. 2017a. The effect of the exhaust air of an underground mine on the atmosphere of a deep open-pit with a combined method of mining the deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S 5-1, pp. 24–31. EDN: XQMDKX. (In Russ.)
- Gridina, E. B., Petrov, I. A. 2017b. Experience of mathematical modeling of the process of ventilation of the Olenegorsky open-pit in the FlowVision software package. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S 5-1, pp. 32–42. EDN: XQMDLF. (In Russ.)
- Kachurin, N. M., Stas, G. V., Levin, A. D., Rybak, V. L. 2016. Aerodynamics of coal mine dumps. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*, 1, pp. 23–33. EDN: VTFVCB. (In Russ.)
- Kozyrev, S. A., Amosov, P. V. 2015. Modeling of removal of harmful impurities during ventilation of deep open-pits with the help of ventilation mine workings. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S 56, pp. 390–398. (In Russ.)
- Kozyrev, S. A., Amosov, P. V., Nikitin, R. M., Massan, V. V. 2017. Three-dimensional computer simulation of the aerodynamics of the atmosphere of deep open-pits. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, S 5-1, pp. 84–92. EDN: URRDBR. (In Russ.)
- Kozyrev, S. A., Amosov, P. V. 2014. Ways to normalize the atmosphere of deep open-pits. *Vestnik of MSTU*, 17(2), pp. 231–237. EDN: SMTOEH. (In Russ.)

- Kuptsov, A. I., Akberov, R. R., Islamkhuzin, D. Ya., Gimranov, F. M. 2014. Numerical modeling of the boundary layer of the atmosphere taking into account its stratification. *Fundamentalnye issledovaniya*, 9–7, pp. 1452–1460. EDN: SWOHEJ. (In Russ.)
- Lezhenin, A. A., Raputa, V. F., Yaroslavtseva, T. V. 2016. Numerical analysis of atmospheric circulation and the spread of pollutants in the vicinity of the Norilsk industrial district. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 29(6), pp. 467–471. DOI: <https://doi.org/10.15372/aoo20160603>. EDN: VZJPDJ. (In Russ.)
- Marchuk, G. I. 1982. Mathematical modeling in the problem of the environment. Moscow. (In Russ.)
- Methods of mathematical modeling in hydrodynamic problems of the environment. 1983. In coll. articles. Ed. V. V. Penenko. Novosibirsk. (In Russ.)
- Nazarchuk, O. V. 2021. Investigation of the process of atmospheric pollution of the open-pit space from point stationary sources under conditions of temperature inversion and calm. *Problems of Subsoil Use*, 4(31), pp. 97–104. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.097>. EDN: QMDJEJ. (In Russ.)
- Normalization of the atmosphere of deep open-pit. 1986. Eds. N. Z. Bitkolov, V. V. Penenko. Leningrad. (In Russ.)
- Penenko, V. V., Aloyan, A. E. 1985. Models and methods for environmental protection tasks. Novosibirsk. (In Russ.)
- Raputa, V. F., Shlychkov, V. A., Lezhenin, A. A., Romanov, A. N. et al. 2014. Numerical analysis of aerosol impurity deposition data from a high-altitude source. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 27(8), pp. 713–718. EDN: SMGMXX. (In Russ.)
- Starchenko, A. V., Nuterman, R. B., Danilkin, E. A. 2015. Numerical simulation of turbulent flows and impurity transport in street canyons. Tomsk. (In Russ.)
- Teodorovich, E. V. 1988. Phenomena of turbulent transport and the method of renormalization groups. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 52(2), pp. 218–224. (In Russ.)
- Shlychkov, V. A. 2005. Numerical model of the boundary layer of the atmosphere with details of convective processes based on the vortex-resolving approach. In coll. articles. *Aerosols of Siberia*. Ed. K. P. Kutsebyj. Novosibirsk, pp. 372–389. (In Russ.)
- Shlychkov, V. A., Malbakhov, V. M., Lezhenin, A. A. 2005. Numerical simulation of atmospheric circulation and transport of pollutants in the Norilsk Valley. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 18(5–6), pp. 490–496. EDN: HRPJJC. (In Russ.)
- Yastrebova, K. N. 2014. Simulation modeling of the process of flowing around the sides of an open mine by a natural wind flow. *Occupational Safety in Industry*, 8, pp. 60–62. EDN: SJSJOB. (In Russ.)
- Alinot, C., Masson, C. 2002. Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications. Proceedings of the ASME 2002 Wind Energy Symposium. ASME 2002 Wind Energy Symposium. January 14–17, 2002. Reno, Nevada, USA, pp. 206–215. DOI: <https://doi.org/10.1115/WIND2002-42>.
- Alinot, C., Masson, C. 2005. $k-\epsilon$ model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications. *Journal of Solar Energy Engineering*, 127(4), pp. 438–443. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2035704>.
- Baklanov, A. 2000. Application of CFD methods for modelling in air pollution problems: Possibilities and gaps. *Environmental Monitoring and Assessment*, 65(1–2), pp. 181–189. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1006442514766>.
- Baklanov, A., Burman, J., Naslund, E. 1997. Numerical modelling of three-dimensional flow and pollution transport over complex terrain. *The PHOENICS Journal of Computational Fluid Dynamics and its Applications*, 10(1), pp. 57–86.
- Baklanov, A., Rigina, O. 1998. Environmental modeling of dusting from the mining and concentration sites in the Kola Peninsula, Northwest Russia. The XI World Clear Air and Environment Congress, 14–18 September 1998, Durban, South Africa, IUAPPA-NACA. Durban, Vol. 1, 4F-3, pp. 1–18.
- Balogh, M., Parente, A., Benocci, C. 2012. RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying an enhanced $k-\epsilon$ model and wall function formulation: Implementation and comparison for fluent and OpenFOAM. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104–106, pp. 360–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2012.02.023>.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2), pp. 238–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>.
- Flores, F., Garreaud, R., Muñoz, R. C. 2014. OpenFOAM applied to the CFD simulation of turbulent buoyant atmospheric flows and pollutant dispersion inside large open pit mines under intense insolation. *Computers & Fluids*, 90, pp. 72–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.11.012>.
- Huang, Z., Ge, S., Jing, D., Yang, L. 2019. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(5), pp. 10313–10333. DOI: https://doi.org/10.15666/aeer/1705_1031310333.
- Khazins, V. M., Shuvalov, V. V., Soloviev, S. P. 2020. Numerical modeling of formation and rise of gas and dust cloud from large scale commercial blasting. *Atmosphere*, 11(10). Article number: 1112. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101112>.

- Nuterman, R. B., Baklanov, A. A., Starchenko, A. V. 2010. Modeling of aerodynamics and pollution dispersion from traffic in the urban sublayer. *Mathematical Models and Computer Simulation*, 2(6), pp. 738–752. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070048210060098>.
- Parente, A., Benocci, C. 2010. On the RANS simulation of neutral ABL flows. Proceedings of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), May 23–27, 2010. Chapel Hill, North Carolina, USA, pp. 1–9.
- Physick, W. L. 1988. Review: Mesoscale modeling in complex terrain. *Earth-Science Reviews*, 25(3), pp. 199–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(88\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(88)90021-9).
- Pontiggia, M., Derudi, M., Busini, V., Rota, R. 2009. Hazardous gas dispersion: A CFD model accounting for atmospheric stability classes. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), pp. 739–747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.064>.
- Raj, K. V. 2015. Three dimensional computational fluid dynamics models of pollutant transport in a deep open pit mine under Arctic air inversion and mitigation measures. Dissertation (Ph.D.) University of Alaska Fairbanks. URL: <https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/5756>.
- Russell, A. 2009. Computational fluid dynamics modeling of atmospheric flow applied to wind energy research. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Boise State University. URL: <https://scholarworks.boisestate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=td>.
- Wang, Y., Du, C., Xu, H. 2021. Key factor analysis and model establishment of blasting dust diffusion in a deep, sunken open-pit mine. *ACS Omega*, 6(1), pp. 448–455. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c04881>.
- Westphal, D. L., Toon, O. B., Carlson, T. N. 1988. A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(15), pp. 2145–2175. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1988\)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1988)045<2145:ACSOMA>2.0.CO;2).

Сведения об авторах

Амосов Павел Васильевич – Академгородок, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Pavel V. Amosov – 14a Akademgorodok, Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher; e-mail: p.amosov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Бакланов Александр Анатольевич – 7 bis, Avenue de la Paix, BP2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland; Всемирная метеорологическая организация, д-р физ.-мат. наук, профессор, науч. сотрудник; e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Alexander A. Baklanov – 7 bis, Avenue de la Paix, BP2300, CH-1211 Geneva 2, Switzerland; World Meteorological Organization, Dr Sci. (Phys.&Math.), Professor, Science Officer; e-mail: aabaklanov@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5396-8440>

Анализ неточностей и несоответствий в актуальной редакции стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009

Ж. В. Васильева*, А. Г. Васильев, Е. А. Кирдишова

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;

e-mail: vasilevazhv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
09.01.2023;

получена
после доработки
17.01.2023;

принята к публикации
17.01.2023

Ключевые слова:

стандарты,
ГОСТ Р ИСО 7730-2009,
ISO 7730:2005,
микроклимат
помещений, тепловой
комфорт, тепловой
режим, PMV (Predicted
Mean Vote),
PPD (Predicted
Percentage of Dissatisfied),
компьютерная
программа

Для цитирования

Реферат

В статье осуществлен анализ неточностей и несоответствий национального стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009 "Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта" и аналогичного международного стандарта ISO 7730:2005. Эти стандарты предназначены для оценки качества внутренней среды с целью соответствия международным практикам в области экологической устойчивости и в сфере энергоэффективности строительства. В процессе анализа исследованы и описаны неточности и несоответствия в стандартах, предложены их корректировки в разделах 4 и 5, устанавливающих метод исчисления прогнозируемой средней оценки (PMV, Predicted Mean Vote) и прогнозируемого процента недовольных температурной средой (PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied), а также в приложении D, содержащем листинг программы вычисления величины PMV на языке BASIC. Статья написана в соответствии с рекомендациями, выработанными в процессе реализации международного проекта KO1089 Green Arctic Building программы приграничного сотрудничества Kolarctic CBC.

Васильева Ж. В. и др. Анализ неточностей и несоответствий в актуальной редакции стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 45–56. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-45-56.

Analysis of errors and inaccuracies in the current edition of the GOST R ISO 7730-2009 standard

Zhanna V. Vasileva*, Anatoliy G. Vasilev, Elena A. Kirdishova

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;

e-mail: vasilevazhv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Article info

Received
09.01.2023;

received
in revised
17.01.2023;

accepted
17.01.2023

Key words:

standards,
GOST R ISO 7730-2009,
ISO 7730:2005, indoor
microclimate, thermal
comfort, thermal regime,
PMV (Predicted Mean
Vote), PPD (Predicted
Percentage
of Dissatisfied),
computer program

For citation

Abstract

The paper analyzes the inaccuracies and inconsistencies of the national standard GOST R ISO 7730-2009 "Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of the comfort of the thermal regime using the calculation of PMV and PPD indicators and criteria of local thermal comfort" and similar international standard ISO 7730:2005. These standards are designed to assess the quality of the internal environment in order to comply with international practices both in the field of environmental sustainability and in the field of energy efficiency of construction. The authors have investigated and described inaccuracies and inconsistencies, have proposed their corrections in Sections 4 and 5, which establish the method of calculating the predicted mean estimate (PMV – Predicted Mean Vote) and the predicted percentage of dissatisfied with the temperature environment (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied), as well as in Appendix D, which contains a listing of the PMV calculation program in the BASIC language. The paper has been written in accordance with the recommendations developed during the implementation of the international project KO1089 "Green Arctic Building" of the Cross-Border Cooperation Program.

Vasileva, Zh. V. et al. 2023. Analysis of errors and inaccuracies in the current edition of the GOST R ISO 7730-2009 standard. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 45–56. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-45-56.

Введение

Комфортный тепловой режим является важной составляющей благоприятной жилой среды (Al Horr et al., 2016a; Frontczak et al., 2011; Oldewurtel et al., 2013), повышает производительность персонала в условиях производственной среды (Fisk, 2000; Al Horr et al., 2016b; Wyon, 1996) и значительно влияет на когнитивные функции учащихся в общеобразовательных школах и высших учебных заведениях (Jia et al., 2021; Wargocki et al., 2019; Mendell et al., 2005). Поэтому оценка и нормирование параметров теплового комфорта занимает значительное место в проектировании и создании современных зданий.

Особенно велика роль оценки комфорта внутренней среды для создания энергоэффективных зданий (EN. Directive 2010/31/EU) ввиду необходимости нахождения баланса между поступлением воздуха из внешней среды и сохранением тепла помещения, а также эффективной работы вентиляции для обеспечения качества воздуха в условиях стратегии снижения энергопотребления (Šujanová et al., 2019; Paone et al., 2018). Известно, что потребление энергии системами вентиляции и отопления составляет значительную долю – не менее 60–70 % от общего энергопотребления зданий (Khan et al., 2008). Использование (прогнозирование) оценки теплового комфорта в проектировании зданий и выборе систем вентиляции и отопления позволяет сводить к минимуму потребление энергии, используемой для достижения желаемых внутренних условий (Cox, 2005). Так, рекомендуемые показатели вентиляции зданий в большинстве международных стандартов и руководств основаны на критериях теплового комфорта (Olesen, 2004).

В Российской Федерации состояние тепловой среды помещений, как правило, оценивается сочетанием требований (Дударев и др., 2013) к показателям температуры воздуха, относительной влажности, скорости движения воздуха (ГОСТ 30494-2011, ГОСТ Р 54964-2012, СП 60.13330.2020, ГОСТ 12.1.005-88, СанПиН 1.2.3685-21). Зарубежные стандарты качества внутренней среды в новых и существующих зданиях ориентируются на интегрированный подход, базирующийся на модели теплового комфорта в помещениях (Спирidonov и др., 2016). Такой подход отражен в международном стандарте ISO 7730: 2005 и аналогичных стандартах ANSI/ASHRAE Standard 55 (США) и CEN. EN 15251:2007 (ЕС). Этот подход основывается на модели теплового баланса Фангера (Fanger, 1970), объединяющей переменные тепловой среды, активность человека и изоляцию его одежды и дающей возможность прогнозировать приемлемость данной тепловой среды для жителей здания посредством определения прогнозируемого среднего голоса (PMV) и прогнозируемого процента недовольных (PPD).

В 2009 г. в России вышел аналог международного стандарта ISO 7730:2005 российский стандарт ГОСТ Р ИСО 7730-2009 "Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта", позволяющий российским специалистам освоить методологию оценки комфортности теплового режима с помощью международно признанной модели теплового баланса (модели PMV-PPD).

Тем не менее, несмотря на вышедший документ ГОСТ Р ИСО 7730-2009, российские исследователи и специалисты, работающие в данной области, предпочитают использовать оригинальный англоязычный международный стандарт ISO 7730:2005, либо доступные публикации о моделях Фангера, лежащие в его основе (Гусейнова, 2019; Лексин и др., 2014; Пророкова, 2017; Усмонов, 2015). Причиной тому является ряд неточностей и несоответствий, допущенных как при подготовке российского варианта стандарта, так и в компьютерной программе для вычисления показателя PMV в англоязычной версии стандарта. В настоящее время отсутствуют работы, содержащие анализ допущенных неточностей и несоответствий в актуальных версиях ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005, что существенно осложняет их полноценное использование.

Целью работы являлись исследование и анализ неточностей и несоответствий, допущенных в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005, и формирование предложений по их корректировке и совершенствованию. Данное аналитическое исследование реализовано в соответствии с рекомендациями, выработанными в процессе выполнения международного проекта KO1089 Green Arctic Building программы приграничного сотрудничества Kolarctic CBC.

Материалы и методы

Материалом для анализа в данной работе являлись национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 7730-2009 "Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта", размещенный на официальных сайтах российских электронных справочно-правовых систем ("Гарант", "КонсультантПлюс"), и международный стандарт ISO 7730:2005 "Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria".

Объектом анализа послужили разделы 4 и 5 стандартов, устанавливающие метод исчисления прогнозируемой средней оценки (PMV, Predicted Mean Vote) и прогнозируемого процента недовольных температурной средой (PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied), а также приложение D, содержащее программу вычисления показателя PMV на языке BASIC.

Результаты и обсуждение

Анализ формул раздела 4 стандартов ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005

Обсуждаемые международный стандарт ISO 7730:2005 и соответствующий ему национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 7730-2009 базируются на модели теплового баланса Фангера (*Fanger, 1970*), учитывающей комплекс факторов в обеспечении теплового баланса человека: температуры, влажности воздуха, скорости движения воздуха, средней радиационной температуры, одежды, физической активности людей, находящихся в помещении. Результатом оценки является предсказание теплоощущений человека в виде комплексного параметра *PMV* (Predicted Mean Vote) и показателя *PPD*, отражающего уровень дискомфорта (Predicted Percentage of Dissatisfied). Модель *PMV-PPD* стала международно признанной моделью для описания прогнозируемого среднего теплового комфорта жителей в помещениях.

В разделе 4 рассматриваемых стандартов указана основная формула (1), определяющая показатель *PMV*. Эта формула в оригинальной англоязычной версии стандарта ISO 7730:2005 имеет следующий вид:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

Поскольку такая математическая интерпретация малознакома российскому пользователю, то в российской версии стандарта ГОСТ Р ИСО формула приобретает более знакомый вид (без больших скобок), но теряет при этом заменяющие их скобки, что ведет к неправильному трактованию и исчислению формулы (рис. 1).

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028 \cdot (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

Рис. 1. Изображение некорректной интерпретации формулы (1) в ГОСТ Р ИСО 7730-2009
Fig. 1. Image of incorrect interpretation of formula (1) in GOST R ISO 7730-2009

Физический смысл формулы (1) заключается в оценке теплового баланса тела человека, т. е. исчислении разницы между внутренней теплопродукцией и теплопотерями в окружающую среду (*Fanger, 1973*). Величина *M* представляет собой параметр, соответствующий количеству энергии вырабатываемой организмом человека, или скорости метаболизма веществ, приведенной к площади поверхности тела человека. Величина *W* соответствует энергии, которую человек тратит на совершение механической работы (перемещение груза, ходьба и т. д.), или количеству эффективной механической энергии, также отнесенной к площади тела. Таким образом, разность *M – W* характеризует количество энергии, которое идет на поддержание температуры тела (теплового баланса), приведенное к площади поверхности тела. Далее, из величины *M – W* вычитают шесть величин, каждая из которых соответствует некоторому способу охлаждения тела (потеря тепла при дыхании, при теплообмене через кожу и т. д.). Результирующий знак итоговой разности говорит о сдвиге теплоощущения (теплового баланса) человека: положительный знак свидетельствует, что человеку тепло или жарко, отрицательный – прохладно или холодно. Оптимальным является сбалансированное состояние, когда вырабатываемая организмом энергия полностью расходуется на поддержание температуры тела; разность в этом случае равна нулю. Затем полученную величину энергетического баланса умножают на коэффициент $0,303 \exp^{-0,036M} + 0,028$, что приводит его в диапазон от –3 до +3, который можно интерпретировать по табл. 1, указанной в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005.

Таблица 1. Семибалльная шкала чувствительности к температуре
Table 1. Seven-point thermal sensation scale

Оценка в баллах. Score in points	Ощущения человека. Sensation assessment
+3	Жарко. Hot
+2	Тепло. Warm
+1	Немного тепло. Slightly warm
0	Нейтрально. Neutral
–1	Немного прохладно. Slightly cool
–2	Прохладно. Cool
–3	Холодно. Cold

Вышеуказанная неверная интерпретация формулы (1) в российской версии стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009 изменила ее физический смысл (ввиду потери коэффициента $0,303\exp^{-0,036M} + 0,028$), что привело к невозможности осуществления соответствующего математического расчета.

Верная интерпретация формулы (1), сохраняющая физический смысл, изложенный выше, имеет следующий аналитический вид (рис. 2).

$$PMW = [0,303\exp(-0,036M) + 0,028] \left[(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right]$$

Рис. 2. Изображение корректного аналитического вида формулы (1) стандарта ISO 7730:2005, предназначенного также и для ГОСТ Р ИСО 7730-2009

Fig. 2. Correct analytical form of formula (1) ISO 7730:2005 and for GOST R ISO 7730-2009

Далее необходимо отметить следующее. Для величин M и W стандартом вводится специальная единица измерения – метаболическая единица. При этом в оригинальном тексте ISO 7730:2005 и российском ГОСТ Р ИСО 7730-2009 наблюдаются неточности (табл. 1). Так, в п. 4.1 ГОСТ Р ИСО 7730-2009 указана величина $1 \text{ мет} = 58 \text{ Вт/м}^2$ (см. примечания в п. 4.1), в аналогичном разделе ISO 7730:2005 указана несколько иная величина $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$. При этом и в ГОСТ Р ИСО 7730-2009, и в ISO 7730:2005 в листингах компьютерной программы для вычисления PMV и PPD в строчках 170 и 180 указана величина метаболической единицы, равная $58,15 \text{ Вт/м}^2$ (табл. 1). Таким образом, в российском и международном стандартах указаны различные величины метаболической единицы, не совпадающие со значением, включенным в компьютерную программу для вычисления PMV и PPD . Эти незначительные отличия в значениях величины способны существенно затруднить работу со стандартом и привести к несовпадению результатов исчислений и контрольных результатов.

Таблица 2. Различная интерпретация значения метаболической единицы, приведенной в ISO 7730:2005 и ГОСТ Р ИСО 7730-2009

Table 2. Different interpretation of the meaning of the metabolic unit, given in ISO 7730:2005 and GOST R ISO 7730-2009

Значение метаболической единицы. Value of the metabolic unit	Разделы стандартов, содержащие значение. Standards clauses containing the value
1 метаболическая единица = 1 мет = 58 Вт/м ²	ГОСТ Р ИСО 7730-2009, п. 4.1. Определение (примечания)
1 metabolic unit = 1 met = 58,2 W/m ²	ISO 7730:2005, 4.1. Determination. NOTE
170 $M = \text{MET} \cdot 58,15$: metabolic rate in W/m ² 180 $W = \text{WME} \cdot 58,15$: external work in W/m ²	ISO 7730:2005. Annex D. Computer program for calculating PMV and PPD
170 $M = \text{MET} \cdot 58,15$: скорость обмена веществ, Вт/м 180 $W = \text{WME} \cdot 58,15$: наружная работа, Вт/м ²	ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Приложение D. Компьютерная программа для вычисления PMV и PPD

Кроме того, несмотря на то, что 58,0 и 58,2 являются округленными значениями величины 58,15, принимать первые величины было бы ошибкой ввиду следующего. Компьютерная программа по своему назначению призвана реализовывать алгоритм на основании формул и правил, изложенных в тексте стандарта, и не может являться источником новых формул и фактов. Такое несоответствие величин может привести к ошибкам и несовпадению результатов расчетов в зависимости от того, какую величину применит пользователь в вычислениях.

Относительно других формул раздела 4 необходимо отметить, что формулы (2) и (3) российской редакции стандарта полностью эквивалентны формулам оригинала. А вот формула (4) стандарта выглядит следующим образом в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 (рис. 3, а) и ISO 7730:2005 (рис. 3, б) (следует отметить, что коэффициент 0,645 "превратился" в 1,645):

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290l_{cl} & \text{если } l_{cl} \leq 0,078m^2 K / W, \\ 1,05 + \mathbf{1,645}l_{cl} & \text{если } l_{cl} > 0,078m^2 K / W. \end{cases} \quad a$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290l_{cl} & \text{for } l_{cl} \leq 0,078m^2 K / W, \\ 1,05 + \mathbf{0,645}l_{cl} & \text{for } l_{cl} > 0,078m^2 K / W. \end{cases} \quad б$$

Рис. 3. Изображение некорректной интерпретации формулы (4), приведенной в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 (а), и правильной – в ISO 7730:2005 (б)

Fig. 3. Incorrect interpretation of formula (4) in GOST R ISO 7730-2009 (a) and correct in ISO 7730:2005 (б)

Анализ компьютерной программы для стандартов ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005 и формирование предложений по ее совершенствованию

BASIC не является строго стандартизированным языком, являясь группой схожих языков. Программы, написанные для одного интерпретатора BASIC, сложно реализуются на иных интерпретаторах. В тексте же стандартов ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005 отсутствуют указания, в каком интерпретаторе следует запускать программу, однако выбор конкретного интерпретатора необходим для проверки ее работоспособности. Для работы с компьютерной программой, содержащейся в ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005, авторами был выбран онлайн-интерпретатор <https://yohan.es/swbasic>¹. Выбор данного интерпретатора обусловлен тем, что в нем поддерживается ручная нумерация строк (рудимент, который в современных программах BASIC отсутствует). Ручная нумерация строк позволила максимально приблизить текст программы к первоисточнику из приложения D стандартов ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005.

Анализ приведенной в стандартах ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005 компьютерной программы на языке BASIC показал наличие целого ряда ошибок, препятствующих работе этой программы. Например, в строке 200 используется символ, недопустимый для любых языков программирования, включая BASIC, что подробно будет обсуждено ниже, а в строке 140 количество открывающих скобок не совпадает с количеством закрывающих. Аналогичная ситуация наблюдается с многочисленными строками программы.

При этом использовать формулы, приведенные в обсужденном выше разделе 4, для вычисления показателя *PMV* без приложения D, содержащего программу для расчета значения *PMV* по этим формулам, достаточно сложно, так как часть вычислений, как оговаривается в стандарте, должна быть произведена "с помощью последовательных итераций", конкретный вид которых определяется в компьютерной программе и число которых сложно установить заблаговременно (до окончания вычислений). Далее необходимо провести идентификацию ошибок и восстановление компьютерной программы построчно, опираясь на формулы и указания основного текста стандарта.

В программе (прежде всего в строках 10–40) пропущен оператор комментария REM.

В строках 50–100, 120–130 пропущен символ, отделяющий строковое сообщение от имени переменной (в большинстве программ BASIC этот символ – запятая); можно предположить существование диалекта, в котором имя переменной не отделяется никакими символами.

В строке 110 вместо INPUT должен быть PRINT.

В строках 80–90 использован недопустимый символ градуса.

В строке 140 правее знака присваивания количество открывающих скобок не равно количеству закрывающих. Формула (исходя из ее физического смысла) предназначена для вычисления давления насыщенного водяного пара при температуре *T*. Эту стандартную формулу мы исправили в соответствии с ее известным физическим смыслом. Выбранный нами интерпретатор не поддерживает оператора декларирования функций DEF, поэтому перевод относительной влажности в давление пара выполнен непосредственно в строке 150. Также выбранный интерпретатор не поддерживает функцию EXP() (возведение числа *e* в степень), поэтому в строке 145 присвоено значение числа *e* соответствующей переменной, а для вычисления экспоненты в теле программы используется операция возведения в степень.

В строках 160–180 использован недопустимый символ "два в верхнем индексе".

В строке 200 использован недопустимый символ "меньше или равно". В переводе ошибочный символ заменен на допустимый в BASIC, но синтаксически неверный символ "и".

Строка 200 дает еще один показательный пример опечатки. Часть выражения в присваивании ветки THEN была отформатирована добавлением пробелов на уровне комментариев. Это говорит о том, что текст программы просто воспроизведен в стандарте без какого-либо осмысления, только переведены комментарии и вывод на экран командами PRINT и INPUT.

В выбранном онлайн-интерпретаторе невозможно добавить комментарий к строчке, содержащей команду ветвления, поэтому комментарий перенесен на строку 201.

В строках 240 и 500 перевода неточно воспроизведен смысл оригинальных комментариев. В комментариях к программе описывают, что именно делает тот или иной участок кода. Реже описывают, как участок кода работает. Кроме того, комментарии к программе никогда не пишутся в повелительном наклонении. В исправленной нами программе комментарии в строках 240 и 500 откорректированы, но в целом данное замечание не является обязательным к исполнению, так как комментарии не влияют на работу программы.

В строках 250–340 выполняются предварительные вычисления для заявленного в тексте стандарта итерационного расчета значений t_{cl} и h_c , а сам цикл выполняется в строках 350–410 программы.

¹ Simple Basic Interpreter. URL: <https://yohan.es/swbasic>.

В строке 250 вычисляется начальное значение величины t_{cl} (в кельвинах), что является первым важным фактом, свидетельствующим об "итерационных вычислениях", который не следует ни из указанных в стандарте формул (1)–(4), ни из текста основной части документа. Необходимо также обратить внимание, что в формулах (1)–(4) стандарта используется значение в градусах Цельсия, важно не запутаться между величинами в градусах Цельсия и тех же величинах в кельвинах.

В строках 260–300 выполняются предварительные вычисления вспомогательных величин P1–P5. В выражениях фигурируют части формулы (2) стандарта, в частности коэффициенты 3,96; 0,028 и произведение $I_{cl} \cdot f_{cl}$, которые встречаются только в формуле (2). В строке 380 эти коэффициенты используются в выражении для вычисления очередного приближения величины t_{cl} ; таким образом, можно сделать вывод о том, что в строках 260–300 в качестве основы использована формула (2). Однако строки 260–300, 380 содержат ошибки, и результат вычислений по выражению, указанному в строке 380, не соответствует тому, который должен получаться в результате вычислений по формуле (2). Причем количество накопленных ошибок в этих строках, вероятно, велико, поэтому мы не смогли восстановить логику разделения формулы (2) на коэффициенты. Авторы первоначальной программы разбили выражение на пять предварительно вычисляемых членов, предположительно, для ускорения расчетов, так как компьютеры во время ее разработки считали очень медленно и при программировании ранних версий BASIC использовались в том числе и такие приемы. Строки 260–300 мы удалили из программы, а для вычисления t_{cl} просто записали выражение, соответствующее формуле (2). В удаленных строках 260–290 фигурирует неверный перевод комментария "Calculation term": этот комментарий означает не "период вычисления", а "вычисление терма" (члена, вспомогательной величины).

Переменные X_F и X_N используются как очередные приближенные значения величины t_{cl} . Перед входом в цикл значения величин равны. В цикле вычисляется по формуле (2) новое значение X_N (строка 380), при этом в качестве текущего значения t_{cl} используется X_F , затем для следующей итерации значение X_F уточняется как среднее между текущим значением X_F и найденным значением X_N (строка 350). Вычисления повторяются до тех пор, пока разница между новым и предыдущим значениями t_{cl} (X_N и X_F) не будет превышать заданной точности. Если требуемая точность не будет достигнута за 150 итераций, цикл завершается, но значение PMV считается найденным. Это вторая часть недостающего "итерационного метода". Величины X_F и X_N содержат не температуру t_{cl} , а температуру, уменьшенную в сто раз (строка 310). В соответствии с этим написана формула в строке 360. Видимо, в формуле (2) этот факт также должен был учитываться, но формулу (2), как было указано выше, восстановить из исходной программы не удалось. Затем в строке 420 уменьшенное в сто раз значение восстанавливается до кельвинов и переводится в градусы Цельсия. Зачем авторы программы уменьшили значение переменных в сто раз в теле цикла, остается только предполагать. Мы не стали воспроизводить эту часть вычислений; в нашей программе итерационные значения t_{cl} соответствуют температуре в кельвинах. Соответствующим образом откорректированы строки 310, 360, 420; исправлена строка 340, потому что при увеличении величины в сто раз точность также нужно увеличить в сто раз, т. е. величину EPS взять меньшей на два порядка.

В строке 440 пропущен знак арифметической операции между символами "1" и "(" . По смыслу в этой строке вычисляется один из членов формулы (1), пропущенный символ – знак умножения.

В строке 480 вычисляется один из членов формулы (1), в соответствии с формулой пропущен множитель 10^{-8} , кроме того, количество открывающих скобок не равно количеству закрывающих скобок.

В тексте программы отсутствует строка 490. По смыслу в этой строке должен вычисляться последний (шестой) член формулы (1), который следует назвать HL6. В программе переменная HL6 нигде не инициализируется, однако используется в правой части оператора присваивания в строке 520.

В строках 570, 580, 590 перевода не были переведены выводимые на экран сообщения.

Выбранный нами интерпретатор не поддерживает форматированный вывод (директива USING), поэтому вывод в строках 580 и 590 неформатированный.

Строки 600, 610, 620 не оказывают влияния на алгоритм и служат только для повторного запуска программы. Мы их убрали из предлагаемого откорректированного варианта как несущественные.

Исправленный текст программы на языке BASIC для вычисления PMV и PPD приведен на рис. 4.

Проверка авторами восстановленной программы на контрольных значениях табл. D.1 (приложение D), показала совпадение значений PPD и PMV с контрольными показателями, предложенными стандартом, что подтверждает корректность выполненного восстановления программы. Встречающиеся расхождения значений в одну сотую определяются округлениями в процессе вычислений, которые в свою очередь зависят от порядка вычисления промежуточных величин [напомним, для формулы (2) этот порядок воспроизвести не удалось], и от используемого интерпретатора языка программирования. Пример расчета PMV и PPD с помощью откорректированной программы BASIC в <https://yohan.es/swbasic> приведен на рис. 5. При

необходимости произвести или проверить аналогичные вычисления следует скопировать программу из рис. 4, вставить в поле редактора <https://yohan.es/swbasic> (или аналогичного интерпретатора языка программирования) и ввести контрольные значения.

```
10 REM компьютерная программа (BASIC) для вычисления
20 REM прогнозируемой средней оценки (PMV) и прогнозируемого процента недовольных (PPD)
30 REM в соответствии с международным стандартом ISO 7730
40 CLS : PRINT "ВВОД ДАННЫХ" : REM ввод данных
50 INPUT " Одежда (кло) " : REM ввод данных
60 INPUT " Скорость обмена веществ (мет) " : REM ввод данных
70 INPUT " Наружная работа, обычно рядом с 0 (мет) " : REM ввод данных
80 INPUT " Температура воздуха (град.С) " : REM ввод данных
90 INPUT " Средняя температура излучения (град.С) " : REM ввод данных
100 INPUT " Средняя скорость движения воздуха (м/с) " : REM ввод данных
110 PRINT " ВВЕДИТЕ ИЛИ ВЛАЖНОСТЬ ИЛИ ДАВЛЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА, НО НЕ ОБА"
120 INPUT " Относительная влажность (%)" : REM ввод данных
130 INPUT " Давление водяного пара (Па) " : REM ввод данных
140 REM давление насыщенного водяного пара при температуре Т в кПа = EXP(16.6536-4030.183/(T+235))
145 e=2.718281828459045
150 IF PA=0 THEN PA=RH*10*(e^(16.6536-4030.183/(TA+235))) : REM давление водяного пара, Па
160 ICL=.155*CLO : REM теплоизоляция одежды, кв.м*К/Вт
170 M=MET*58.15 : REM скорость обмена веществ, Вт/кв.м
180 W=WME*58.15 : REM наружная работа, Вт/кв. м
190 MW=M-W : REM внутреннее производство тепла в теле человека
200 IF ICL<=0.078 THEN FCL=1+1.29*ICL ELSE FCL=1.05+0.645*ICL
201 REM ICL - множитель площади одежды
210 HCF=12.1*SQR(VEL) : REM коэффициент теплообмена при принудительной кон-
: REM векции
220 TAA=TA+273 : REM температура воздуха, К
230 TRA=TR+273 : REM средняя температура излучения, К
240 REM -----ВЫЧИСЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОДЕЖДЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ ПРИБЛИЖЕНИЯМИ-----
250 TCLA=TAA+(35.5-TRA)/(3.5*ICL+.1) : REM первое предположение о температуре поверхности
: REM одежды
310 XN=TCLA
320 XF=XN
330 N=0 : REM номер итерации
340 EPS=.0000015 : REM критерий завершения цикла поиска приближенного
: REM значения
350 XF=(XF+XN)/2
360 HCN=2.38*(ABS(XF-TAA)^.25) : REM коэффициент теплообмена при естественной конвек-
: REM ции
370 IF HCF>HCN THEN HC=HCF ELSE HC = HCN
380 P1=ICL*FCL*((3.96*(10^-8)*((XF^4)-(TRA^4)))+(HC*(XF-TAA))
381 XN=35.7-(.028*MW)-P1+273
390 N=N+1
400 IF N>150 THEN GOTO 550
410 IF ABS(XN-XF)>EPS THEN GOTO 350
420 TCL=XN-273 : REM температура поверхности одежды
430 REM -----ВЫЧИСЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПОТЕРИ ТЕПЛА-----
440 HL1=3.05*.001*(5733-6.99*MW-PA)
450 IF MW>58.15 THEN HL2=.42*(MW-58.15) ELSE HL2=0!
451 : REM потеря тепла за счет потения (комфортного)
460 HL3=1.7*.00001*M*(5867-PA) : REM скрытая потеря тепла через дыхание
470 HL4=.0014*M*(34-TA) : REM потеря тепла из-за сухого дыхания
480 HL5=3.96*(10^-8)*FCL*(XN^4-TRA^4) : REM потеря тепла из-за излучения
490 HL6 = FCL*HC*(TCL-TA)
500 REM -----ВЫЧИСЛЕНИЕ PMV И PPD-----
510 TS=.303*(e^(-.036*M))+.028 : REM коэффициент переноса температурной чувствительно-
: REM сти
520 PMV=TS*(MW-HL1-HL2-HL3-HL4-HL5-HL6) : REM прогнозируемая средняя оценка
530 PPD=100-95*(e^(-.03353*(PMV^4)-.2179*(PMV^2))) : REM прогнозируемый процент недовольных
540 GOTO 570
550 PMV=999999!
560 PPD=100
570 PRINT : PRINT "РЕЗУЛЬТАТ" : REM вывод результата
580 PRINT "прогнозируемая средняя оценка (PMV):", PMV
590 PRINT "прогнозируемый процент недовольных (PPD):", PPD
```

Рис. 4. Исправленный текст компьютерной программы на языке BASIC для вычисления *PMV* и *PPD*
Fig. 4. Computer program in BASIC for calculating *PMV* and *PPD*

Execution result

ВВОД ДАННЫХ

Одежда	(кло)	1
Скорость обмена веществ	(мет)	1.2
Наружная работа, обычно рядом с 0	(мет)	0
Температура воздуха	(град.С)	19
Средняя температура излучения	(град.С)	18
Средняя скорость движения воздуха	(м/с)	0.1
ВВЕДИТЕ ИЛИ ВЛАЖНОСТЬ ИЛИ ДАВЛЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА, НО НЕ ОБА		
Относительная влажность	(%)	40
Давление водяного пара	(Па)	0

РЕЗУЛЬТАТ

прогнозируемая средняя оценка (PMV): -0.698278206077137
 прогнозируемый процент недовольных (PPD): 15.253973579146049

Рис. 5. Пример результата расчетов откорректированной программы BASIC для вычисления *PMV* и *PPD* в интерпретаторе <https://yohan.es/swbasic>
 Fig. 5. Example of the computing result of the corrected BASIC program for calculating *PMV* and *PPD* in the interpreter <https://yohan.es/swbasic>

Завершая анализ приложения D, необходимо отметить, что таблица контрольных результатов (табл. D.1 приложения D) также содержит неточность в значении величин *PMV*, *PPD* в строке 7 (табл. 3).

Таблица 3. Извлечение из табл. D.1, приведенной в стандартах ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005 (примеры неверных результатов вычисления *PMV*, *PPD*)
 Table 3. Extract from Table D.1 in GOST R ISO 7730-2009 and ISO 7730:2005 standards (examples of incorrect *PMV*, *PPD* results)

% п/п. Run no	Температура воздуха, °С. Air temperature, °C	Средняя температура излучения, °С. Mean radiant temperature, °C	Скорость движения воздуха, м/с. Air velocity, m/s	RH, %	Скорость обмена веществ, мет. Metabolic rate, met	Изоляция одежды, кло. Clothing insulation, clo	<i>PMV</i>	<i>PPD</i>
7	23,5	23,5	0,10	40	1,2	1,0	0,50	10

Контрольные результаты строки 7 можно проверить: 1) с помощью откорректированной компьютерной программы; 2) посредством подстановки контрольных значений, предлагаемых стандартом, в формулы (1)–(4) и последующих вычислений. Проверка с помощью компьютерной программы показала несоответствие полученных значений *PMV*, *PPD* контрольным, поэтому были проведены соответствующие проверочные вычисления с использованием формул (1)–(4) стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Полученные в ходе расчетов и с помощью откорректированной компьютерной программы значения величин совпали и составили 0,36 и 8 для *PMV* и *PPD* соответственно. Таким образом, именно эти значения должны фигурировать в строке 7 табл. D.1 обсуждаемых стандартов.

Заключение

В статье проведен анализ неточностей и несоответствий российского национального стандарта ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и предложены их корректировки в разделах 4 и 5, устанавливающих метод исчисления прогнозируемой средней оценки (*PMV*, Predicted Mean Vote) и прогнозируемого процента недовольных температурной средой (*PPD*, Predicted Percentage of Dissatisfied), а также в приложении D, содержащем программу вычисления показателя *PMV* на языке BASIC. В настоящее время национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 7730-2009 не может использоваться ввиду наличия ряда неточностей и несоответствий.

Авторами предложены корректировки формул и несоответствий указанных стандартов. Неточности и несоответствия в текстах стандартов и предлагаемые корректировки приведены в сводной табл. 4.

Таблица 4. Сводная таблица неточностей и несоответствий
 в текстах стандартов ГОСТ Р ИСО 7730-2009 и ISO 7730:2005
 Table 4. Summary table of inaccuracies and inconsistencies
 in the texts of GOST R ISO 7730-2009 and ISO 7730:2005 standards

Локализация несоответствия в стандарте. Localization of the inconsistencies in the standard	Корректный вид. Correct option
ГОСТ Р ИСО 7730-2009 (раздел 4, формула (1)) GOST R, ISO 7730-2009 (Clause 4, formula (1))	$PMW = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \left((M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right)$
ГОСТ Р ИСО 7730-2009 (раздел 4, формула (4)) GOST R ISO 7730-2009 (Clause 4, formula (4))	$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290l_{cl} & \text{если } l_{cl} \leq 0,078m^2K/W, \\ 1,05 + 0,645l_{cl} & \text{если } l_{cl} > 0,078m^2K/W \end{cases}$
ГОСТ Р ИСО 7730-2009, ISO 7730:2005 (раздел 4, примечание к формулам (1)–(4)) GOST R ISO 7730-2009, ISO 7730:2005 (Clause 4, NOTE to formulas (1)–(4))	1 метаболическая единица = 1 мет = 58,15 Вт/м ² , 1 metabolic unit = 1 met = 58,15 W/m ²
ГОСТ Р ИСО 7730-2009, ISO 7730:2005 (приложение D, табл. D.1, строка 7) GOST R ISO 7730-2009 and ISO 7730:2005 (Annex D, Table D.1, Run no. 7 in 5)	$PMV = 0,36, PPD = 8$
ГОСТ Р ИСО 7730-2009, ISO 7730:2005 (приложение D, компьютерная программа) GOST R ISO 7730-2009 and ISO 7730:2005 (Annex D, Computer program for calculating <i>PMV</i> and <i>PPD</i>)	См. рис. 4. See Fig. 4

Представленный анализ, приведенные в соответствие формулы и текст компьютерной программы стандарта предназначены для научных работников и специалистов, использующих российский стандарт ГОСТ Р ИСО 7730-2009 при проектировании и строительстве зданий, отвечающих требованиям международных стандартов в области энергоэффективности и качества внутренней среды.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Гусейнова М. В. Исследование возможности групповой оценки теплового комфорта по теории Фангера применительно ко множеству лиц с разными трудовыми показателями // Экология человека. 2019. Т. 26, № 4. С. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-4-60-64>. EDN: ZDDDSP.
- Дударев А. А., Сотников А. Г. Микроклиматический комфорт и воздухораспределение: несколько шагов навстречу // Инженерные системы. АВОК Северо-запад. 2013. № 1. С. 16–23.
- Лексин А. Г., Евлампиева М. Н., Минеева Н. И., Тимошенкова Е. В. Применение показателей PMV и PPD для прогнозирования оценки пассажирами метрополитена степени теплового комфорта или дискомфорта в различных температурных условиях // Гигиена и санитария. 2014. Т. 93, № 3. С. 45–48. EDN: SJSXQZ.
- Пророкова М. В. Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04. Иваново, 2017. 202 с.
- Спиридонов А. В., Шубин И. Л., Малявина Е. Г., Самарин О. Д. Мониторинг и анализ нормативных документов в строительстве в области внутреннего климата помещений и защиты от вредных воздействий. Часть 2. Температурно-влажностный режим и качество воздуха в помещениях // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2016. № 5(981). С. 20–26. EDN: VUZWGP.
- Усмонов Ш. З. О необходимости определения оптимальных параметров температуры помещений в СНиП РТ 23-02-2009 "Тепловая защита зданий" по индексам теплового комфорта PMV и PPD // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 1. С. 54–57. EDN: TGOSDT.
- Al Horr Y., Arif M., Kafatygiotou M., Mazroei A. [et al.]. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature // International Journal of Sustainable Built Environment. 2016a. Vol. 5, Iss. 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>.

- Al Horr Y., Arif M., Kaushik A., Mazroei A. [et al.]. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature // *Building and Environment*. 2016b. Vol. 105, P. 369–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>.
- Cox C. HOPE: Health optimisation protocol for energy-efficient buildings: Pre-normative and socio-economic research to create healthy and energy-efficient buildings. Netherlands : TNO : Delft, 2005. 16 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.33658.80328.
- Fanger P. O. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen : Danish Technical Press, 1970.
- Fanger P. O. Thermal Comfort. McGraw-Hill. New York, 1973.
- Fisk W. J. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency // *Annual Review of Energy and the Environment*. 2000. Vol. 25, Iss. 1. P. 537–566. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.537>.
- Frontczak M., Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments // *Building and Environment*. 2011. Vol. 46, Iss. 4. P. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>.
- Jia L.-R., Han J., Chen X., Li Q.-Y. [et al.]. Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review // *Buildings*. 2021. Vol. 11, Iss. 12. Article number: 591. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11120591>.
- Khan N., Su Y., Riffa S. B. A review on wind driven ventilation techniques // *Energy and Buildings*. 2008. Vol. 40, Iss. 8. P. 1586–1604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>.
- Mendell M. J., Heath G. A. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature // *Indoor Air*. 2005. Vol. 15, Iss. 1. P. 27–52. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>.
- Oldewurtel F., Sturzenegger D., Morari M. Importance of occupancy information for building climate control // *Applied Energy*. 2013. Vol. 101. P. 521–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014>.
- Olesen B.W. International standards for the indoor environment // *Indoor Air*. 2004. Vol. 14, Iss. S 7. P. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00268.x>.
- Paone A., Bacher J.-P. The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art // *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 4. Article number: 953. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040953>.
- Peng C., Yan D., Guo S., Hu S. [et al.]. Building energy use in China: Ceiling and scenario // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 102. P. 307–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.049>.
- Šujanová P., Rychtáriková M., Mayor T. S., Hyder A. A healthy, energy-efficient and comfortable indoor environment, A review // *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 8. Article number: 1414. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081414>.
- Wargockia P., Porras-Salazara J. A., Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school // *Building and Environment*. 2019. Vol. 157. P. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>.
- Wyon D. P. Indoor environmental effects on productivity // *Proc. IAQ 96. Paths to Better Building Environments*. Atlanta: ASHRAE, 1996. P. 5–15.

References

- Huseynova, M. V. 2019. Feasibility study of group estimation of thermal comfort using Fanger's theory applied to people with different working capabilities. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 26(4), pp. 60–64. DOI: <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-4-60-64>. EDN: ZDDDSP. (In Russ.)
- Dudarev, A. A., Sotnikov, A. G. 2013. Microclimatic comfort and air distribution: A few steps towards. *Inzhenernye sistemy. AVOK Severo-zapad*, 1, pp. 16–23. (In Russ.)
- Leksin, A. G., Evlampieva, M. N., Mineeva, N. I., Timoshenkova, E. V. 2014. The use of PMV and PPD indicators to predict the assessment by metro passengers of the degree of thermal comfort or discomfort in various temperature conditions. *Gigiena i sanitariya*, 93, pp. 45–48. EDN: SJSXQZ. (In Russ.)
- Prorokova, M. V. 2017. Improving the efficiency of energy-saving measures taking into account the comfort of the microclimate. Ph.D. Thesis. Ivanovo. (In Russ.)
- Spiridonov, A. V., Shubin, I. L., Malyavina, E. G., Samarin, O. D. 2016. Monitoring and analysis of regulatory documents in construction in the field of indoor climate and protection from harmful influences. Part 2. Temperature and humidity conditions and indoor air quality. *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*, 5(981), pp. 20–26. EDN: VUZWGP. (In Russ.)
- Usmonov, S. Z. 2015. On the need to determine optimal parameters for room temperature in building regulations RT 23-02-2009 "Thermal protection of buildings" according to indices of thermal comfort PMV and PPD. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 1, pp. 54–57. EDN: TGOSDT. (In Russ.)

- Al Horr, Y., Arif, M., Katafygiotou, M., Mazroei, A. et al. 2016a. Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.03.006>.
- Al Horr, Y., Arif, M., Kaushik, A., Mazroei, A. et al. 2016b. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building and Environment*, 105, pp. 369–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.001>.
- Cox, C. 2005. HOPE: Health optimisation protocol for energy-efficient buildings: Pre-normative and socio-economic research to create healthy and energy-efficient buildings. Delft. DOI: 10.13140/RG.2.2.33658.80328.
- Fanger, P. O. 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen.
- Fanger, P. O. 1973. Thermal Comfort. New York.
- Fisk, W. J. 2000. Health and productivity gains from better indoor environments and their relationship with building energy efficiency. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(1), pp. 537–566. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.537>.
- Frontczak, M., Wargocki, P. 2011. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46(4), pp. 922–937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>.
- Jia, L.-R., Han, J., Chen, X., Li, Q.-Y. et al. 2021. Interaction between thermal comfort, indoor air quality and ventilation energy consumption of educational buildings: A comprehensive review. *Buildings*, 11(12). Article number: 591. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11120591>.
- Khan, N., Su, Y., Riffa, S. B. 2008. A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, 40(8), pp. 1586–1604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.015>.
- Mendell, M. J., Heath, G. A. 2005. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15(1), pp. 27–52. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x>.
- Oldewurtel, F., Sturzenegger, D., Morari, M. 2013. Importance of occupancy information for building climate control. *Applied Energy*, 101, pp. 521–532. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.014>.
- Olesen, B. W. 2004. International standards for the indoor environment. *Indoor Air*, 14(S7), pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00268.x>.
- Paone, A., Bacher, J.-P. 2018. The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art. *Energies*, 11(4). Article number: 953. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11040953>.
- Peng, C., Yan, D., Guo, S., Hu, S. et al. 2015. Building energy use in China: Ceiling and scenario. *Energy and Buildings*, 102, pp. 307–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.049>.
- Šujanová, P., Rychtáriková, M., Mayor, T. S., Hyder, A. 2019. A healthy, energy-efficient and comfortable indoor environment, A review. *Energies*, 12(8). Article number: 1414. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12081414>.
- Wargockia, P., Porras-Salazara, J. A., Contreras-Espinoza, S. 2019. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157, pp. 197–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>.
- Wyon, D. P. 1996. Indoor environmental effects on productivity. *Proc. IAQ 96. Paths to Better Building Environments*. Atlanta, pp. 5–15.

Сведения об авторах

Васильева Жанна Вячеславовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: vasilevazhv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Zhanna V. Vasileva – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: vasilevazhv@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2254-1152>

Васильев Анатолий Геннадьевич – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, магистрант; e-mail: a.g.vasiliev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5337-2009>

Anatoliy G. Vasilev – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Undergraduate Student; e-mail: a.g.vasiliev@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5337-2009>

Кирдишова Елена Андреевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, мл. науч. сотрудник; e-mail: kuchugura@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9049-4814>

Elena A. Kirdishova – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Junior Scientific Researcher; e-mail: kuchugura@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9049-4814>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Нормативные документы, использованные в статье

EN. Directive 2010/31/EU	Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. O. J. Eur. Union. 2010; 153:13–35. URL : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&rid=1 .
ГОСТ 30494-2011	Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095053 .
ГОСТ Р 54964-2012	Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095015 .
СП 60.13330.2020	Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха СНиП 41-01-2003 (с Поправкой). URL: https://docs.cntd.ru/document/573697256 .
ГОСТ 12.1.005-88	Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением № 1). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200003608 .
СанПиН 1.2.3685-21	Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 .
ISO. EN ISO 7730: 2005	Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, International Standardisation Organisation, Geneva, 2005.
ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55	Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2017.
CEN. EN 15251:2007	Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
ГОСТ Р ИСО 7730-2009	Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта (утв. и введен в действие приказом Ростехрегулирования от 07.12.2009 № 573-ст). URL: https://docs.cntd.ru/document/1200076557 ; а также доступ из справ.-правовых систем "Гарант" и "КонсультантПлюс".
ISO 7730:2005	Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. URL : https://ntm.ru/UserFiles/File/document/Microklimat/Norm/ISO_7730_2005.pdf ; https://www.iso.org/standard/39155.html .

УДК [561:582.38]:551.735.15(470.61)

Новые находки остатков среднекаменноугольных растений в Ростовской области

С. В. Наугольных*, В. В. Линкевич

*Геологический институт Российской академии наук, г. Москва, Россия;
e-mail: naugolnykh@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6506-7319>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
09.01.2023;

получена
после доработки
30.01.2023;

принята к публикации
02.02.2023

Ключевые слова:

карбон,
плауновидные,
птеридоспермы,
Еврамерика,
антракофильные
сообщества

Для цитирования

Реферат

Статья посвящена обзору ископаемых остатков высших растений, собранных в среднекаменноугольных отложениях в двух местонахождениях, расположенных в Ростовской области. Коллекция включает остатки древовидных плауновидных *Lepidodendron* cf. *aculeatum* Sternberg, *Sigillaria scutellata* Brongniart, членистостебельных *Calamites* spp. и тригонокарповых (медуллезовых) птеридоспермов *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goeppert, *A. decurrens* (Artis) Zeiller, *Neuropteris heterophylla* Brongniart, *Mixoneura* cf. *beraliana* Zalesky. Таксономический состав изученного флористического комплекса указывает на то, что исходная гидрофильная/антракофильная растительность произрастала в условиях влажного и теплого (гумидного) климата. Представительность и музейная привлекательность собранных образцов делает возможным их эффективное использование в образовательных проектах, а также для дидактических целей и музейных выставок.

Наугольных С. В. и др. Новые находки остатков среднекаменноугольных растений в Ростовской области. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 57–68. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-57-68.

New data on Carboniferous plants of the Rostov-on-Don Region (Russia)

Serge V. Naugolnykh*, Valery V. Linkevich

*Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: naugolnykh@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6506-7319>

Article info

Received
09.01.2023;

received
in revised
30.01.2023;

accepted
02.02.2023

Key words:

Carboniferous,
lycopodiopsids
[lycopods],
pteridosperms,
Euramerica,
anthracophilous
communities

For citation

Abstract

The paper contains a review of the higher plant fossils collected from the Middle Carboniferous deposits of two localities disposed in the Rostov-on-Don Region. The collection includes fossils of arborescent lycopodiopsids *Lepidodendron* cf. *aculeatum* Sternberg, *Sigillaria scutellata* Brongniart, sphenophytes *Calamites* spp. and trigonocarpalean (medullosalean) pteridosperms *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goeppert, *A. decurrens* (Artis) Zeiller, *Neuropteris heterophylla* Brongniart, *Mixoneura* cf. *beraliana* Zalesky. The taxonomic composition of the studied floristic assemblage indicates that the original hydrophilic/anthracophilic vegetation grew in conditions of wet and warm (humid) climate. The representativeness and museum attractiveness of the collected specimens make it possible to use them effectively in educational projects, as well as for didactic purposes and museum exhibitions.

Naugolnykh, S. V. et al. 2023. New data on Carboniferous plants of the Rostov-on-Don Region (Russia). *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 57–68. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-57-68.

Введение

Изучение ископаемых остатков растений каменноугольного возраста, характеризующих низкоширотную растительность Еврамерийского типа (*Chaloner et al., 1973; Meyen, 1982; 1987*) является важной задачей палеоботаники, и не только чисто академической задачей, но и задачей, имеющей большое практическое, прикладное значение, которое определяется необходимостью дальнейшей разработки стратиграфии угленосных отложений (*Бетехтина и др., 1978; Фисуненко и др., 1981; Ошуркова, 1980; 1987; Егоров, 1992*).

Каменноугольным растениям Ростовской области, близлежащих районов Предкавказья, Северного Кавказа и Восточного Донбасса посвящена обширная литература (*Залесский, 1934; Новик, 1952; 1978* и др.). В ходе дальнейших исследований этого региона появляются новые данные, которые позволяют расширить наши представления о каменноугольных флорах Еврамерийской фитогеографической области.

Настоящая статья посвящена характеристике растительных остатков, собранных в двух местонахождениях, расположенных в Ростовской области; особое внимание уделено палеоэкологической интерпретации изученных местонахождений.

Материал и методы

В мае 2019 г. группа краеведов и палеонтологов-любителей из г. Ростова-на-Дону передала в дар Андреапольскому краеведческому музею им. Э. Э. Шимкевича (г. Андреаполь, Тверская область) несколько образцов углистых аргиллитов и алевролитов с растительными остатками среднекаменноугольного возраста. Образцы были собраны на терриконе шахты Мирная у г. Шахты (пос. Новокадамово) Ростовской области и происходят из белокалитвенской свиты среднего карбона (башкирский ярус). Один из авторов статьи (Линкевич В. В.) получил приглашение от ростовских краеведов принять участие в сборе растительных остатков каменноугольного возраста в этом районе.

Во второй половине августа 2020 г. в ходе экспедиционной поездки в Ростовскую область и Карачаево-Черкесскую Республику в сопровождении краеведа из г. Ростова-на-Дону Албула А. В. одним из авторов этой статьи Линкевичем В. В. были посещены два террикона угольных шахт Мирная и Наклонная, расположенные в окрестностях поселков Качкан и Новокадамово (Артемовское сельское поселение, Октябрьский район, Ростовская область; рис. 1). Обоим местонахождениям даны условные названия Качкан и Новокадамово соответственно.

В ходе работы на терриконах участниками экскурсии визуально осмотрены фрагменты пород с целью обнаружения палеонтологических образцов. Одновременно производилась фотофиксация терриконов и самих найденных образцов в полевых условиях для использования в качестве иллюстративного материала на целевых тематических выставках.

В итоге было собрано около 80 образцов с растительными остатками. Подсчет точного количества найденных экземпляров очень сложен, поскольку на одной поверхности напластования часто находятся несколько десятков фрагментов листьев, коры и семян. Таким образом, общее количество найденных растительных остатков приближается к тысяче.

После аккуратной и осторожной промывки и просушки ряд образцов распался по естественным трещинам, в настоящее время подлежит склейке и находится в реставрации. В коллекции преобладают остатки плауновидных и птеридоспермов (рис. 2–5), присутствуют остатки членистостебельных.

Наибольшее количество хорошо сохранившихся экземпляров, определение которых не вызывает сомнений, относится к роду *Alethopteris* Sternberg (40 экземпляров); из них два экземпляра определены как *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goepfert, остальные отнесены к виду *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller.

Далее в таксономическом отношении собранные образцы распределяются по родам следующим образом: *Neuropteris* Brongniart (20 экземпляров фрагментов вай), *Lepidodendron* Sternberg (17 экземпляров фрагментов коры и облиственных побегов), *Sigillaria* Brongniart (в коллекцию было отобрано только 8 представительных экземпляров коры, но остатки сигиллярий в изученных местонахождениях встречаются довольно часто), *Calamites* Brongniart (5 экземпляров слепков внутренней полости и отпечатков побегов), *Cyclopteris* Brongniart (1 циклоптероидный лист), *Odontopteris* Brongniart (1 фрагмент вай), а также апикальный фрагмент пера последнего порядка, отнесенный к роду *Mixoneura* Weiss.

В настоящее время весь собранный материал подготовлен к рассмотрению фондовой экспертно-закупочной комиссией для включения его в основной и научно-вспомогательный фонды Андреапольского краеведческого музея и дальнейшего использования во временных тематических выставках.

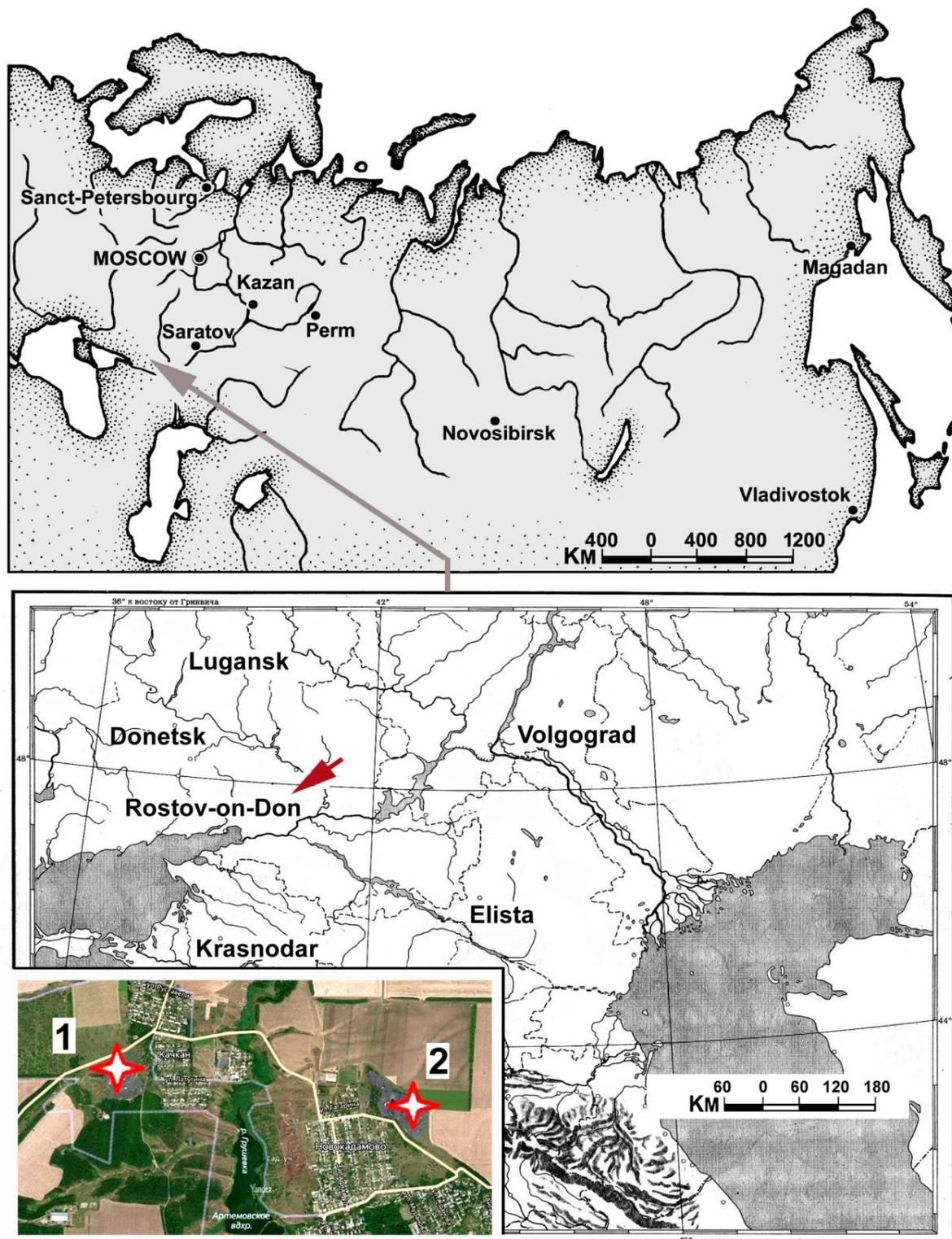


Рис. 1. Географическое расположение изученных местонахождений: 1 – местонахождение Качкан (террикон шахты Наклонная, п. Качкан, Артемовское сельское поселение, Октябрьский район, Ростовская область); 2 – местонахождение Новокадамово (террикон шахты Мирная, п. Новокадамово, Артемовское сельское поселение, Октябрьский район, Ростовская область).

Расстояние между терриконами 1 и 2 по прямой равно 2,4 км

Fig. 1. Geographical position of the localities studied: 1 – the locality Kachkan (waste heap of the Naklonnaya Mine, Kachkan village, Artemovsk settlement, Oktjabrsky District, Rostov-on-Don region); the locality Novokadamovo (waste heap of the Mirnaya Mine, Novokadamovo village, Artemovsk settlement; Oktjabrsky District, Rostov-on-Don region). The distance between waste heaps 1 and 2 in straight direction is 2.4 km

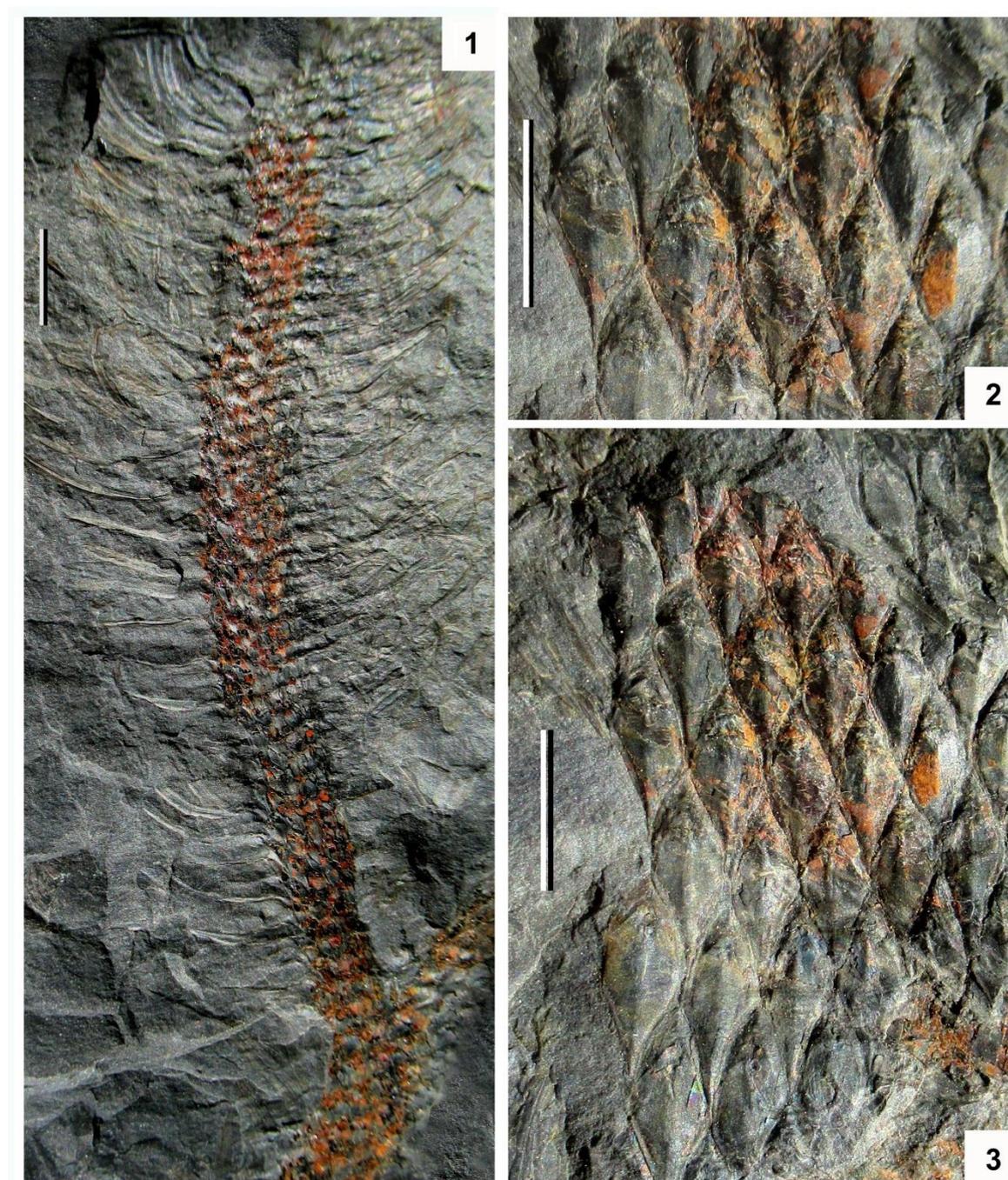


Рис. 2. Ископаемые растения из местонахождения Качкан: фиг. 1 – *Lepidodendron* sp., облиственный побег; фиг. 2, 3 – *Lepidodendron* cf. *aculeatum* Sternberg. Местонахождение: Качкан (фиг. 1–3; см. рис. 1).

Коллектор Линкевич В. В. Дата сбора: 28.08.2020 г. Длина масштабной линейки 1 см

Fig. 2. Fossil plants from the Kachkan locality: 1 – *Lepidodendron* sp., leafy shoot;

2, 3 – *Lepidodendron* cf. *aculeatum* Sternberg. Locality: Kachkan (1–3; see Fig. 1).

Collector V. V. Linkevich. The date of collecting: August 28, 2020. Scale bar is 1 cm

Результаты и обсуждение

Палеоботанические наблюдения

Как уже было отмечено, большую часть собранной коллекции составляют фрагменты вай медуллезового (тригонокарпового) птеридосперма *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller (рис. 4, фиг. 1–3; рис. 5, фиг. 1) и близкого ему вида *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goerpert (рис. 5, фиг. 3; сходный экземпляр изображен в работе Новик, 1954, табл. XIX, фиг. 5).

Экземпляры, практически идентичные находящимся в нашей коллекции листьям *Alethopteris decurrens*, неоднократно изображались в палеоботанической литературе [см., например, Залесский, 1907, табл. XVIII,

фиг. 4; Залесский и др., 1938, с. 45, 46, рис. 58 (следует отметить, что экземпляры, изображенные М. Д. Залесским и Е. Ф. Чирковой, несколько отличаются от типичных *Alethopteris decurrens* более крупными размерами, а также более широкими и короткими перышками, однако в целом эти листья вполне вписываются в морфологическую норму данного вида в качестве крайнего члена ряда изменчивости листьев *Alethopteris decurrens*); Новик, 1952, табл. LVII, фиг. 5, 6; Новик, 1954, табл. XIX, фиг. 4; Remy et al., 1959, S. 163, Abb. 138].

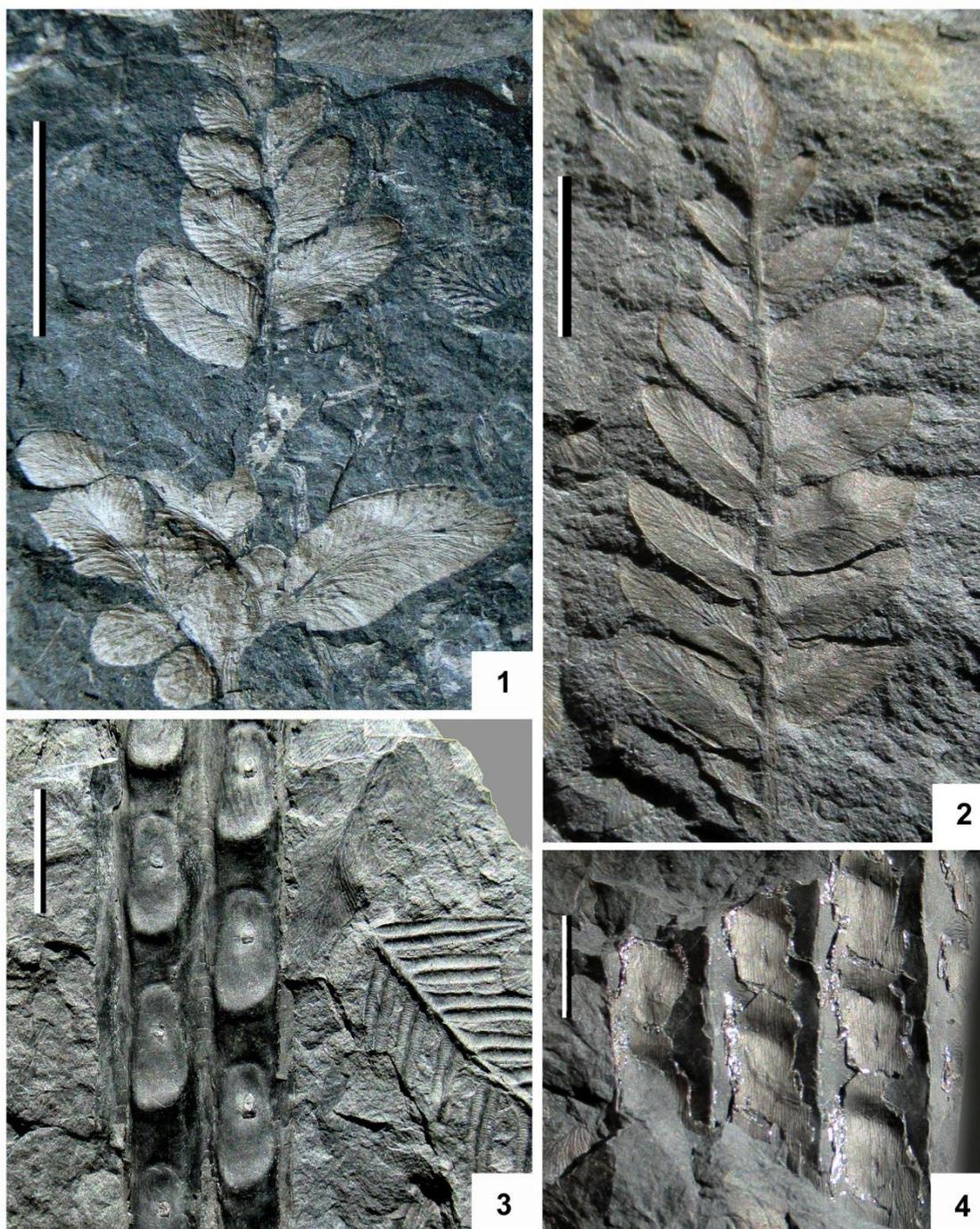


Рис. 3. Ископаемые растения из местонахождения Качкан: фиг. 1 – *Neuropteris heterophylla* Brongniart; фиг. 2 – *Mixoneura cf. beraliana* Zalesky; фиг. 3, 4 – *Sigillaria scutellata* Brongniart.
Местонахождение: Качкан (фиг. 1–4; см. рис. 1). Коллектор Линкевич В. В.

Дата сбора: 28.08.2020 г. Длина масштабной линейки 1 см

Fig. 3. Fossil plants from the Kachkan locality: 1 – *Neuropteris heterophylla* Brongniart; 2 – *Mixoneura cf. beraliana* Zalesky; 3, 4 – *Sigillaria scutellata* Brongniart.

Locality: Kachkan (1–4; see Fig. 1). Collector V. V. Linkevich.

The date of collecting: August 28, 2020. Scale bar is 1 cm

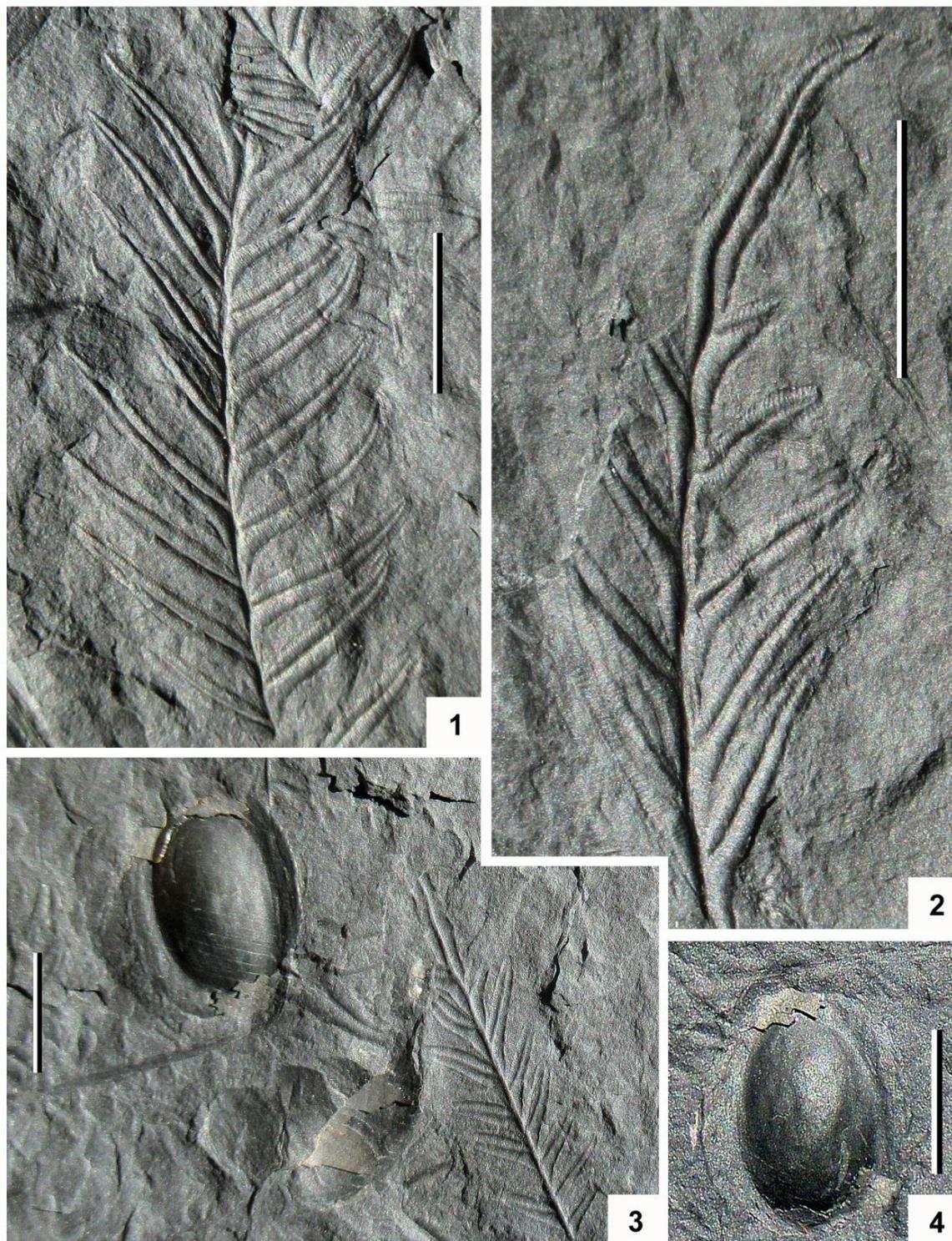


Рис. 4. Листья медуллезового (тригонокарпового) птеридосперма *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller и его предполагаемый семязачаток: фиг. 1, 2 – фрагменты перьев последнего порядка; фиг. 3, 4 – семязачаток, найденный рядом с листьями *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller.

Местонахождение: Качкан (фиг. 1–4; см. рис. 1). Коллектор Линкевич В. В.

Дата сбора: 28.08.2020 г. Длина масштабной линейки 1 см

Fig. 4. Leaves of the medullosalean (trigonocarpalean) pteridosperm *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller, and the ovule belonging to the same parent plant: 1, 2 – fragments of last order pinnae, 3, 4 – the ovule found together with the leaves *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller. Locality:

Kachkan (1–4; see Fig. 1). Collector V. V. Linkevich.

The date of collecting: August 28, 2020. Scale bar is 1 cm

Следует отметить постоянное сонахождение листьев *Alethopteris decurrens* и семян тригонокарпоидного облика (рис. 4, фиг. 3, 4). Высока вероятность того, что это органы одного и того же материнского растения. Если данное предположение верно, то сонахождение семян и листьев *Alethopteris decurrens* указывает на барохорность материнских растений, которым эти органы принадлежали. Сходная ассоциативная связь листьев алетоптерид с тригонокарпоидными семенами *Pachytesta* spp. отмечалась для ряда местонахождений пермокарбонического возраста в Центральной Европе (*Němejc, 1936*).

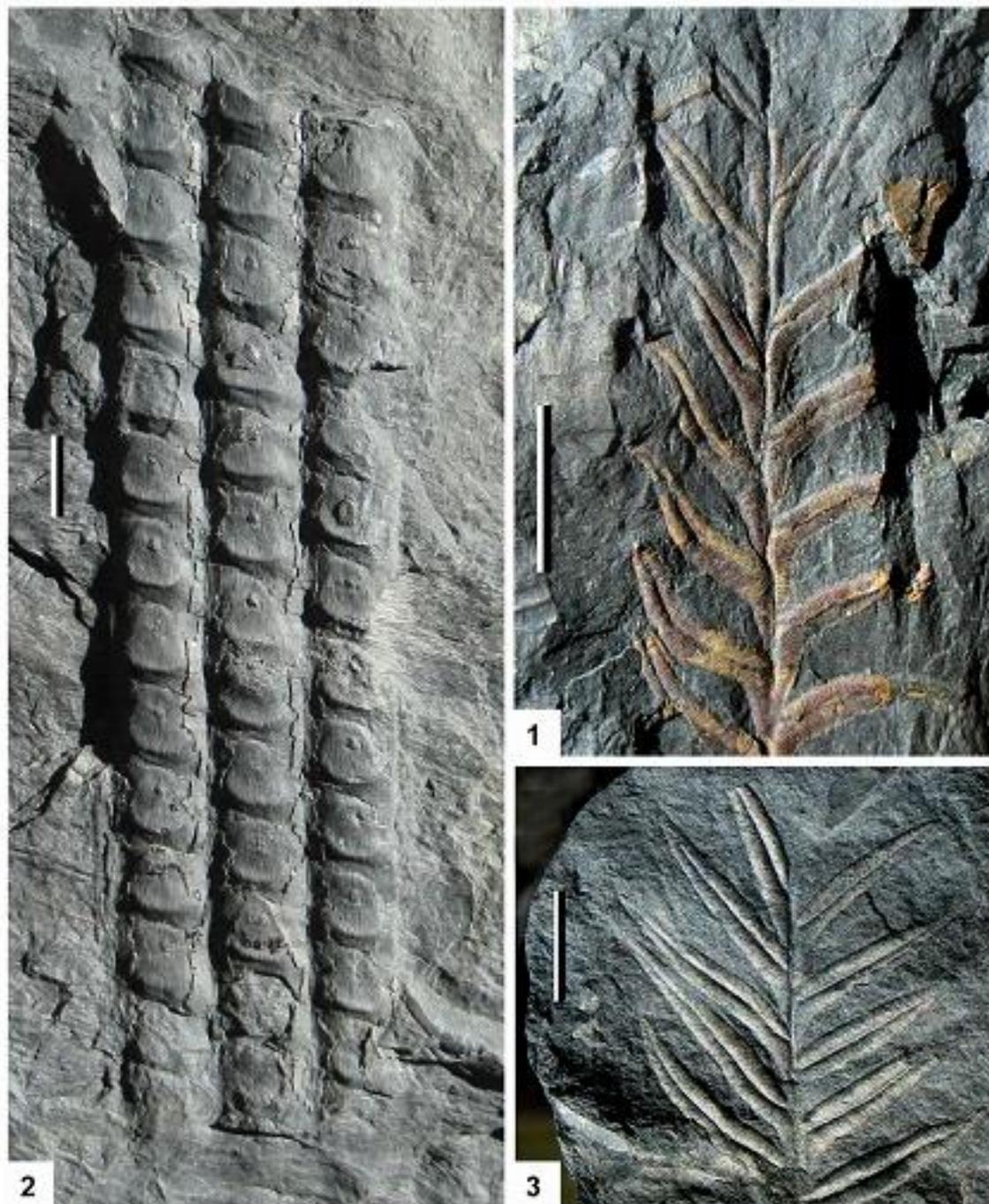


Рис. 5. Ископаемые растения из местонахождений Новокадамово и Качкан: фиг. 1 – *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller; фиг. 2 – *Sigillaria scutellata* Brongniart; фиг. 3 – *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goepfert. Местонахождение: Новокадамово (фиг. 1); Качкан (фиг. 2, 3).

Коллектор Линкевич В. В. Дата сбора: 28.08.2020 г. Длина масштабной линейки 1 см

Fig. 5. Fossil plants from the localities Novokadamovo and Kachkan: 1 – *Alethopteris decurrens* (Artis) Zeiller; 2 – *Sigillaria scutellata* Brongniart; 3 – *Alethopteris lonchitica* (Schlotheim) Goepfert. Localities: Novokadamovo (1), Kachkan (2, 3). Collector V. V. Linkevich.

The date of collecting: August 28, 2020. Scale bar is 1 cm

Второй по количеству собранных экземпляров группой растений в изученных местонахождениях также являются медуллезовые (тригонокарповые), а именно невроптериды, представленные родом *Neuropteris* (рис. 3, фиг. 1) и близким ему родом *Mixoneura* (рис. 3, фиг. 2), совмещающим невроптероидное и одонтоптероидное жилкование перышек.

Невроптериды в имеющейся коллекции представлены полиморфным видом *Neuropteris heterophylla* Brongniart (рис. 3, фиг. 1). Имеющиеся экземпляры практически идентичны экземплярам листьев этого вида, изображенным в целом ряде работ (Залесский, 1907, табл. XIV, фиг. 4, табл. XV, фиг. 2, 4; Залесский и др., 1938, с. 62–64, рис. 71, 72; Новик, 1952, табл. LXI, фиг. 1, 2; Новик, 1954, табл. XX, фиг. 5). Высока вероятность того, что циклоптероидный лист, упоминавшийся в п. "Материалы и методы", принадлежал тому же материнскому растению.

Единственный в изученной коллекции экземпляр, предварительно определенный в открытой номенклатуре как *Mixoneura* cf. *beraliana* Zalessky (рис. 3, фиг. 2), обнаруживает большое сходство с пером последнего порядка *Mixoneura beraliana* Zalessky, изображенным в монографии М. Д. Залесского и Е. Ф. Чирковой (1938, рис. 88); этот же рисунок репродуцирован Е. О. Новик (1952, табл. LXVI, фиг. 6). Отличие заключается в более четко выраженной осевой (условно средней) жилке у нашего экземпляра, что и заставило определить его в открытой номенклатуре.

Следует отметить тот факт, что довольно значительное количество остатков древовидных гетероспоровых плауновидных, как и алетоптерид и невроптерид, отличается исключительно хорошей сохранностью. Помимо фрагментов коры обнаружены облиственные побеги с филлоидами, сохранившимися в прикрепленном состоянии (рис. 2, фиг. 2), что однозначно указывает на то, что растительные остатки не испытали значительного переноса и, таким образом, характеризуют растительность, произраставшую непосредственно вблизи формировавшегося танатоценоза.

В ходе видовой атрибуции имеющихся в коллекции остатков гетероспоровых плауновидных возникли некоторые сложности, связанные прежде всего с большим количеством ранее установленных видов, причем при описании новых видов (и отчасти новых родов) не учитывалась внутривидовая, возрастная и внутривидовая изменчивость.

Один из наиболее хорошо сохранившихся экземпляров коры *Lepidodendron* (рис. 2, фиг. 2, 3) в нашей коллекции с учетом таксономического состава наиболее морфологически близких видов лепидодендрид, широко принятых в международной литературе, можно определить как *Lepidodendron* cf. *aculeatum* Sternberg. В целом имеющийся экземпляр вполне вписывается в пределы внутривидовой изменчивости вида *L. aculeatum* и обнаруживает много общего с классическими экземплярами *L. aculeatum*, описанными и изображенными в литературе (Залесский, 1907, фиг. 5; Новик, 1952, табл. XXVI, фиг. 1, 2; Новик, 1954, табл. IX, фиг. 1; Remy et al., 1959, Abb. 76). Однако имеющийся экземпляр коры явно принадлежал молодому, еще не вполне развитому экземпляру, поэтому было решено определить его в открытой номенклатуре. Следует также отметить, что наш экземпляр несколько сходен с видом *L. worthenii* Lesquereux (Залесский и др., 1938, с. 112–114, рис. 116–118; Новик, 1952, табл. XXVII, фиг. 6, 7).

Остатки коры сигиллярий, имеющиеся в распоряжении авторов, несмотря на кажущиеся различия (рис. 3, фиг. 3, 4; рис. 5, фиг. 2), скорее всего, относятся к одному и тому же естественному (ботаническому) виду. Морфологические различия между этими экземплярами могут быть объяснены прежде всего разной степенью декортикации, обычной для гетероспоровых плауновидных позднего палеозоя (Наугольных, 2001). Наиболее близкий вид, довольно часто встречающийся в среднекаменноугольных отложениях Донецкого угольного бассейна и прилегающих к нему регионов – *Sigillaria scutellata* Brongniart (Новик, 1952, табл. XXXV, фиг. 1, 2). Именно к этому виду, с некоторой долей условности, отнесены все экземпляры сигиллярий из имеющейся коллекции.

Палеоэкологическая интерпретация

Общий состав флористического комплекса из изученных местонахождений однозначно указывает на то, что он характеризует теплолюбивую околоводную растительность, образованную гетероспоровыми плауновидными семействами *Lepidodendraceae* и *Sigillariaceae*, которые, очевидно, были эдификаторами данного сообщества. В подлеске произрастали многочисленные антракофильные птеридоспермы, из которых доминировали алетоптериды *Alethopteris lonchitica* и *A. decurrens* при акцессорной роли невроптерид *Neuropteris heterophylla* и *Mixoneura* cf. *beraliana*. Сходными экологическими предпочтениями обладали медуллезовые птеридоспермы из других регионов Евразии (Wnuk et al., 1984; DiMichele et al., 2006). Важно отметить практически полное отсутствие в коллекции остатков настоящих гидрофилов (например, клинолистников) и очень небольшое количество каламитов. Возможно, это указывает на то, что танатоценоз формировался в непосредственной близости от лесного болота с доминирующими плауновидными [т. е. в пределах "ландшафта В" (Фисуненко, 1987, рис. 3)].

Сходные околородные гидрофильные сообщества в каменноугольном периоде были характерны для многих низкоширотных зон (*Phillips et al., 1981; Щеголев, 1985; 1991; Фисуненко, 1987; Эйлер и др., 1988; Jennings, 1990; Poplin, 1994; DiMichele et al., 1996; Wagner et al., 1997; Greb et al., 2006; Willard et al., 2007; Naugolnykh et al., 2014; Naugolnykh, 2022*).

Все растительные остатки из местонахождений Новокадамово и Качкан характеризуют один и тот же стратиграфический интервал, поэтому в перспективе целесообразно использовать собранные палеоботанические образцы для более широких палеофитогеографических и палеоэкологических обобщений.

Заключение

Коллекция ископаемых растений среднекаменноугольного возраста, собранная в отложениях белокалитвинской свиты (башкирский ярус) в Ростовской области, позволяет составить предварительное представление об исходных растительных сообществах, которые могут быть интерпретированы как гидрофильные/антракофильные. Представительность и музейная привлекательность собранных образцов делает возможным их эффективное использование в образовательных проектах, а также для дидактических целей и музейных выставок.

Благодарности

Настоящая работа подготовлена в рамках госзадания и государственной программы Геологического института РАН (г. Москва). Авторы выражают искреннюю признательность геологу-любителю Албулу А. В. (г. Ростов-на-Дону) за помощь в организации полевых работ и сбора растительных остатков, а также Снигиревскому С. М. (кафедра осадочной геологии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета; Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург) за рецензирование рукописи и ценные замечания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Бетехтина О. А., Горелова С. Г. Палеоландшафты зон угленакопления и методика их использования для корреляции (на примере Кузнецкого и Минусинского бассейнов) // Биостратиграфия и палеобиогеография девона и карбона Азиатской части СССР / отв. ред. В. Н. Дубатов, О. В. Юферев. Новосибирск, 1978. С. 20–29. (Труды Института геологии и геофизики / АН СССР, Сиб. отд-ние ; вып. 386).
- Егоров А. И. Глобальная эволюция торфоугленакопления / отв. ред. В. Е. Закруткин. Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского ун-та, 1992. 320 с.
- Залесский М. Д. Каменноугольная флора Северного Кавказа. Л. [и др.] : Гос. науч.-техн. горно-геол.-нефт. изд-во, 1934. 22 с.
- Залесский М. Д. Растительные остатки геологического кабинета Императорского Харьковского университета и Донского музея в Новочеркасске // Материалы по каменноугольной флоре Донецкого бассейна : в 2 т. СПб., 1907. Т. 2. С. 423–494.
- Залесский М. Д., Чиркова Е. Ф. Ископаемая флора среднего отдела каменноугольных отложений Донецкого бассейна. Л. ; М. : ГОНТИ, 1938. 172 с. (Труды Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института (ЦНИГРИ) ; вып. 98).
- Наугольных С. В. *Viatcheslavia vorcutensis* Zalessky (плауновидные): морфология, систематика, палеоэкология // Палеонтологический журнал. 2001. № 2. С. 97–102.
- Новик Е. О. Каменноугольная флора восточной части Донецкого бассейна. Киев : Изд-во АН УССР, 1954. 138 с. (Труды Института геологических наук. Серия стратиграфии и палеонтологии ; вып. 7).
- Новик Е. О. Каменноугольная флора Европейской части СССР. М. : Изд-во АН СССР, 1952. 469 с.
- Новик Е. О. Флора и флоростратиграфия верхнего карбона Северного Кавказа. Киев : Наукова Думка, 1978. 164 с.
- Ошуркова М. В. Ландшафтно-экологический подход к реконструкции растительных сообществ карбона Карагандинского бассейна // Экостратиграфия и экологические системы геологического прошлого : тр. XXII сессии Всесоюз. палеонтол. о-ва / отв. ред. Д. Л. Степанов, Л. И. Хозацкий. Л., 1980. С. 66–74.
- Ошуркова М. В. Фитоориктоценозы как показатели смены ландшафтов в ходе формирования угольных месторождений // Палеонтология и реконструкция геологической истории палеобассейнов : тр. XXIX сессии Всесоюз. палеонтол. о-ва / отв. ред. Т. Н. Богданова, Л. И. Хозацкий. Л., 1987. С. 29–34.
- Фисуненко О. П. Ландшафты среднего карбона Донецкого бассейна // Палеонтология и реконструкция геологической истории палеобассейнов : тр. XXIX сессии Всесоюз. палеонтол. о-ва / отв. ред. Т. Н. Богданова, Л. И. Хозацкий. Л., 1987. С. 92–99.

- Фисуненко О. П., Снигиревская Н. С. Торфообразующие растительные сообщества среднего карбона Донецкого бассейна // Жизнь на древних континентах, ее становление и развитие : тр. XXIII сессии Всесоюз. палеонтол. о-ва / отв. ред. И. В. Васильев, Л. И. Хозацкий. Л., 1981. С. 98–106.
- Щеголев А. К. Плауновидные и клинолисты позднего карбона. Киев : Наукова Думка, 1991. 128 с.
- Щеголев А. К. Эволюция позднекаменноугольного растительного покрова вестфальской провинции, ее закономерности и значение для стратиграфии : спец. 04.00.09 "Палеонтология и стратиграфия" : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Киев, 1985. 34 с.
- Эйлер Д., Поплэн С. М. Ископаемые организмы из Монсо-ле-Мина // В мире науки. 1988. № 11. С. 56–63.
- Chaloner W. G., Meyen S. V. Carboniferous and Permian floras of the Northern continents // Atlas of Paleobiogeography / ed. A. Hallam. New York : Elsevier Publ. Co, 1973. P. 169–186.
- DiMichele W. A., Phillips T. L. Climate change, plant extinctions and vegetational recovery during the Middle-Late Pennsylvanian Transition: The case of tropical peat-forming environments in North America // Biotic recovery from mass extinction events / ed. M. B. Hart. London, 1996. P. 201–221.
- DiMichele W. A., Phillips T. L., Pfefferkorn H. W. Paleoecology of Late Paleozoic Pteridosperms from Tropical Euramerica // The Journal of the Torrey Botanical Society. 2006. Vol. 133, No. 1. P. 83–118. URL: <http://www.jstor.org/stable/20063824>.
- Greb S. F., DiMichele W. A., Gastaldo R. A. Evolution and importance of wetlands in earth history // Wetlands through time / eds. S. F. Gebs, W. A. DiMichele. Boulder, Colo., 2006. P. 1–40. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2399\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2399(01)).
- Jennings J. R. Guide to Pennsylvanian fossil plants of Illinois. Illinois State Geological Survey, 1990. 75 p.
- Meyen S. V. Fundamentals of Palaeobotany. London : Chapman and Hall, Ltd. 1987.
- Meyen S. V. The Carboniferous and Permian floras of Angaraland: A synthesis // Biological Memoirs. 1982. Vol. 7. P. 1–109.
- Naugolnykh S. V. Peat-accumulation and Early Carboniferous environments of the Kizel Coal Basin, Urals, Russia // Acta Geologica Sinica. 2022. Vol. 96, Iss. 3. P. 1098–1112. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14798>.
- Naugolnykh S. V., Jin Jianhua. An Early Carboniferous flora of the Huadu locality from South China: Its taxonomic composition, paleophytogeographical position and paleoecological interpretation // Acta Geologica Sinica. 2014. Vol. 88, Iss. 5. P. 1341–1351. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12301>.
- Němejc F. Studies on the Alethopterids of the Permocarboniferous of Central Bohemia (with remarks on forms collected in other Bohemian coaldistricts) // Vestník Kralovske Ceske spolecnosti nauk. 1936. Vol. I. P. 1–18.
- Phillips T. L., DiMichele W. A. Paleoecology of Middle Pennsylvanian age coal swamps in southern Illinois, Herrin Coal Member at Sahara Mine no. 5 // Paleobotany, Paleoecology and Evolution. 1981. Vol. 1. P. 231–285.
- Poplin C. M. Montceau-les-Mines, basin intramontagneux carbonifere et permien de France: reconstitution, comparaison avec d'autres bassins d'Euramerique // Quand le Massif Central etait sous l'equateur: un ecosysteme carbonifere a Montceau-les-Mines / eds. C. M. Poplin, D. Heyler. Paris, 1994. P. 289–328.
- Remy W., Remy R. Pflanzenfossilien. Ein Führer durch die Flora des Limnisch entwickelten Paläozoikums. Berlin : Akademie Verlag, 1959.
- Wagner T., Pfefferkorn H. W. Tropical peat occurrences in the Orinoco delta: Preliminary assessment and comparison to Carboniferous coal deposits // Proceedings of the XIII Intern. Congress on the Carboniferous and Permian, 28 August – 2 September, 1995. Kraków, 1997. Vol. 157, Part 2. P. 161–168.
- Willard D. A., Phillips T. L., Lesnikowska A. D., DiMichele W. A. Paleoecology of the Late Pennsylvanian – age Calhoun coal bed and implications for long-term dynamics of wetland ecosystems // International Journal of Coal Geology. 2007. Vol. 69, Iss. 1–2. P. 21–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.03.011>.
- Wnuk C., Pfefferkorn H. W. The life habits and paleoecology of Middle Pennsylvanian medullosan pteridosperms based on an in situ assemblage from the Bernice Basin (Sullivan county, Pennsylvania, USA) // Review of Palaeobotany and Palynology. 1984. Vol. 41, Iss. 3–4. P. 329–351. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(84\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0034-6667(84)90053-8).

References

- Betekhtina, O. A., Gorelova, S. G. 1978. Paleolandscapes of coal accumulation zones and the method of their use for correlation (on the example of the Kuznetsk and Minusinsk basins). In *Biostratigraphy and paleobiogeography of the Devonian and Carboniferous of the Asian part of the USSR*. Eds. V. N. Dubatolov, O. V. Yuferev. Novosibirsk, pp. 20–29. (In Russ.)
- Egorov, A. I. 1992. Global evolution of peat-coal accumulation. Ed. V. E. Zakrutkin. Rostov-on-Don. (In Russ.)
- Zalessky, M. D. 1934. Carboniferous flora of the North Caucasus. Leningrad. (In Russ.)
- Zalessky, M. D. 1907. Plant remains of the geological study of the Imperial Kharkov University and the Don Museum in Novocherkassk. In *Materials on the Carboniferous Flora of the Donetsk Basin*: in 2 vol. St. Petersburg, V. 2. P. 423–494. (In Russ.)

- Zalessky, M. D., Chirkova, E. F. 1938. Fossil flora of the middle section of the Carboniferous deposits of the Donets Basin. Leningrad; Moscow. (In Russ.)
- Naugolnykh, S. V. 2001. *Viatcheslavia vorcutensis* Zalessky (lycopods): Morphology, taxonomy, paleoecology. *Paleontological Journal*, 2, pp. 97–102. (In Russ.)
- Novik, E. O. 1954. Carboniferous flora of the eastern part of the Donets Basin. Kyiv. (In Russ.)
- Novik, E. O. 1952. Carboniferous flora of the European part of the USSR. Moscow. (In Russ.)
- Novik, E. O. 1978. Flora and phytostatigraphy of the Upper Carboniferous of the North Caucasus. Kyiv. (In Russ.)
- Oshurkova, M. V. 1980. Landscape-ecological approach to the reconstruction of plant communities of the Carboniferous of the Karaganda basin. In *Ecostratigraphy and ecological systems of the geological past*. L., pp. 66–74. (In Russ.)
- Oshurkova, M. V. 1987. Phyto-oritocoenoses as indicators of landscape change during the formation of coal deposits. In *Paleontology and reconstruction of the geological history of paleobasins*. L., pp. 29–34. (In Russ.)
- Fisunenko, O. P. 1987. Landscapes of the Middle Carboniferous of the Donetsk basin. In *Paleontology and reconstruction of the geological history of paleobasins*. L., pp. 92–99. (In Russ.)
- Fisunenko, O. P., Snigirevskaya, N. S. 1981. Peat-forming plant communities of the Middle Carboniferous of the Donets Basin. In *Life on ancient continents, its formation and development*. L., pp. 98–106. (In Russ.)
- Schegolev, A. K. 1991. Lycopodiopsids and sphenophylls of the Late Carboniferous. Kyiv. (In Russ.)
- Schegolev, A. K. 1985. Evolution of the Late Carboniferous vegetation cover of the Westphalian Province, its regularities and significance for stratigraphy. Abstract of Ph.D. dissertation. Kyiv. (In Russ.)
- Euler, D., Poplen, S. M. 1988. Fossil organisms from Monceau-les-Mines. *In the world of science*, 11, pp. 56–63. (In Russ.)
- Chaloner, W. G., Meyen, S. V. 1973. Carboniferous and Permian floras of the Northern continents. In *Atlas of Paleobiogeography*. Ed. A. Hallam. New York, pp. 169–186.
- DiMichele, W. A., Phillips, T. L. 1996. Climate change, plant extinctions and vegetational recovery during the Middle-Late Pennsylvanian Transition: The case of tropical peat-forming environments in North America. In *Biotic recovery from mass extinction events*. Ed. M. B. Hart. London, pp. 201–221.
- DiMichele, W. A., Phillips, T. L., Pfefferkorn, H. W. 2006. Paleoecology of Late Paleozoic Pteridosperms from Tropical Euramerica. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, 133(1), pp. 83–118. URL: <http://www.jstor.org/stable/20063824>.
- Greb, S. F., DiMichele, W. A., Gastaldo, R. A. 2006. Evolution and importance of wetlands in earth history. In *Wetlands through time*. Eds. S. F. Gebs, W. A. DiMichele. Boulder, pp. 1–40. DOI: [https://doi.org/10.1130/2006.2399\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2399(01)).
- Jennings, J. R. 1990. Guide to Pennsylvanian fossil plants of Illinois. Illinois.
- Meyen, S. V. 1987. Fundamentals of Palaeobotany. London.
- Meyen, S. V. 1982. The Carboniferous and Permian floras of Angaraland: A synthesis. *Biological Memoirs*, 7, pp. 1–109.
- Naugolnykh, S. V. 2022. Peat-accumulation and Early Carboniferous environments of the Kizel Coal Basin, Urals, Russia. *Acta Geologica Sinica*, 96(3), pp. 1098–1112. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14798>.
- Naugolnykh, S. V., Jin, Jianhua. 2014. An Early Carboniferous flora of the Huadu locality from South China: Its taxonomic composition, paleophytogeographical position and paleoecological interpretation. *Acta Geologica Sinica*, 88(5), pp. 1341–1351. DOI: <https://doi.org/10.1111/1755-6724.12301>.
- Němejc, F. 1936. Studies on the Alethopterids of the Permocarboiferous of Central Bohemia (with remarks on forms collected in other Bohemian coaldistricts). *Vestník Kralovské České společnosti nauk*, I, pp. 1–18.
- Phillips, T. L., DiMichele, W. A. 1981. Paleoecology of Middle Pennsylvanian age coal swamps in southern Illinois, Herrin Coal Member at Sahara Mine no. 5. *Paleobotany, Paleoecology and Evolution*, 1, pp. 231–285.
- Poplin, C. M. 1994. Montceau-les-Mines, basin intramontagneux carbonifere et permien de France: reconstitution, comparaison avec d'autres bassins d'Euramerique. In *Quand le Massif Central etait sous l'equateur: un ecosysteme carbonifere a Montceau-les-Mines*. Eds. C. M. Poplin, D. Heyler. Paris, pp. 289–328.
- Remy, W., Remy, R. 1959. Pflanzenfossilien. Ein Führer durch die Flora des Limnisch entwickelten Paläozoikums. Berlin.
- Wagner, T., Pfefferkorn, H. W. 1997. Tropical peat occurrences in the Orinoco delta: Preliminary assessment and comparison to Carboniferous coal deposits. Proceedings of the XIII Intern. Congress on the Carboniferous and Permian, 28 August – 2 September, 1995. Kraków, Vol. 157(2), pp. 161–168.
- Willard, D. A., Phillips, T. L., Lesnikowska, A. D., DiMichele, W. A. 2007. Paleoecology of the Late Pennsylvanian – age Calhoun coal bed and implications for long-term dynamics of wetland ecosystems. *International Journal of Coal Geology*, 69(1–2), pp. 21–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.03.011>.
- Wnuk, C., Pfefferkorn, H. W. 1984. The life habits and paleoecology of Middle Pennsylvanian medullosan pteridosperms based on an in situ assemblage from the Bernice Basin (Sullivan county, Pennsylvania, USA). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 41(3–4), pp. 329–351. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(84\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0034-6667(84)90053-8).

Сведения об авторах

Наугольных Сергей Владимирович – Пыжевский пер., 7, г. Москва, Россия, 119017;
Геологический институт РАН, профессор РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник;
e-mail: naugolnykh@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6506-7319>

Serge V. Naugolnykh – 7 Pyzhevsky Lane, Moscow, Russia, 119017; Geological Institute RAS,
Dr Sci. (Geology & Miner.), Researcher; e-mail: naugolnykh@list.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6506-7319>

Линкевич Валерий Викторович – ул. Кленовая, 9, г. Андреаполь, Тверская обл., 172800;
директор Андреапольского краеведческого музея им. Э. Э. Шимкевича; e-mail: arkm-2015@yandex.ru

Valery V. Linkevich – 9 Klenovaya Str., Andreapol, Tver Region, 172800; Director of the Andreapol
Regional Museum; e-mail: arkm-2015@yandex.ru

Характеристика таксономического состава полихет в акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море)

В. Г. Копий

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, Россия;
e-mail: verakopiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-3409>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 29.09.2022;
получена после доработки 14.10.2022;
принята к публикации 21.10.2022

Береговая зона бухты Ласпи (Крым, Черное море) является привлекательной для развития рекреационной деятельности, которая может негативно повлиять на состояние экосистемы бухты и прилегающих к ней акваторий. Цель исследования – оценка современного состояния полихет, обитающих на рыхлых грунтах литорали и сублиторали бухты Ласпи. В 2016–2019 гг. в акватории бухты исследована фауна полихет. Сборы макрозообентоса выполнены в 84-м, 86-м, 96-м, 108-м рейсах НИС "Профессор Водяницкий" и в прибрежных сборах. Всего выполнено 89 проб (19 глубоководных, 70 прибрежных). В акватории бухты Ласпи идентифицировано 45 видов полихет. Их средняя численность составила $2\,368 \pm 467$ экз./м², средняя биомасса – $44\,128 \pm 13\,919$ г/м². Существенный вклад в формирование данных показателей вносит *Terebellides stroemii*. Ранжированный ряд по индексу плотности возглавляют *T. stroemii*, *Nephtys hombergii* и *Melinna palmata*. Наибольшее количество видов отмечено на глубине 46 м, где грунт представлен песком (мелкий, крупный, заиленный) и галькой. Наибольшая численность отмечена на глубинах 93,5–98 м, основной вклад в общую численность вносит *Prionospio cirrifera*. Наибольшая биомасса зарегистрирована на глубинах 53,5–58 м, основной вклад в данный показатель вносит *T. stroemii*. В акватории бухты Ласпи зарегистрированы характерные виды – *P. cirrifera* и *Micronephthys longicornis*. Они встречены как на мелководье, так и на больших глубинах. К редким видам, обнаруженным только на одной станции, относятся 18 видов полихет. Полученные результаты дают представление о видовом составе и количественных характеристиках полихет, обитающих на рыхлых грунтах бухты Ласпи, и могут быть полезны для дальнейшего мониторинга этого района.

Ключевые слова:

Polychaeta, таксономический состав, численность, биомасса, бухта Ласпи, Черное море

Для цитирования

Копий В. Г. Характеристика таксономического состава полихет в акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море). Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-69-77>.

Taxocene of polychaeta of the Laspi Bay water area (the Crimea, Black Sea)

Vera G. Kopyi

Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Sevastopol, Russia;
e-mail: verakopiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-3409>

Article info

Received 29.09.2022;
received in revised form 14.10.2022;
accepted 21.10.2022

Abstract

The coastal zone of Laspi Bay (the Crimea, Black Sea) is attractive for the development of recreational activities. It can negatively affect the state of the bay ecosystem and adjacent waters. The aim of this study is to assess the current state of polychaetes inhabiting the loose soils of the littoral and sublittoral areas of Laspi Bay. In 2016–2019 the fauna of polychaetes was studied in the waters of Laspi Bay. Macrozoobenthos were collected on cruises 84, 86, 96, 108 aboard the research vessel *Professor Vodyanitsky* and in coastal expeditions. 89 samples were taken (19 deep-water, 70 coastal). 45 species of polychaetes were identified. The average abundance of Polychaeta was $2\,368 \pm 467$ ind./m². The average biomass was $44\,128 \pm 13\,919$ g/m². *Terebellides stroemii* makes a significant contribution to the formation of these indicators. The ranked series by density index is headed by *T. stroemii*, *Nephtys hombergii* and *Melinna palmata*. The largest abundance of species is noted at a depth of 46 m where the soil is represented by sand and pebbles. The highest number is noted at depths of 93.5–98 m. *Prionospio cirrifera* makes the main contribution to the total number. The highest biomass is noted at depths of 53.5–58 m. *T. stroemii* makes the main contribution to the total biomass. In the Laspi Bay waters are recorded characteristic species – *P. cirrifera* and *Micronephthys longicornis*. They are found both in shallow waters and at great depths. Rare species found only at one station include 18 polychaete species. The results obtained give an idea of the taxonomic composition of polychaete worms in the waters of Laspi Bay and can be useful for further monitoring of this area.

Key words:

Polychaeta, taxonomic composition, abundance, biomass, Laspi Bay, Black Sea

For citation

Kopyi, V. G. 2023. Taxocene of polychaeta of the Laspi Bay water area (the Crimea, Black Sea). *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 69–77. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-1-69-77>.

Введение

Бухта Ласпи расположена в юго-западной части Крымского полуострова между мысами Сарыч и Айя. У входа в бухту глубина составляет 60 м, в центральной части – 40 м с уменьшением в направлении береговой черты. Протяженность ее береговой линии – около 4 км. Бухта Ласпи относится к открытому типу. Берег представлен абразионным уступом высотой около 10–12 м и сложен породами таврической серии (*Орехова и др., 2020*). Подводный береговой склон приглубый, на большей части выражен глыбовый бенч. Наиболее обширная центральная часть бухты занята наклонной равниной, сложенной песчаными и алевроитовыми отложениями. В бухте существуют благоприятные условия для развития уникальных местообитаний донной растительности (*Миронова и др., 2018; Панкеева и др., 2019а; Панкеева и др., 2019б; Панкеева и др., 2020*).

В гранулометрическом составе преобладают скальные, валунно-глыбовые и каменистые субстраты. Иногда встречаются небольшие участки дна с галькой, на выходе из бухты – участки песчано-илистого дна. Для бухты характерны высококарбонатные псаммитовые осадки, которые включают в себя мелко- и крупнозернистые фракции (0,5–1 мм) с примесью ракушечной и каменной гальки. Крупноалевритовая фракция (0,1–0,05 мм) встречается в меньшей степени и совсем в незначительной – мелкоалевритовые и пелитовые фракции (0,01–0,005).

Содержание органического углерода ($C_{орг}$) в бухте составляет в среднем 0,16 % для псаммитовых осадков и варьирует в пределах, характерных для геохимического фона поверхностных донных осадков шельфовых зон Черного моря, для песков с ракушей – 0,66 %. До глубин 20 м, несмотря на наличие источников загрязнения, значительное накопление $C_{орг}$ отсутствует. Основные факторы, оказывающие влияние на накопление $C_{орг}$ в донных осадках прибрежной зоны бухты Ласпи, – гидродинамические и литодинамические процессы, а также антропогенная нагрузка.

Кроме этого, донные осадки бухты обогащены карбонатами ($CaCO_3 \geq 80-90\%$), максимальные величины карбонатности в районе м. Сарыч связаны с волновым накоплением раковинного и каменного гравия, полученные показатели одного порядка с показателями карбонатности в других открытых акваториях прибрежного шельфа Крыма (*Орехова и др., 2020; Аблязов и др., 2021*).

Гидродинамический режим акватории бухты обусловлен влиянием циркуляционных систем антициклонического типа, так как внешняя граница бухты совпадает с прибрежной границей основного черноморского течения. Глубинные воды попадают в поверхностные слои бухты в результате сгонно-нагонных явлений и водообмена с открытым морем. Это способствует динамической активности и аэрации вод. В летнее время преобладают вдольбереговые течения, преимущественно восточного направления.

Бухта Ласпи имеет высокую природоохранную ценность. Для охраны морской акватории бухты создан гидрологический памятник природы регионального значения "Прибрежный аквальный комплекс у мыса Сарыч" и государственный заказник регионального значения "Мыс Айя" (*Ациховская и др., 2002; Миронова и др., 2018; Панкеева и др., 2019б; Аблязов и др., 2021*).

В настоящее время береговая зона бухты Ласпи является привлекательной для развития рекреационной деятельности, которая может негативно повлиять на состояние экосистемы бухты и прилегающих к ней акваторий.

Цель исследования – оценка современного состояния полихет, обитающих на рыхлых грунтах литорали и сублиторали бухты Ласпи.

Материалы и методы

В основу работы положены результаты бентосных съемок рыхлых грунтов акватории бухты Ласпи, выполненных в 2016–2019 гг. Материалом для наших исследований послужили сборы макрозообентоса в 84-м (апрель, 2016 г.), 86-м (июнь, 2016 г.), 96-м (июль – август, 2017 г.), 108-м (июль – август, 2019 г.) рейсах НИС "Профессор Водяницкий" и прибрежных сборов в августе 2016 г. и в сентябре 2017 г. Рейсовые пробы отбирали на глубинах 46–123 м, прибрежные – от 0 до 28 м. Всего выполнено 89 бентосных проб (19 глубоководных, 70 прибрежных) (рис. 1).

В рейсах отбор проб бентосного материала проводили водолазным методом с помощью дночерпателя "Океан 50" ($S = 0,25 \text{ м}^2$), прибрежные сборы – с помощью ручного дночерпателя ($S = 0,04 \text{ м}^2$) в 1–3 повторностях. Промывку грунта проводили через систему сит с минимальным диаметром ячеек 1 мм. Фиксировали материал в 4%-м нейтрализованном формалине. Затем, в лабораторных условиях, в пробе подсчитывали количество особей каждого вида и определяли сырой вес на торсионных весах 3-го класса с точностью до 0,001 г и максимальным разрешением 250 мг, более мелкие экземпляры – на торсионных весах 3-го класса АХИС с точностью до 0,0005 г и максимальным разрешением 50 г. Перед взвешиванием полихет вынимали из трубок и высушивали на фильтровальной бумаге.

При описании количественного развития полихет использовали показатели численности (N , экз./м²), биомассы (B , г/м²) и индекса функционального обилия (ИФО), рассчитанного по формуле

$$\text{ИФО} = N^{0,25} \times B^{0,75},$$

где N – численность вида, B – биомасса вида (*Мальцев, 1990*).

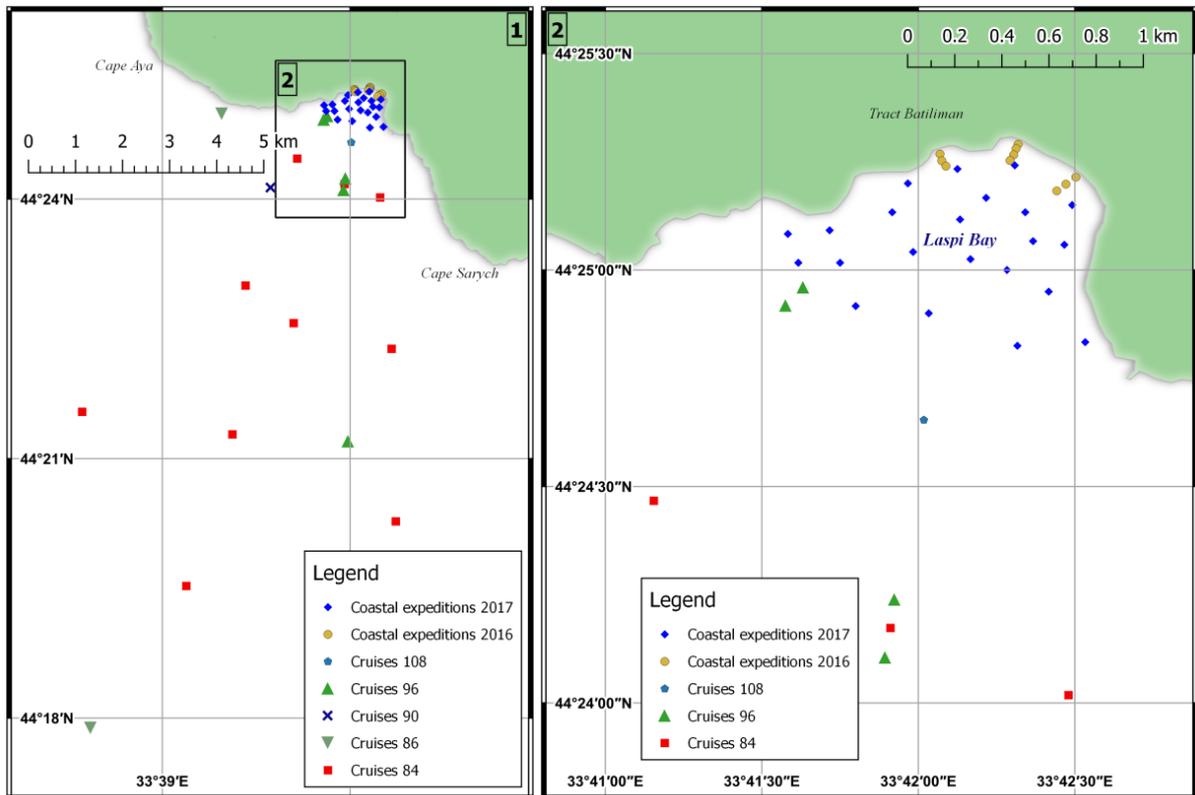
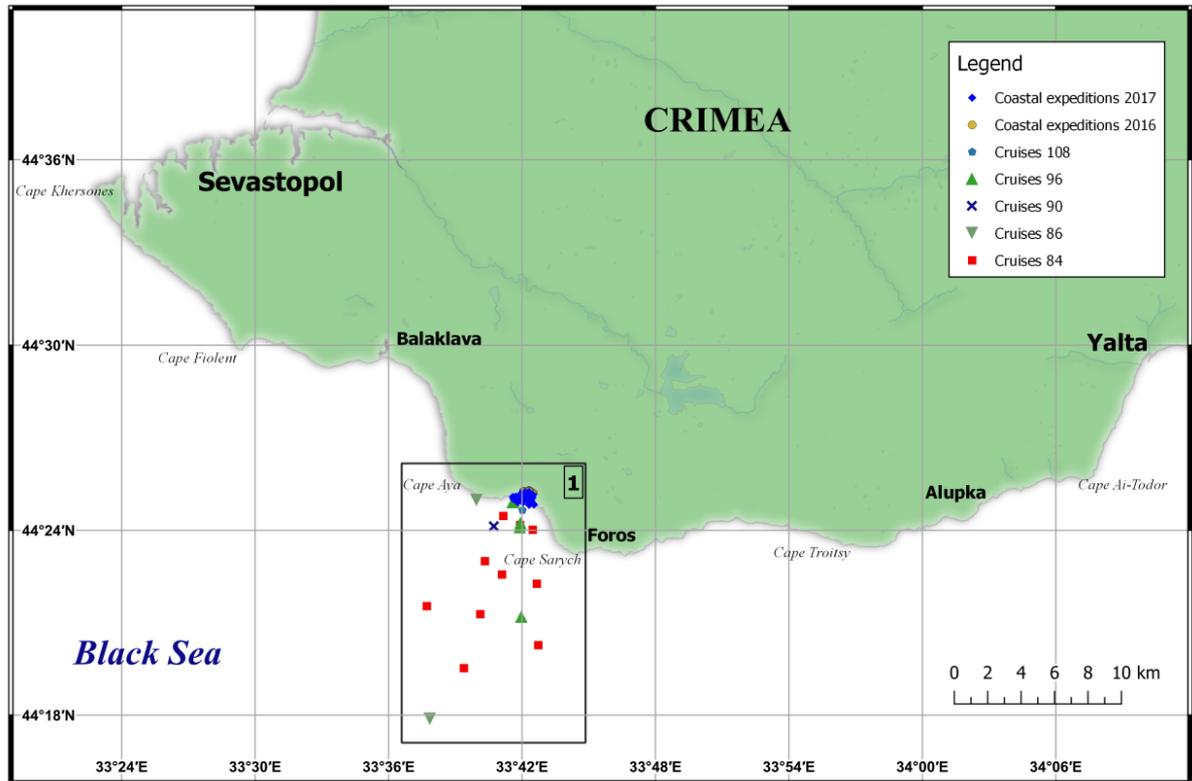


Рис. 1. Район исследований
Fig. 1. Research area

Видовую идентификацию и выделение трофических групп осуществляли с помощью литературных источников (Киселева, 1981; 2004). Таксономическая принадлежность приводилась в соответствии с базами данных World Register of Marine Species (WoRMS Editorial Board)¹.

Ранжированная кривая доминирования – разнообразия видов строилась по расчетным значениям индексов плотности (ИП) видов

$$\text{ИП} = \text{ИФО} \times P,$$

где P – встречаемость вида.

Результаты и обсуждение

В результате анализа собранного материала в акватории бухты Ласпи идентифицировано 45 видов полихет, относящихся к 41 роду и 25 семействам. Наибольшее количество видов (5) зарегистрировано в семействах Phyllodoceidae и Nereididae, наименьшее (1) – в 16 семействах (табл.).

Таблица. Видовой состав и количественные показатели полихет в акватории бухты Ласпи
Table. Species composition and quantitative indices of polychaetes in the water area of Laspi Bay

Виды	N	B	P	h
Сем. Phyllodoceidae				
<i>Eumida sanguinea</i> (Örsted, 1843)	0,54 ± 0,43	0,002 ± 0,001	1	46
<i>Genetyllis tuberculata</i> (Bobretzky, 1868)	2 ± 1	0,004 ± 0,003	2	46
<i>Mysta picta</i> (Quatrefages, 1866)	21 ± 7	0,078 ± 0,028	10	3–100
<i>Phyllodoce maculata</i> (Linnaeus, 1767)	5 ± 1,8	0,008 ± 0,003	3	3,5–58
<i>Phyllodoce mucosa</i> (Örsted, 1843)	27 ± 12	0,127 ± 0,058	5	58–85
Сем. Nephtyidae				
<i>Micronephthys longicornis</i> (Perejaslavtseva, 1891)	33 ± 7	0,011 ± 0,003	30	5–87
<i>Nephtys cirrosa</i> (Ehlers, 1868)	36 ± 14	1,046 ± 0,388	10	46–123
<i>Nephtys hombergii</i> (Savigny in Lamarck, 1818)	152 ± 62	3,749 ± 1,333	11	46–94
Сем. Glyceridae				
<i>Glycera alba</i> (O. F. Müller, 1776)	16 ± 10	0,074 ± 0,053	8	3–94
Сем. Polynoidea				
<i>Harmothoe imbricata</i> (Linnaeus, 1767)	0,54 ± 0,44	0,028 ± 0,018	1	71
<i>Harmothoe reticulata</i> (Claparède, 1870)	1 ± 0,88	0,0008 ± 0,0006	1	17
Сем. Sigalionidae				
<i>Pholoe inornata</i> (Johnston, 1839)	3 ± 1,4	0,017 ± 0,013	5	12–94
<i>Pisione remota</i> (Southern, 1914)	2 ± 1	0,002 ± 0,0004	1	0,5
Сем. Nereididae				
<i>Eunereis longissima</i> (Johnston, 1840)	33 ± 16	2,125 ± 1,321	9	46–94
<i>Hediste diversicolor</i> (O.F. Müller, 1776)	3 ± 1,7	0,109 ± 0,071	2	5,5–46
<i>Nereis zonata</i> (Malmgren, 1867)	0,4 ± 0,29	0,007 ± 0,005	1	94
<i>Perinereis cultrifera</i> (Grube, 1840)	0,5 ± 0,3	0,012 ± 0,007	2	3–94
<i>Platynereis dumerilii</i> (Audouin & Milne Edwards, 1833)	2 ± 1,7	0,369 ± 0,267	1	45
Nereididae (Blainville, 1818)	46 ± 27	0,03 ± 0,015	9	1–94
Сем. Syllidae				
<i>Salvatoria clavata</i> (Claparède, 1863)	2 ± 0,95	0,001 ± 0,0008	2	1,5–3,5
<i>Syllis gracilis</i> (Grube, 1840)	0,5 ± 0,4	0,0003 ± 0,0002	2	3,5
<i>Syllis hyalina</i> (Grube, 1863)	0,9 ± 0,5	0,0005 ± 0,002	3	3–3,5
Syllidae sp.	0,5 ± 0,4	0,0005 ± 0,0004	1	46
Сем. Microphthalmidae				
<i>Microphthalmus fragilis</i> (Bobretzky, 1870)	14 ± 5,3	0,005 ± 0,002	11	0,5–22
Сем. Pilargidae				
<i>Sigambra tentaculata</i> (Treadwell, 1941)	0,2 ± 0,1	0,00009 ± 0,00006	2	9
Сем. Eunicidae				
<i>Eunice vittata</i> (Delle Chiaje, 1828)	0,35 ± 0,28	0,014 ± 0,011	1	94
<i>Lysidice unicornis</i> (Grube, 1840)	2 ± 1	0,002 ± 0,001	1	4–9

¹ WoRMS Editorial Board: World Register of Marine Species. URL: <http://www.marinespecies.org>.

Сем. Dorvilleidae				
<i>Protodorvillea kefersteini</i> (McIntosh, 1869)	19 ± 8	0,007 ± 0,003	11	1–14,5
Сем. Protodrilidae				
<i>Lindrilus flavocapitatus</i> (Uljanina, 1877)	13 ± 10	0,001 ± 0,0009	1	0,5
Сем. Saccocirridae				
<i>Saccocirrus papillocercus</i> (Bobretzky, 1872)	154 ± 122	0,181 ± 0,146	8	0–1,5
Сем. Oweniidae				
<i>Galathowenia oculata</i> (Zachs, 1923)	2 ± 1	0,0008 ± 0,0007	1	45
Сем. Orbiniidae				
<i>Protoaricia capsulifera</i> (Bobretzky, 1870)	0,3 ± 0,2	0,00008 ± 0,00005	1	1
Сем. Spionidae				
<i>Malacoceros tetracerus</i> (Schmarda, 1861)	7 ± 2,5	0,011 ± 0,005	9	1–17
<i>Prionospio cirrifera</i> (Wirén, 1883)	416 ± 269	1,135 ± 0,873	33	1–123
<i>Spio decorata</i> (Bobretzky, 1870)	18 ± 6,7	0,019 ± 0,006	10	1,5–46
<i>Streblospio shrubsolii</i> (Buchanan, 1890)	65 ± 55	0,057 ± 0,041	1	45
Сем. Paraonidae				
<i>Aricidea (Strelzovia) claudiae</i> (Laubier, 1967)	241 ± 155	0,193 ± 0,113	9	13–87
Сем. Opheliidae				
<i>Polyopthalmus pictus</i> (Dujardin, 1839)	1 ± 0,6	0,001 ± 0,0006	2	3,5–46
Сем. Capitellidae				
<i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)	27 ± 11	0,006 ± 0,002	10	1–9
<i>Heteromastus filiformis</i> (Claparède, 1864)	97 ± 36	0,42 ± 0,16	14	9–100
<i>Notomastus profundus</i> (Eisig, 1887)	18 ± 14	0,002 ± 0,001	1	46
Сем. Maldanidae				
<i>Leiochone leiopygos</i> (Grube, 1860)	15 ± 9,6	1,236 ± 0,972	2	58–94
Сем. Terebellidae				
<i>Polycirrus jubatus</i> (Bobretzky, 1868)	110 ± 87	1,346 ± 1,086	1	123
Сем. Trichobranchidae				
<i>Terebellides stroemii</i> (Sars, 1835)	533 ± 159	30,833 ± 13,006	13	46–100
Сем. Melinnidae				
<i>Melinna palmata</i> (Grube, 1870)	227 ± 149	0,973 ± 0,576	8	71–100
Сем. Serpulidae				
<i>Spirobranchus triqueter</i> (Linnaeus, 1758)	0,5 ± 0,4	0,001 ± 0,0008	3	46
Сем. Fabriciidae				
<i>Fabricia stellaris</i> (O.F. Müller, 1774)	0,54 ± 0,43	0,0003 ± 0,0002	2	8
ВСЕГО	2 368 ± 467	44,128 ± 13,92		

Примечание. *N* – численность (экз./м²), *B* – биомасса (г/м²), *P* – встречаемость (%), *h* – глубина (м).

Средний показатель численности полихет по всему полигону составил $2\,368 \pm 467$ экз./м² (среднее ± доверительный интервал), средний показатель биомассы – $44,128 \pm 13,919$ г/м². Основной вклад в эти показатели вносит *T. stroemii*. По литературным данным известно, что первоначально биоценоз *T. stroemii* был отмечен только в приобсфорском районе и назывался биоценозом теребеллидного ила. Позже Арнольди отмечал очень высокую роль данного вида в группировке мидиевого ила в нижней сублиторали возле юго-западного берега Крыма. Сообщество *T. stroemii* в Черном море впервые было описано Г. В. Лосовской (Лосовская, 1960) на глубине 50–65 м между мидиевым и фазеолиновым илами у побережья юго-восточного Крыма (Карадаг). Позже исследования Н. Ю. Миловидовой (Миловидова, 1979) выявили, что в том же районе показатели бентоса сообщества *T. stroemii* за 20-летний период не претерпели значительных изменений. В 80–90-е годы прошлого столетия сообщество *T. stroemii* было указано для юго-восточного Крыма (Каркинитский залив) и как отдельный биоценоз в северо-западной части Черного моря и в акватории Керченского пролива (Золотарев и др., 1986; Терентьев, 2014). Позже для этого же района *T. stroemii* упоминался Ю. П. Зайцевым и Б. Г. Александровым (Zaitsev et al., 1998). В наших пробах данный вид встречен на глубинах от 46 до 100 м, где его численность изменялась от 200 до 2 700 экз./м². Вклад в общую численность и биомассу составил 23 и 71 % соответственно.

По нашим данным в акватории бухты Ласпи количество видов полихет на исследованных станциях колеблется от 1 до 15. Наибольшее количество видов отмечено на глубине 46 м, где грунт представлен песком (мелкий, крупный, заиленный) и галькой. На этой глубине по численности и биомассе доминировала *A. claudiae* (64 и 33 % соответственно), для которой характерно обитание на илесто-песчаных и глинистых грунтах, иногда с примесью ракушки (Киселева, 2004; Фроленко и др., 2019).

Наименьшее количество видов обнаружено на глубине 22 м, здесь зарегистрирован только один вид – *M. fragilis*, где грунт представлен песком (мелкий, крупный, заиленный) и галькой.

Виды, характерные для исследуемой акватории, – *P. cirrifera* и *M. longicornis* – встречаются как на мелководье, так и на больших глубинах. К редким видам, обнаруженным только на одной станции, относятся 18 видов полихет.

Следует отметить неравномерное распределение полихет в акватории бухты по глубинам (рис. 2).

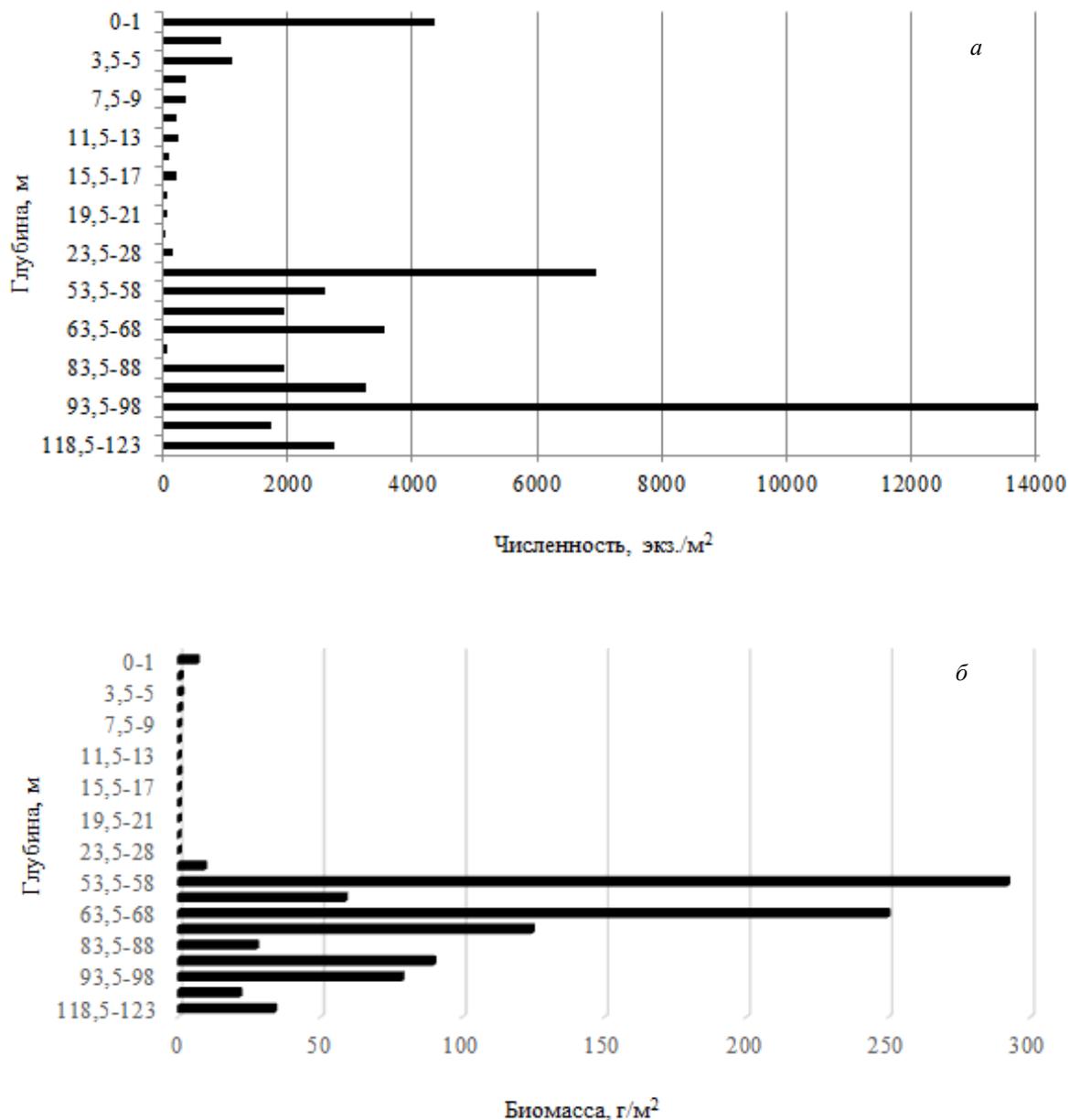


Рис. 2. Численность (а) и биомасса (б) полихет в акватории бухты Ласпи на разных глубинах
 Fig. 2. Number (a) and biomass (b) of polychaetes in the water area of Laspi Bay at different depths

Наибольшая численность отмечена на глубинах 93,5–98 м, где основной вклад в общую численность вносит *P. cirrifera* (55 %), для которой характерно обитание на песчаном, ракушечно-песчаном и илистом грунтах до глубины 116 м (Киселева, 1981; 2004).

Наибольшая биомасса зарегистрирована на глубинах 53,5–58 м, которую формирует относительно крупный вид – *T. stroemii* – 95 % общей биомассы полихет, обнаруженных на данной глубине.

Пятнадцать видов полихет зарегистрированы в прибрежной части акватории бухты Ласпи на глубинах от 0 до 22 м, среди них самый многочисленный – *S. papillocercus*, численность которого на урезе воды достигала 3 524 экз./м², что составило 99 % общей численности полихет, доля биомассы – 68 %. Двенадцать видов отмечены как на мелководье, так и в глубоководной части исследуемой акватории, восемнадцать – на глубинах от 45 до 123 м.

Ранжированный ряд по индексу плотности возглавляют *T. stroemii*, *N. hombergii* и *M. palmata* (рис. 3). Для этих видов характерно обитание на различных грунтах и глубинах (Киселева, 2004). В наших пробах полихеты данного вида встречены на илистых грунтах, на глубинах от 46 до 100 м.

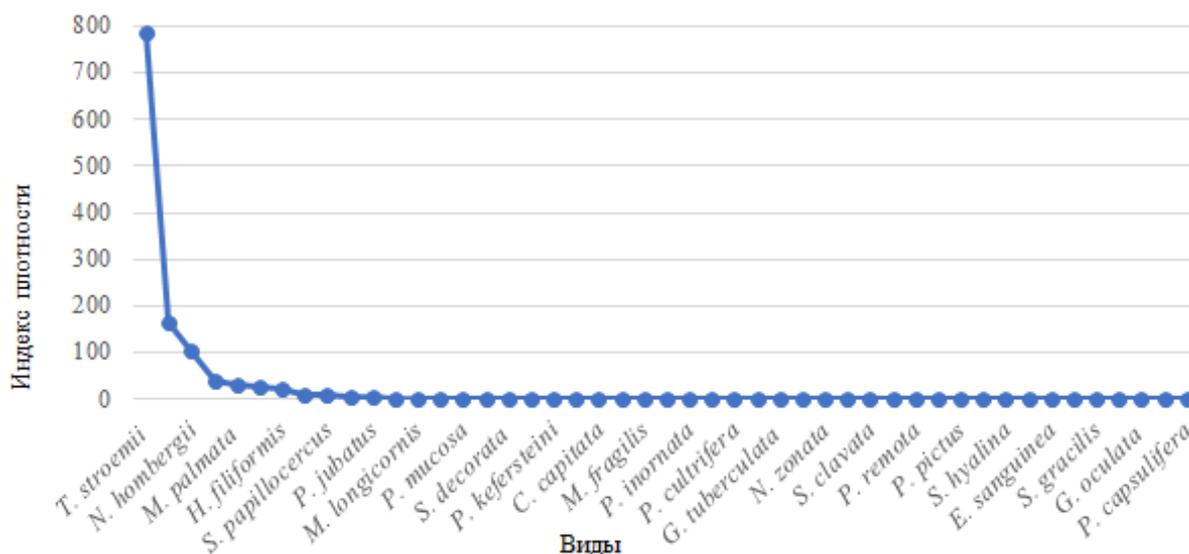


Рис. 3. Ранжированный ряд полихет по индексу плотности
Fig. 3. Ranked polychaetes row by density index

Трофическая структура полихет, обитающих в акватории бухты Ласпи, представлена поли-, фито-, детритофагами, плотоядными и животными, пищевой спектр которых не исследован. Самая многочисленная группа – полифаги, к которой принадлежат 18 видов полихет, на их долю приходится 43 % общего количества зарегистрированных видов. Наименьшее количество видов (2) отмечено в группе детрито- и фитофагов.

Ранжированный ряд по численности также возглавляют полифаги. Формирует этот показатель *T. stroemii* (47,6 %), который относится к собирающим грунтоедом, в его спектр питания входят диатомовые и перидиниевые водоросли, нередко встречаются макрофиты и фораминиферы (Киселева, 2004). Затем следуют детритофаги, лидирует в этой группе *P. cirrifera* (64,7 %), относящийся к собирающим детритофагам. Плотоядные занимают третье место, среди них лидирует *N. hombergii* (66,5 %), питающийся полихетами (*Aricidea daudiae*, *Prionospio* sp., *Nephtys* sp.) и клещами (*Capitognathus* sp.). Наименьшая доля численности в трофической структуре полихет принадлежит фитофагам и животным, пищевой спектр которых не исследован.

Ранжированный ряд по биомассе также возглавляют полифаги. Значительный вклад в этот показатель (87,9 %) вносит *T. stroemii*. Затем следуют плотоядные, лидерство среди них принадлежит *N. hombergii* (72,3 % общей биомассы детритофагов). Самая малая доля биомассы отмечена у детритофагов и животных, пищевой спектр которых не исследован.

Суммарный анализ литературных (Петухов и др., 1991; Ревков и др., 2002) и собственных данных указывает на относительное богатство фауны полихет в акватории бухты Ласпи. За прошедший период обнаружено 64 вида полихет, принадлежащих к 29 семействам и 56 родам. В результате исследований 1983 г. установлено, что в макрозообентосе данной акватории обитает 49 видов донных животных, из них лишь 11 видов полихет, причем 4 вида (*Amphitritides gracilis*, *Capitella minima*, *Glycera tridactyla*, *Lagis koreni*) отмечены только в данный период.

К 1996 г. количество видов макрозообентоса увеличилось более чем в 2,5 раза и достигло 131, из них 44 вида полихет. Восемнадцать видов обнаружены только в данный период исследования. К малочисленным видам в 1996 г. относилось 23 вида полихет: *Hesionura coineaui* (2 экз./м²), *Eteone picta* (2), *H. imbricata* (1), *N. zonata* (5), *Neanthes succinea* (3), *H. diversicolor* (3), *E. longissima* (4), *P. cultrifera* (1), *Typosyllis hyalina* (5), *Exogone gemmifera* (9), *Sphaerosyllis bulbosa* (1), *Microphthalmus* sp. (3), *Protodrilus* sp. (3), *Orbinia latreillii* (2), *Aonides paucibranchiata* (8), *Cirriiformia* sp. (1), *Caulleriella caput-esocis* (3), *Ophelia limacina* (8), *Notomastus profundus* (4), *Polycirrus* sp. (3), *T. stroemii* (38), *Pomatoceros triqueter* (17), Spirorbidae g. sp. (174). Большая часть животных встречена в единичных экземплярах, за исключением *T. stroemii*, *P. triqueter* и Spirorbidae g. sp.

В 2016–2019 гг. число редких видов снизилось до 17: *E. sanguinea*, *E. vittate*, *F. stellaris*, *G. oculata*, *G. tuberculata*, *H. imbricata*, *H. reticulata*, *N. zonata*, *N. profundus*, *P. remota*, *P. dumerilii*, *P. jubatus*, *P. capsulifera*, *S. tentaculate*, *S. triqueter*, *S. shrubsolii*, *S. gracilis*.

Только шесть видов обнаружены во все периоды исследования: *G. tuberculata*, *M. picta*, *N. hombergii*, *P. cultrifera*, *P. mucosa* и *T. stroemii*.

Заключение

Суммарный анализ литературных и собственных данных указывает на относительное богатство фауны полихет в акватории бухты Ласпи. За прошедший период (с 1983 по 2019 гг.) обнаружено 64 вида полихет. Современные исследования показали, что в акватории бухты Ласпи обитает 45 видов полихет. Средний показатель численности полихет по всему полигону составил 2368 ± 467 экз./м², средний показатель биомассы – $44,128 \pm 13,919$ г/м². Основной вклад в эти показатели вносит *Terebellides stroemii*.

Наибольшая численность отмечена на глубине 93,5–98 м, биомасса – на глубине 53,5–58 м. Основной вклад в общую численность вносит *P. cirrifera*, в биомассу – *Terebellides stroemii*.

Ранжированный ряд по индексу плотности возглавляют *T. stroemii*, *N. hombergii* и *M. palmata*.

Трофическая структура представлена поли-, фито-, детритофагами и плотоядными и животными, пищевой спектр которых не исследован. Самая многочисленная группа – полифаги, к которой принадлежат 18 видов, наименьшее количество видов (2) отмечено в группе детрито- и фитофагов.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам отдела экологии бентоса Института биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН за совместную работу и помощь в сборе материала.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН" № 121030100028-0.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Аблязов Э. Р., Болтачев А. Р., Карпова Е. П., Пашков А. Н. [и др.]. Ихтиофауна прибрежной зоны Черного моря в районе бухты Ласпинская (Крым) // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 2. С. 3–17. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.2.01>. EDN: OIPLRP.
- Ациховская Ж. М., Чекменева Н. И. Оценка динамической активности вод района бухты Ласпи (Черное море) // Экология моря. 2002. Вып. 59. С. 5–8. EDN: WIAGPD.
- Золотарев П. Н., Повчун А. С. Макрозообентос глубоководной зоны Каркинитского залива Черного моря // Экология моря. 1986. Вып. 22. С. 48–58. EDN: YQDQSR.
- Киселева М. И. Бентос рыхлых грунтов Черного моря. Киев : Наукова думка, 1981. 165 с.
- Киселева М. И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Черного и Азовского морей. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. 409 с.
- Лосовская Г. В. Распределение и количественное развитие донной фауны Черного моря в районе Карадага // Труды Карадагской биологической станции. 1960. Вып. 16. С. 16–29.
- Мальцев В. И. О возможности применения показателя функционального обилия для структурных исследований зооценозов // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26, № 1. С. 87–89. EDN: YUFLRZ.
- Миловидова Н. Ю. Количественная характеристика макрозообентоса Черного моря в районе Карадага // Гидробиологический журнал. 1979. Т. 15, № 16. С. 21–24.
- Миронова Н. В., Панкеева Т. В. Долговременные изменения пространственного распределения запасов макрофитов в бухте Ласпи (Черное море) // Экосистемы. 2018. Т. 16(46). С. 33–46. EDN: YTUSBF.
- Орехова Н. А., Овсяный Е. И. Органический углерод и гранулометрический состав литоральных донных отложений бухты Ласпи (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 287–299. DOI: <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-287-299>. EDN: KQVNZ.
- Панкеева Т. В., Миронова Н. В. Пространственно-временные изменения макрофитобентоса акватории бухты Ласпи (Крым, Черное море) // Океанология. 2019б. Т. 59, № 1. С. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030-157459193-107>. EDN: WOLBAE.
- Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Новиков Б. А. Опыт картографирования донной растительности (на примере бухты Ласпи, Черное море) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6(16), вып. 4. С. 154–169. DOI: <https://doi.org/10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169>. EDN: SRGYKG.
- Панкеева Т. В., Миронова Н. В., Пархоменко А. В. Донные природные комплексы бухты Ласпи (Черное море, г. Севастополь) // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2019а. Т. 5(15), вып. 4. С. 319–332. EDN: WKIBET.
- Петухов Ю. М., Шаловенков Н. Н., Ревков Н. К., Петров А. Н. Анализ пространственного распределения макрозообентоса в черноморской бухте Ласпи с использованием методов многомерной статистики // Океанология. 1991. Т. 31, вып. 5. С. 780–786.
- Ревков Н. К., Николаенко Т. В. Биоразнообразие зообентоса прибрежной зоны Южного берега Крыма (район бухты Ласпи) // Биология моря. 2002. Т. 28, № 3. С. 170–180. EDN: ZIUTDJ.

- Терентьев А. С. Биоценоз *Terebellides stroemii* в Керченском предпроливье Черного моря // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2014. Т. 119, № 3. С. 38–45. EDN: TJOMEB.
- Фроленко Л. Н., Живоглядова Л. А., Ковалев Е. А. Результаты исследований зообентоса северо-восточной части Черного моря по данным 2016–2017 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2019. Т. 2, № 4. С. 85–97. DOI: https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_85. EDN: CYJPCE.
- Zaitsev Yu. P., Alexandrov B. G. Black Sea biological diversity: Ukraine. New York: United Nations Publications. 351 p. (Black Sea Environmental Series ; vol. 7). 1998.

References

- Abliazov, E. R., Boltachev, A. R., Karpova, E. P., Pashkov, A. N. et al. 2021. Ichthyofaunal of the Black Sea coastal zone in the Laspi Bay area (Crimea). *Marine Biological Journal*, 6(2), pp. 3–17. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2021.06.2.01>. EDN: OIILRP. (In Russ.)
- Atsikhovskaya, Zh. M., Chekmeneva, N. I. 2002. Evaluation of the dynamic activity of the waters of the Laspi Bay area (Black Sea). *Ekologiya moray*, 59, pp. 5–8. EDN: WIAGPD. (In Russ.)
- Zolotarev, P. N., Povchun, A. S. 1986. Macrozoobenthos of the deep-water zone of Karkinitzky Bay of the Black Sea. *Ekologiya moray*, 22, pp. 48–58. EDN: YQDQSR. (In Russ.)
- Kiseleva, M. I. 1981. Benthos of loose soils of the Black Sea. Kiev. (In Russ.)
- Kiseleva, M. I. 2004. Polychaetes (polychaeta) of the Azov and Black Seas. Apatity. (In Russ.)
- Losovskaya, G. V. 1960. Distribution and quantitative development of the benthic fauna of the Black Sea in the Karadag area. *Trudy Karadagskoy biologicheskoy stantsii*, 16, pp. 16–29. (In Russ.)
- Mal'tsev, V. I. 1990. On the possibility of using the indicator of functional abundance for structural studies of zoocenoses. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 26(1), pp. 87–89. EDN: YUFLRZ. (In Russ.)
- Milovidova, N. Yu. 1979. Quantitative characteristics of the macrozoobenthos of the Black Sea in the Karadag area. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 15(16), pp. 21–24. (In Russ.)
- Mironova, N. V., Pankeyeva, T. V. 2018. Long-term changes in the spatial distribution of macrophyte stocks in Laspi Bay (the Black Sea). *Ekosistemy*, 16(46), pp. 33–46. EDN: YTUSBF. (In Russ.)
- Orehkova, N. A., Ovsyany, E. I. 2020. Organic carbon and particle-size distribution in the littoral bottom sediments of Laspi Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 36(3), pp. 287–299. DOI: <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-3-287-299>. EDN: KQVNJZ. (In Russ.)
- Pankeeva, T. V., Mironova, N. V. 2019. Spatial-temporal changes of macrophytobenthos in Laspi Bay (the Crimea, Black Sea). *Okeanologiya*, 59(1), pp. 93–107. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030-157459193-107>. EDN: WOLBAE. (In Russ.)
- Pankeeva, T. V., Mironova, N. V., Novikov, B. A. 2020. Experience in mapping bottom vegetation (on the example of Laspi Bay, the Black Sea). *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*, 6(16–4), pp. 154–169. DOI: <https://doi.org/10.37279/2309-7663-2020-6-4-154-169>. EDN: SRGYKG. (In Russ.)
- Pankeeva, T. V., Mironova, N. V., Parkhomenko, A. V. 2019a. Bottom natural complexes of Laspi Bay (the Black Sea, Sevastopol). *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 5(15–4), pp. 319–332. EDN: WKIBET. (In Russ.)
- Petukhov, Yu. M., Shalovenkov, N. N., Revkov, N. K., Petrov, A. N. 1991. Analysis of the spatial distribution of macrozoobenthos in the Black Sea Laspi Bay using multivariate statistics methods. *Okeanologiya*, 31(5), pp. 780–786. (In Russ.)
- Revkov, N. K., Nikolaenko, T. V. 2002. Zoobenthos biodiversity in coastal waters of the Southern Crimea (Laspi Bay). *Russian Journal of Marine Biology*, 28(3), pp. 170–180. EDN: ZIUTDJ. (In Russ.)
- Terentyev, A. S. 2014. Biocenosis of *Terebellides stroemii* in the Black Sea area before the Kerch strait. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Biological series*, 119(3), pp. 38–45. EDN: TJOMEB. (In Russ.)
- Frolenko, L. N., Zhivoglyadova, L. A., Kovalev, E. A. 2019. Results of the zoobenthos studies in the north-eastern Black Sea according to the data obtained in 2016–2017. *Aquatic Bioresources & Environment*, 2(4), pp. 85–97. DOI: https://doi.org/10.47921/2619-1024_2019_2_4_85. EDN: CYJPCE. (In Russ.)
- Zaitsev, Yu. P., Alexandrov, B. G. 1998. Black Sea biological diversity: Ukraine. New York. (Black Sea Environmental Series; vol. 7).

Сведения об авторе

Копий Вера Георгиевна – пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, Россия, 299011;
Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, канд. биол. наук,
ст. науч. сотрудник; e-mail: verakopiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-3409>

Vera G. Kopyi – 2 Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 299011; Kovalevsky Institute of Biology
of the Southern Seas RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher;
e-mail: verakopiy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4777-3409>

УДК 574.24+582.261

Экспериментальная оценка токсикорезистентности бентосной микроводоросли *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) при воздействии ионов меди

А. Н. Петров*, Е. Л. Неврова

*Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь, Россия;
e-mail: alexpet-14@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0137-486X>

Информация о статье Реферат

Поступила
в редакцию
20.09.2022;

получена
после доработки
16.11.2022;

принята к публикации
22.11.2022

Ключевые слова:

токсикология;
эксперимент;
пороговые
концентрации;
бентосные
диатомовые;
клонная культура;
Черное море

При усилении антропогенной нагрузки на экосистему прибрежных зон моря возрастает актуальность оценки состояния сообществ планктона и бентоса. В ходе исследования определена динамика численности клеток клоновой культуры *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) при воздействии $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ разной концентрации ($32\text{--}1024 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) в условиях 10-суточных экспериментов. В контроле и при низкой концентрации Cu^{2+} доля живых клеток практически не изменяется. Пороговая концентрация ионов меди для выживания *T. excentrica* равна $128 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. При более высоких концентрациях Cu^{2+} ($256\text{--}1024 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) отмечено резкое угнетение и гибель культуры уже в течение 1–3-х суток. Прирост абсолютной численности клеток при низких концентрациях меди ($32\text{--}64 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) описывается сигмоидной кривой отклика тест-объекта. Значения прироста возрастают в 1–5-е сутки в 4–8 раз и снижаются к 10-м суткам на 25–30 %. При концентрациях Cu^{2+} $128\text{--}256 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ положительный прирост численности клеток в 1–5-е сутки отсутствует, в последующие дни снижается в 2 раза либо падает до нуля. Интенсивность удельного прироста достоверно снижается в зависимости от увеличения концентрации токсиканта. Установлено, что в 1–5-е сутки удельный прирост положительный в диапазоне концентраций меди $32\text{--}128 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ и отрицательный – при концентрациях $256 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ и выше. В период 5–10-х суток для всех концентраций токсиканта значения удельного прироста отрицательные. Полученные результаты позволяют рекомендовать *T. excentrica* в качестве перспективного тест-объекта для токсикологических экспериментов.

Для цитирования

Петров А. Н. и др. Экспериментальная оценка токсикорезистентности бентосной микроводоросли *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) при воздействии ионов меди. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 1. С. 78–87. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-78-87.

Experimental evaluation of toxic resistance of benthic microalgae *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) under the copper ions impact

Alexey N. Petrov*, Elena L. Nevrova

*Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Sevastopol, Russia;
e-mail: alexpet-14@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0137-486X>

Article info

Received
20.09.2022;

received
in revised
16.11.2022;

accepted
22.11.2022

Key words:

toxicology;
experiment;
threshold concentrations;
benthic diatom algae;
clonal strain;
Black Sea

Abstract

With an increase in anthropogenic pressure on the ecosystem of the coastal zones of the sea, the relevance of assessing the state of plankton and benthos communities also increases. In the course of the study, the dynamics of the number of cells of the clone culture *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) has been determined under the influence of $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ of various concentrations ($32\text{--}1024 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) under the conditions of 10-day experiments. In the control and at a low concentration of Cu^{2+} , the proportion of living cells remains almost unchanged. The threshold concentration of copper ions for the survival of *T. excentrica* is $128 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. At higher concentrations of Cu^{2+} ($256\text{--}1024 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), a sharp inhibition and death of the culture has been noted already within 1–3 days. The increase in the absolute number of cells at low concentrations of copper ($32\text{--}64 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) is described by the sigmoid response curve of the test-object. The growth values increase by 4–8 times on the 1st–5th day and decrease by 25–30 % by the 10th day. At Cu^{2+} concentrations of $128\text{--}256 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, there is no positive increase in the number of cells on days 1–5; on subsequent days, it decreases by 2 times or drops to zero. The intensity of the specific cell growth significantly decreases depending on the increase in the concentration of the toxicant. It has been found that on days 1–5, the specific increase is positive in the range of copper concentrations of $32\text{--}128 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and negative – at concentrations of $256 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ and higher. In the period of 5–10 days, for all concentrations of the toxicant, the values of the specific increase are negative. The obtained results make it possible to recommend *T. excentrica* as a promising test object for toxicological experiments.

For citation

Petrov, A. N. et al. 2023. Experimental evaluation of toxic resistance of benthic microalgae *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 (Bacillariophyta) under the copper ions impact. *Vestnik of MSTU*, 26(1), pp. 78–87. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-1-78-87.

Введение

В современных условиях усиления антропогенной нагрузки на экосистему прибрежных зон моря, в том числе у берегов Крыма, возрастает актуальность оценки состояния сообществ планктона и бентоса. Одной из групп экологически наиболее опасных техногенных поллютантов являются тяжелые металлы, в частности медь, соединения которой накапливаются в донных отложениях, особенно в прибрежных и портовых акваториях. Ежегодно в водоемы с коммунальными и промышленными стоками поступает до 90 тыс. т меди (Miazek et al., 2015). Значительная доля медьсодержащих поллютантов присутствует в противообрастающих красках-биоцидах, которыми покрывают днища судов и различные гидротехнические объекты (Burgess et al., 2009; Crespo et al., 2013; Неврова и др., 2015).

Значимость соединений меди как в биогеохимических циклах в морской среде, так и в метаболизме гидробионтов определила выбор сульфата меди в качестве модельного токсиканта для экспериментов. В повышенных концентрациях ионы меди становятся остротоксичными для большинства морских и пресноводных гидробионтов, относясь к наиболее экологически опасным веществам, наряду с ионами Hg, Cd, Pb и Zn (Проблемы химического загрязнения..., 1985; Принципы и методы..., 2016). В микроколичествах ионы меди являются необходимыми для гидробионтов эссенциальными элементами и играют ключевую роль в физиологических процессах в клетках водорослей (азотный обмен, перенос электронов в дыхательной цепи митохондрий), а также входят в состав активных центров многих ферментов (пластоцианин, цитохром оксидаза, аскорбатоксидаза, супероксиддисмутазы и др.) (Levy et al., 2007; Принципы и методы..., 2016; Miazek et al., 2015).

Величина предельно допустимой концентрации (ПДК) соединений меди для морских донных осадков неизвестна, а для водных масс такое значение принято равным $5 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$. Отметим, что содержание меди в прибрежных морских акваториях может составлять $50\text{--}100 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ (Маркина и др., 2019). Для бентосных диатомовых более значимым является содержание меди не в водных массах, а в донных отложениях, поскольку рыхлые грунты интенсивно аккумулируют поллютанты, а клетки микроводорослей либо прикрепляются к поверхности субстрата, либо обитают в его толще. В рыхлых грунтах черноморских акваторий содержание меди может достигать $0,4\text{--}11,2 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ (Овсяный и др., 2003), а в закрытых и полузакрытых бухтах, загрязненных техногенными поллютантами – до $20\text{--}37 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$ сухого осадка (Петров и др., 2004; Burgess et al., 2009).

Вследствие этого медь, наряду с другими тяжелыми металлами в донных осадках, относится к ключевым факторам, оказывающим значимое влияние на структуру таксоценоза и пространственное распределение донных диатомовых на илистых грунтах в техногенно загрязненных морских акваториях (Петров и др., 2003; 2005; Неврова и др., 2015).

К настоящему времени накоплены данные по оценке воздействия соединений меди на морские микроводоросли, но в подавляющем большинстве они основаны на использовании планктонных форм (благодаря относительной простоте их учета в ходе экспериментов) (Cid et al., 1995; Маркина и др., 2011; Crespo et al., 2013; Leung et al., 2017). В то же время бентосные диатомовые, в силу тесной приуроченности к субстрату и относительно малой подвижности, более объективно реагируют на степень загрязнения среды обитания. В связи с этим оценка изменений физиологических параметров донных диатомовых (рост клеток, размножение, количественное развитие популяций) под воздействием различных поллютантов с большей надежностью может отражать влияние неблагоприятных экологических факторов по сравнению с планктонными видами (Маркина, 2009; Неврова и др., 2015; Романова и др., 2017). Указанные особенности определяют актуальность расширения исследований бентосных диатомовых как тест-объектов при опосредованной оценке качества морской среды (Филенко и др., 2007; Markina et al., 2006; Маркина, 2009; Anantharaj et al., 2011; Принципы и методы..., 2016; Романова и др., 2017). Результаты оценки реакции планктонных водорослей *Cylindrotheca closterium*, *Ditylum brightwellii*, *Phaeodactylum tricorutum*, *Porphyridium purpureum* и др. на воздействие Cu^{2+} выявляют выраженную специфичность пороговой резистентности для различных видов (Florence et al., 1986; Cid et al., 1995; Rijstenbil et al., 2002; Markina et al., 2006; Маркина и др., 2011; 2019).

Выбор для эксперимента диатомовой водоросли *Thalassiosira excentrica* Cleve 1903 обусловлен следующими причинами: крупный размер клеток, что облегчает их учет при фотофиксации и оценке прижизненного состояния; сравнительная простота при культивировании; высокая скорость вегетативного размножения и бенто-планктонный образ жизни. Ранее нами была подтверждена статистическая значимость ($p < 0,05$) результатов оценки равномерности распределения клеток данного вида в экспериментальном сосуде и показателей развития микроводорослей на основе анализа небольшого количества полей зрения (Петров и др., 2020).

Целью работы является определение пороговой концентрации ионов меди для выживания и прироста численности клеток клоновой культуры морской бентосной диатомовой водоросли *T. excentrica* и степени пригодности данного вида в качестве перспективного тест-объекта для экотоксикологии.

Материалы и методы

В токсикологических экспериментах использована клоновая культура бентосной диатомовой водоросли *Thalassiosira excentrica*, выращенная путем изолирования одиночной клетки под бинокулярным МБС-10 (Россия, ЛЗОС) при увеличении $\times 40$ с последующей семикратной промывкой культуральной средой (Гайсина и др., 2008; Романова и др., 2017; Петров и др., 2020). Клоновая линия выделена из состава микрофитобентоса рыхлого субстрата, отобранного в бухте Ласпи (юго-западная часть Крыма, $44^{\circ}25'10''\text{N}$, $33^{\circ}42'27''\text{E}$) на глубине 9 м. Вид морской, бенто-планктонный, встречается часто в прибрежных районах; образует колонии по 4–8 клеток, соединенных тонкими прозрачными тяжами. Створки дисковидные, диаметром около 40 μm . Структура створки состоит из округло-полигональных ареол, расположенных в тангентальных рядах, 8–9 в 10 μm (рис. 1). Размеры клеток указаны на момент начала культивирования.

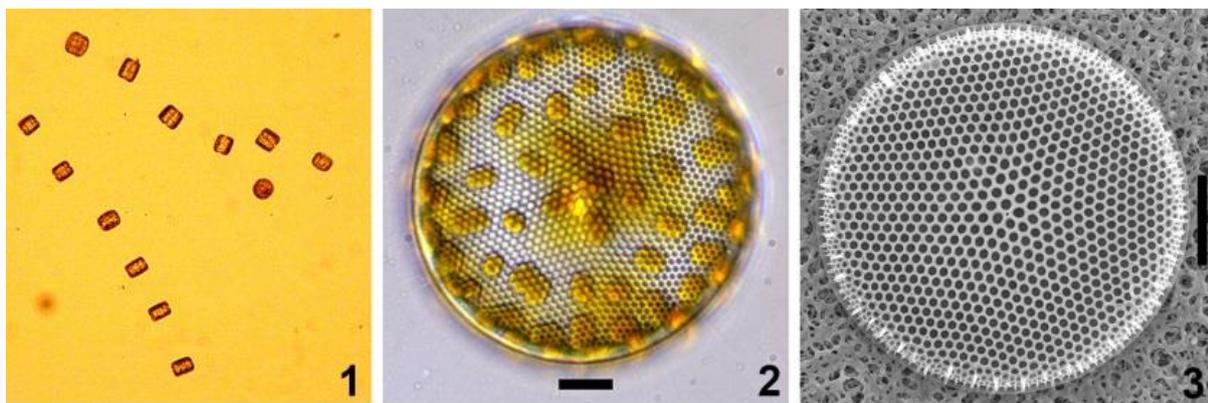


Рис. 1. Морская диатомовая *T. excentrica*, использованная в эксперименте: 1 – колония живых клеток (СМ $\times 10$); 2 – живая клетка (СМ $\times 60$, масштаб 10 μm); 3 – створка, вид снаружи (СЭМ $\times 2\,000$)

Fig. 1. Marine diatom *T. excentrica* used in the experiment: 1 – alive colony (LM $\times 10$); 2 – alive cell (LM $\times 60$, scale bar 10 μm); 3 – valve external view (SEM $\times 2\,000$)

Клоновую линию содержали на питательной среде Гольдберг, модифицированной для оптимального культивирования морских бентосных диатомовых, при естественном освещении и постоянной температуре $22 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Морскую воду для приготовления среды отбирали в 12-мильной зоне у побережья Крыма, фильтровали через фильтр 0,45 μm , затем трижды пастеризовали при температуре $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ и вносили питательные вещества в соответствии с протоколом (Петров и др., 2020). В ходе культивирования и эксперимента фотографии живых и мертвых клеток получали под инвертированным световым микроскопом (СМ) Nikon Eclipse с объективом Plan Fluor $\times 60$ OFN25 и камерой Infinity3-6URC (Nikon Corp., Япония). Идентификацию очищенных створок проводили под СМ Carl Zeiss Primostar Plus с объективом Plan-Achroplan $\times 100$, а также под сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) Hitachi SU3500 (Япония).

В каждую чашку Петри диаметром 90 мм вносили последовательно по схеме определенное количество питательной среды, стокового раствора $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 1 мл инокулята клоновой культуры *T. excentrica*, чтобы общий объем жидкости составил 30 мл. Протокол эксперимента подробно описан ранее (Неврова и др., 2022). В ходе эксперимента проводили тестирование *T. excentrica* на воздействие возрастающих концентраций токсиканта: 32, 64, 128, 256, 320, 512 и 1 024 $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (в пересчете на ионы меди) по сравнению с контролем (питательная среда Гольдберг без добавления токсиканта). Чашки Петри герметизировали пленкой Parafilm®, чтобы исключить контаминацию и испарение экспериментального раствора. Продолжительность экспериментов составляла 10 суток, периоды экспозиции – 1, 3, 5, 7 и 10 суток. Данные временные периоды выбраны с целью возможности оценить хронический аспект токсичности сульфата меди, а также детально рассмотреть динамику отклика клоновой культуры *T. excentrica* на воздействие различных концентраций токсиканта. Каждый вариант концентрации ионов меди исследовали в 3-кратной повторности, включая контроль.

Реакцию клоновой линии на воздействие разных концентраций Cu^{2+} определяли визуально по микрофотографиям на основе подсчета доли живых клеток (%). Контроль прижизненного состояния оценивали по форме и целостности панциря, неизменности структуры и цвета хлоропластов, разделению клеток после вегетативного деления; в случае же лизиса клеточного содержимого, резкого потемнения хлоропластов, раскрытия панциря – клетку определяли как мертвую (рис. 2). Численность живых и мертвых клеток в каждый период экспозиции определяли по усредненным данным, полученным при фотографировании 10–15 случайных полей зрения.

Для всех концентраций меди, включая контроль, также рассчитывали изменение абсолютной численности живых клеток на разных этапах эксперимента и удельную скорость прироста (отмирания) численности клеток (кл.·сут⁻¹) как одного из базовых показателей, используемых в токсикологии для оценки состояния популяций микроводорослей (Филенко и др., 2007; Маркина и др., 2019). Скорость прироста численности клеток (v), число клеточных делений в сутки рассчитывали по формуле

$$v = \frac{N_{(t+\Delta t)} - N_t}{\Delta t N_t},$$

где N_t – средняя численность клеток в культуре в момент времени t (первые сутки эксперимента); $N_{(t+\Delta t)}$ – средняя численность клеток в культуре в момент времени $t + \Delta t$ (3, 5, 7 и 10-е сутки); Δt – период экспозиции (сутки).

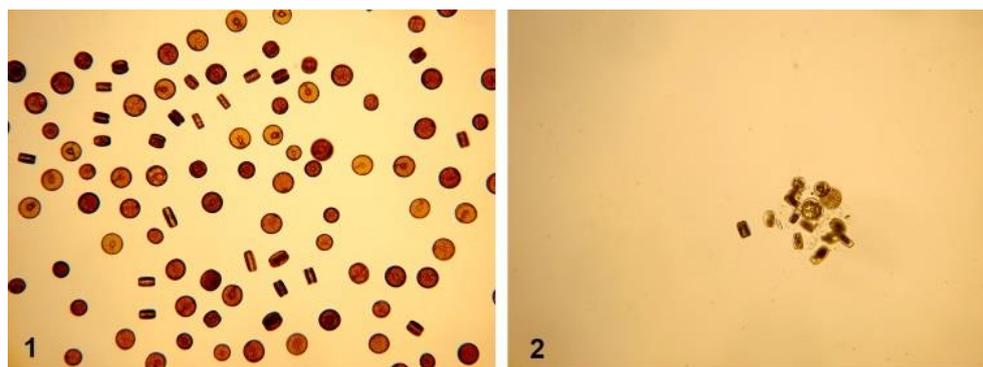


Рис. 2. Вид живых (1) и мертвых (2) клеток культуры *T. excentrica* в эксперименте
Fig. 2. Shape and condition of alive (1) and dead cells (2) of strain *T. excentrica* in the experiment

Для статистической обработки результатов экспериментов применены стандартные алгоритмы вариационного параметрического и рангового анализов¹. Сравнение дисперсий и достоверности различий средних значений параметров проведено для уровня значимости $p < 0,05$ на основе параметрических критериев Фишера и Стьюдента (при нормальном распределении вариант в выборках). При распределении вариант, отличном от нормального, применены непараметрические критерии Холма – Сидака (Holm – Sidak test) и Данна (Dunn's test). Значения параметров количественного развития культуры клеток представлены в виде средней арифметической со стандартной ошибкой средней (SE) по выборкам.

Результаты и обсуждение

Данная работа является продолжением наших исследований по оценке видоспецифичной резистентности культур черноморских бентосных диатомовых, принадлежащих к различным классам Bacillariophyta, и определению пороговых концентраций ионов меди в ходе 10-дневных токсикологических тестов (Романова и др., 2017; Петров и др., 2020; Неврова и др., 2022). Отметим, что помимо получения новых данных о диапазонах толерантности разных видов бентосных Bacillariophyta, исследуются и мало разработанные методические вопросы по культивированию клоновых культур диатомовых, критериям визуального учета отклика живых клеток тест-объектов при различных сроках экспозиции и концентрациях токсиканта в культуральной среде.

По результатам 10-суточных тестов установлено, что на протяжении первых 5 суток в контроле и при концентрациях ионов меди 32 и 64 мкг·л⁻¹ доля живых клеток *T. excentrica* практически не меняется, оставаясь на уровне 97–99 %, и только начиная с 7-х суток доля клеток немного снижается: до 91–92 % (в контроле и для концентрации 32 мкг·л⁻¹) и до 77 % (для 64 мкг·л⁻¹) (таблица).

На протяжении первых 7 суток эксперимента различия в средних значениях доли живых клеток (%) между контролем и чашками с концентрациями ионов меди 32 и 64 мкг·л⁻¹ статистически незначимы ($p = 0,27–0,53$). Статистически высоко значимые отличия ($p < 0,001$) между контролем и концентрацией Cu^{2+} 64 мкг·л⁻¹ отмечены только на 10-е сутки. Различия в значениях доли живых клеток между контролем и концентрацией 128 мкг·л⁻¹ также были высоко значимыми ($p < 0,0001$) уже начиная с 5-х суток экспозиции. Именно при повышении концентрации ионов меди до 128 мкг·л⁻¹ отмечалось резкое увеличение числа мертвых клеток в полях просмотра, а доля живых клеток на 7-е и 10-е сутки снижалась в среднем до 54 и 42 % соответственно. Данные результаты свидетельствуют о том, что статистически значимое ($p < 0,008$) токсическое действие ионов меди существенно сказывается на состоянии клеток *T. excentrica* уже начиная с концентрации 64 мкг·л⁻¹. При 128 мкг·л⁻¹ интенсивность отмирания клеток в тест-культуре резко

¹ SigmaPlot 14.5 / Systat Software Inc. 2020. Mode of Access: <https://sigmaplot.software.informer.com/14.5/>.

усиливается, что позволяет считать данную концентрацию токсиканта пороговой для выживания данного вида диатомовых (см. таблицу).

Таблица. Изменение доли живых клеток (среднее значение \pm SE, %) в культуре *T. excentrica* в ходе эксперимента при разных концентрациях токсиканта

Table. Change in the share of alive cells (mean value \pm SE, %) in strain *T. excentrica* during the experiment at different concentrations of toxicant

Концентрации токсиканта Cu^{2+} , $\text{мкг}\cdot\text{л}^{-1}$	Периоды экспозиции, сут				
	1	3	5	7	10
Контроль	99 ± 3	99 ± 4	99 ± 4	96 ± 5	92 ± 4
32	99 ± 3	99 ± 3	97 ± 5	94 ± 4	91 ± 5
64	98 ± 7	97 ± 8	97 ± 6	89 ± 9	77 ± 8
128	95 ± 9	93 ± 10	72 ± 10	54 ± 12	42 ± 11
256	97 ± 13	14 ± 5	8 ± 3	0	0
320	98 ± 12	6 ± 2	3 ± 2	0	0
384	97 ± 6	0	0	0	0
512	96 ± 8	0	0	0	0

При концентрациях ионов меди $256 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ доля живых клеток в культуре уже на 3–5-е сутки снизилась в 6–10 раз, по сравнению с таковой при концентрациях в диапазоне $32\text{--}128 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$. При промежуточных концентрациях 320 и $380 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ уже на 3-е сутки отмечено резкое угнетение клоновой культуры *T. Excentrica*. На 5-е сутки доля живых клеток в экспериментальных сосудах снижалась практически до 0 %. При повышении концентрации до 512 и $1\ 024 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$ доля живых клеток составляла 0 % уже к 3-м суткам (см. таблицу).

При оценке токсического влияния меди на состояние культуры *T. excentrica* важным показателем также является изменение абсолютной численности живых клеток в ходе эксперимента (рис. 3). Отметим, что предшествующие результаты анализа культуры *T. excentrica* показали, что все попарные различия по средней численности клеток данного вида между тремя повторностями недостоверны как на 1-е, так и на 5-е сутки экспозиции, т.е. вариативность средней численности клеток в разных повторностях эксперимента не выходит за пределы статистической погрешности (Петров и др., 2020). Данный факт позволяет рассматривать все повторности (случайные выборки клеток) как соответствующие одной исходно взятой совокупности со сходным характером вариативности показателей, что является важным условием для корректного сравнения отличий в абсолютной численности клеток в чашках на разных стадиях эксперимента и при разных концентрациях токсиканта.

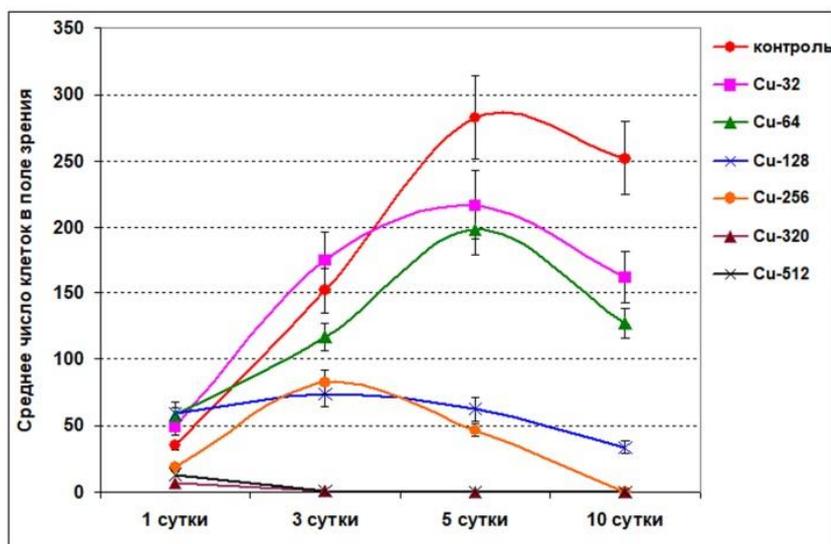


Рис. 3. Изменение абсолютной численности живых клеток *T. excentrica* (среднее значение \pm SE) в ходе эксперимента при разных концентрациях токсиканта

Fig. 3. Change in the absolute number of live cells of *T. excentrica* (mean value \pm SE) during the experiment at different concentrations of toxicant

Очевидно, что в контроле и при малых концентрациях меди ($32\text{--}64 \text{ мкг}\cdot\text{л}^{-1}$) характер прироста численности клеток *T. excentrica* в целом соответствует классической сигмовидной кривой отклика тест-

объекта в токсикологическом опыте. В период 1–5-х суток абсолютная численность клеток (среднее значение по 10–28 полям просмотра) возрастает в 4–8 раз, достигая максимума. В последующий период за счет негативного влияния токсиканта, а также старения культуры численность клеток несколько снижается: на 10 % (для контрольной чашки) и на 25–30 % (для концентраций 32–64 мкг·л⁻¹). При более высоких концентрациях меди (128–256 мкг·л⁻¹) статистически значимого устойчивого роста численности в период 1–5-х суток не наблюдается ($0,07 < p < 0,72$). В последующий период (5–10-е сутки) численность живых клеток двукратно снижается при концентрации 128 мкг·л⁻¹ и падает до нуля (при 256 мкг·л⁻¹). При наиболее высоких концентрациях 512 и 1 024 мкг·л⁻¹ численность живых клеток в культуре снижается до нуля уже к 3-м суткам (см. рис. 3). На 5–10-е сутки различия между средними значениями численности клеток при сравнении концентраций 64 и 128 мкг·л⁻¹ высоко значимы ($p = 0,009–0,0004$), что также служит подтверждением, что данный диапазон концентраций ионов меди является пороговым для выживания тестируемого вида диатомовой водоросли.

Исследован еще один тип отклика *T. excentrica* на токсическое воздействие ионов меди – изменение в ходе экспозиции среднего числа клеточных делений в сутки (v); сопоставлены средние значения ($v \pm SE$) удельного прироста численности клеток в тест-культуре при разных концентрациях токсиканта (рис. 4).

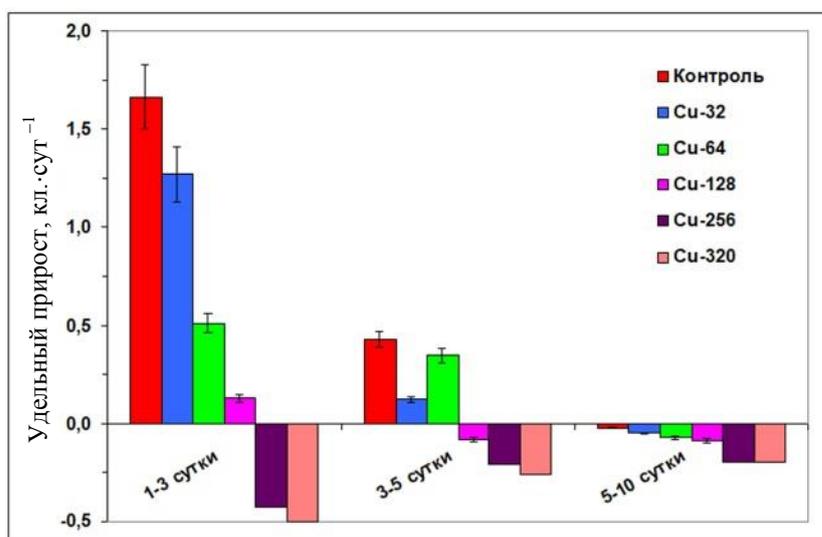


Рис. 4. Изменение удельного прироста численности клеток *T. excentrica* (v , кл.·сут⁻¹) при различных концентрациях ионов меди в разные периоды эксперимента
Fig. 4. Change of the specific growth rate in the number of *T. excentrica* cells (v , cells·day⁻¹) at various concentrations of copper ions and in different stages of the experiment

Установлено, что в период до 3 суток культура клеток характеризуется положительным удельным приростом клеток в диапазоне концентраций Cu²⁺ от 32 до 128 мкг·л⁻¹. Наибольший удельный прирост выявлен в контроле (1,67 делений в сутки) и при концентрациях меди 32 мкг·л⁻¹ (1,27 делений в сутки). При пороговой концентрации токсиканта (128 мкг·л⁻¹) скорость деления клеток *T. excentrica* в первые трое суток опыта еще сохраняла положительную динамику (0,13 делений в сутки), но была ниже в 12 раз по сравнению с контролем. При концентрации ионов меди 256 мкг·л⁻¹ и выше прирост численности становится отрицательным (рис. 4).

В период 3–5-х суток величина удельного прироста сохранялась положительной только для низких концентраций меди (32–64 мкг·л⁻¹), хотя и была в несколько раз ниже, чем в период 1–3-х суток. При концентрации 128 мкг·л⁻¹ прирост уже становился отрицательным. Отметим, что удельная скорость прироста численности клеток снижалась в течение эксперимента даже в контроле, а к 10-м суткам падала практически до нуля, что объясняется старением культуры и истощением питательных веществ в экспериментальном сосуде. В период 5–10-х суток для всех тестируемых концентраций токсиканта выявлены отрицательные значения удельного прироста численности клеток *T. excentrica* в культуре (т. е. отмирает клеток больше, чем появляется новых в ходе делений).

По результатам наших экспериментов у бентосной диатомовой *T. excentrica* выявлена более высокая резистентность к воздействию ионов меди по сравнению с данными других авторов по тестированию преимущественно планктонных видов микроводорослей. Так, при изучении воздействия хлорида меди на выживание и размножение *Scenedesmus quadricaudata* (Turpin) Brebisson 1835 установлено, что заметное снижение общей численности и доли живых клеток наблюдалось при концентрации меди 10–100 мкг·л⁻¹ на экспоненциальной фазе роста культуры (10–14-е сутки) (Филенко и др., 2007). Уже при концентрациях меди 1–10 мкг·л⁻¹ доля активно размножающихся клеток не превышала 10 %, а остальная часть культуры находилась в покоящейся стадии, не изменяя показатели прироста численности клеток. При тестировании

влияния ионов меди на микроводоросль *Porphyridium purpureum* (Bory) K. M. Drew et R. Ross 1965 показано (Маркина и др., 2019), что при концентрациях токсиканта 50–100 мкг·л⁻¹ уже на 4-е сутки эксперимента наблюдалось выраженное угнетение роста популяции и снижение содержания в клетках фотосинтетических пигментов по сравнению с контролем. Для бентосной диатомовой *Amphora coffeaeformis* (C. Agardh) Kützing 1844 выявлено, что токсическое воздействие тяжелых металлов (медь, свинец, кадмий) наблюдается уже при концентрации 0,02 мкг·л⁻¹, когда отмечается подавление роста клеток и разрушение клеточных мембран, что приводит к уменьшению содержания хлорофилла (Anantharaj et al., 2011).

Установлено, что техногенно загрязненные бухты региона Севастополя характеризуются высоким содержанием меди и кадмия в водной толще: от 7,07 до 22,56 мкг·л⁻¹ Cu²⁺ и 0,13–1,74 мкг·л⁻¹ Cd²⁺, вследствие чего в произрастающих в этом районе макрофитах накапливается значительное количество токсикантов: 3,38–14,96 мг Cu²⁺ на 1 кг и 0,12–1,13 мг Cd²⁺ на 1 кг сухой массы таллома (Niemiec et al., 2015). Столь высокие значения уровней аккумуляции ионов тяжелых металлов могут нести потенциальные угрозы для гидробионтов, вовлеченных в трофические цепи прибрежной морской экосистемы, в которых бентосные диатомовые являются ведущим первичным звеном.

С учетом вышесказанного следует отметить, что угнетение роста численности и физиологического состояния клеток *T. excentrica* и других видов диатомовых может быть вызвано как негативным воздействием ионов меди на фотосинтетический аппарат и процессы синтеза аминокислот, влияющих на рост популяции (Cid et al., 1995; Kim et al., 2017; Leung et al., 2017), так и подавлением вегетативного размножения клеток (Филенко и др., 2007). При этом повышенная резистентность (по сравнению с планктонными видами) бентосной *T. excentrica* к токсическому эффекту меди может быть обусловлена наличием у клеток силифицированного панциря, снабженного сложной многоуровневой системой ареол, снижающих токсичное воздействие на клетку ионов меди, поступающих из внешней среды. Подобные морфологические адаптации могут обеспечивать устойчивое развитие колоний бентосных диатомовых на рыхлых субстратах, в которых уровни содержания токсиканта, как правило, значительно выше, чем в водной толще (Levy et al., 2007; Niemiec et al., 2015; Kim et al., 2017). Выявленная у *T. excentrica* более высокая токсикорезистентность может быть также связана с ее обитанием при черноморской солености до 18 ‰, поскольку в морской воде атомы хлора могут замещать ионы меди в процессе образования хелатных комплексов, в целом менее токсичных по сравнению со свободными ионами металлов. Защитной реакцией на повышенное содержание меди в среде может служить и дополнительное выделение клетками диатомовых водорослей полисахаридной слизи, что является одним из универсальных механизмов детоксикации тяжелых металлов (Crespo et al., 2013; Miazek et al., 2015).

Заключение

По результатам изучения отклика клоновой культуры морской бентосной диатомовой *T. excentrica* на воздействие широкого диапазона концентрации ионов меди установлено, что при концентрациях Cu²⁺ 32–64 мкг·л⁻¹ доля живых клеток достоверно снижается по отношению к контролю только на 10-е сутки эксперимента. Характер прироста абсолютной численности клеток *T. excentrica* при данных концентрациях соответствует сигмоидной кривой "доза – эффект". Значения прироста достигают максимума к 5-м суткам эксперимента, а в период 5–10-х суток – снижаются за счет накопленного негативного влияния токсиканта и старения культуры. Для концентраций ионов меди 128–256 мкг·л⁻¹ статистически значимого прироста численности живых клеток в период 1–5-х суток не отмечено, в последующий период 5–10-х суток значения снижаются до нуля. При высоких концентрациях токсиканта (320 мкг·л⁻¹ и выше) численность живых клеток в культуре падает до нуля уже на 3-и сутки. В этот же период выявлено и достоверное снижение интенсивности удельного прироста клеток.

Для *T. excentrica* впервые установлена пороговая для выживания и роста концентрация Cu²⁺ (128 мкг·л⁻¹), которая в 3–10 раз превышает известные в литературе значения, критичные для некоторых видов облигатных планктонных микроводорослей. Более высокая резистентность бенто-планктонной *T. excentrica* к токсическому воздействию меди может быть обусловлена морфофизиологическими адаптациями, которые обеспечивают устойчивое развитие данного вида при контакте с рыхлым донным субстратом, в котором поллютанты аккумулируются в значительно бóльших концентрациях, чем в водной толще.

Полученные результаты позволяют рекомендовать диатомовую водоросль *T. excentrica* для использования в качестве нового перспективного тест-объекта в токсикологических экспериментах по изучению влияния тяжелых металлов на эту ключевую группу одноклеточных автотрофов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБИОМ РАН по теме "Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна" (госрегистрация № 121030100028-0). Авторы выражают благодарность коллегам из ИнБИОМ РАН вед. инженерам Трофимову С. А. и Литвину Ю. И. за помощь при содержании клоновых культур, проведении

экспериментов и обработке экспериментальных данных, а также вед. инженеру Лишаеву В. Н. – за микрофотографирование на СЭМ Hitachi SU3500.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Гайсина Л. А., Фазлутдинова А. И., Кабиров Р. Р. Современные методы выделения и культивирования водорослей. Уфа : Изд-во БГПУ, 2008. 152 с.
- Маркина Ж. В. Действие детергентов и поверхностно-активных веществ на рост, физиологические и биохимические показатели одноклеточных водорослей (обзор) // Известия ТИПРО. 2009. Т. 156. С. 125–134. EDN: KUSPUB.
- Маркина Ж. В., Айздайчер Н. А. Влияние меди на численность, морфологию клеток и содержание фотосинтетических пигментов микроводоросли *Porphyridium purpureum* // Морской биологический журнал. 2019. Т. 4, № 4. С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.4.03>.
- Маркина Ж. В., Айздайчер Н. А. Оценка качества вод Амурского залива Японского моря на основе биотестирования с применением одноклеточной водоросли *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin // Сибирский экологический журнал. 2011. Т. 18, № 1. С. 99–105. EDN: NDRYRP.
- Неврова Е. Л., Петров А. Н. Динамика роста бентосной диатомовой водоросли *Ardissonea Crystallina* (С. Agardh) Grunow, 1880 (Bacillariophyta) при воздействии ионов меди // Морской биологический журнал. 2022. Т. 7, № 4. С. 31–45. EDN: NGURDH.
- Неврова Е. Л., Снигирева А. А., Петров А. Н., Ковалева Г. В. Руководство по изучению морского микрофитобентоса и его применению для контроля качества среды / под ред. А. В. Гаевской. Севастополь ; Симферополь : Н. Орианда, 2015. 176 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/291148289>.
- Овсяный Е. И., Романов А. С., Игнатъева О. Г. Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Морський екологічний журнал. 2003. Т. 2, № 2. С. 85–93. EDN: UCSJFH.
- Петров А. Н., Неврова Е. Л. Влияние антропогенного пресса на структуру таксоцены диатомовых водорослей (на примере Севастопольской бухты) // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма : (черноморский сектор) / под ред. В. Н. Еремеева, А. В. Гаевской. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. С. 288–302.
- Петров А. Н., Неврова Е. Л. Оценка неоднородности распределения клеток при токсикологических экспериментах с клоновыми культурами бентосных диатомовых водорослей // Морской биологический журнал. 2020. Т. 5, № 2. С. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.2.07>. EDN: ZBKKOV.
- Петров А. Н., Неврова Е. Л. Сравнительный анализ структуры таксоцены донных диатомовых (Bacillariophyta) в районах с различным уровнем техногенного загрязнения (Черное море, Крым) // Морський екологічний журнал. 2004. Т. 3, № 2. С. 72–83. EDN: UBXKHD.
- Петров А. Н., Неврова Е. Л., Малахова Л. В. Многомерный анализ распределения бентосных диатомовых (Bacillariophyta) в поле градиентов абиотических факторов в Севастопольской бухте (Черное море, Крым) // Морський екологічний журнал. 2005. Т. 4, № 3. С. 65–77. EDN: VLMFWX.
- Принципы и методы экологической токсикологии / под ред. Д. Б. Гелашвили. Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2016. 702 с.
- Проблемы химического загрязнения вод Мирового океана. В 9 т. Т. 5. Эколого-токсикологические аспекты загрязнения морской среды / под ред. С. А. Патина. Ленинград, 1985. 120 с.
- Романова Д. Ю., Петров А. Н., Неврова Е. Л. Действие сульфата меди на рост и морфологию клеток клоновых культур четырех видов бентосных диатомовых водорослей (Bacillariophyta) Черного моря // Морской биологический журнал. 2017. Т. 2, № 3. С. 53–67. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.05>. EDN: ZQKYVX.
- Филенко О. Ф., Марушкина Е. В., Дмитриева А. Г. Оценка воздействия меди на модельную популяцию водоросли *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Gréb. методом микрокультур // Гидробиологический журнал. 2007. Т. 42, № 6. С. 53–61.
- Anantharaj K., Govindasamy C., Natanamurugaraj G., Jeyachandran S. Effect of heavy metals on marine diatom *Amphora coffeaformis* (Agardh. Kutz) // Global Journal of Environmental Research. 2011. Vol. 5, Iss. 3. P. 112–117.
- Burgess R. M., Terletskaaya A. V., Milyukin M. V., Povolotskii M. [et al.]. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine // Marine Pollution Bulletin. 2009. Vol. 58, Iss. 8. P. 1103–1115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.013>.
- Cid A., Herrero C., Torres E., Abalde J. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricorutum*: Effects on photosynthesis and related parameters // Aquatic Toxicology. 1995. Vol. 31, Iss. 2. P. 165–174. DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-445x\(94\)00071-w](https://doi.org/10.1016/0166-445x(94)00071-w).

- Crespo E., Lozano P., Blasco J., Moreno-Garrido I. Effect of copper, irgarol and atrazine on epiphytes attached to artificial devices for coastal ecotoxicology bioassays // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013. Vol. 91, Iss. 6. P. 656–600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1122-4>.
- Florence T. M., Stauber J. L. Toxicity of copper complexes to the marine diatom *Nitzschia closterium* // *Aquatic Toxicology*. 1986. Vol. 8, Iss. 1. P. 11–26. DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-445x\(86\)90069-x](https://doi.org/10.1016/0166-445x(86)90069-x).
- Kim J. W., Price N. M. The influence of light on copper-limited growth of an oceanic diatom, *Thalassiosira oceanica* (Coscinodiscophyceae) // *Journal of Phycology*. 2017. Vol. 53, Iss. 5. P. 938–950. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.12563>.
- Leung P. T. Y., Yi A. X., Ip J. C. H., Mak S. S. T. [et al.]. Photosynthetic and transcriptional responses of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* to the combined effect of temperature stress and copper exposure // *Marine Pollution Bulletin*. 2017. Vol. 124, Iss. 2. P. 938–945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.038>.
- Levy J., Stauber J. L., Jolley D. F. Sensitivity of marine microalgae to copper: The effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity // *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 387, Iss. 1–3. P. 141–154.
- Markina Zh. V., Aizdaicher N. A. Content of photosynthetic pigments, growth, and cell size of microalga *Pheodactylum tricorutum* in the copper-polluted environment // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2006. Vol. 53, Iss. 3. P. 305–309. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443706030034>.
- Miazek K., Iwanek W., Remacle C., Richel A. Effect of metals, metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A review // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16, Iss. 10. P. 23929–23969. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms161023929>.
- Niemiec M., Wiśniowska-Kielian B., Arasimowicz M., Kuzminowa N. Assessment of the Black Sea ecosystem pollution with copper and cadmium in selected bays of Sevastopol region // *Journal of Ecological Engineering*. 2015. Vol. 16, Iss. 5. P. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/60467>.
- Rijstenbil J. W., Gerringa L. J. A. Interactions of algal ligands, metal complexation and availability, and cell responses of the diatom *Ditylum brightwellii* with a gradual increase in copper // *Aquatic Toxicology*. 2002. Vol. 56, Iss. 2. P. 115–131. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00188-6](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00188-6).

References

- Gaisina, L. A., Fazlutdinova, A. I., Kabirov, R. R. 2008. Modern methods of isolation and cultivation of algae. Ufa. (In Russ.)
- Markina, Zh. V. 2009. The effect of detergents and surfactants on the growth, physiological and biochemical parameters of unicellular algae (review). *Izvestiya TINRO*, 156, pp. 125–134. EDN: KUSPUB. (In Russ.)
- Markina, Zh. V., Aizdaicher, N. A. 2019. The effect of copper on the abundance, cell morphology and content of photosynthetic pigments in the microalga *Porphyridium purpureum*. *Marine Biological Journal*, 4(4), pp. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.4.03>. (In Russ.)
- Markina, Zh. V., Ayzdaycher, N. A. 2011. Evaluation of water quality of Amur Bay of the Sea of Japan based on biotesting using the unicellular alga *Pheodactylum tricorutum* Bohlin. *Contemporary Problems of Ecology*, 18(1), pp. 99–105. EDN: NDRYRP. (In Russ.)
- Nevrova, E. L., Petrov, A. N. 2022. Growth dynamics of benthic diatom *Ardissonea crystallina* (C. Agardh) Grunow 1880 (Bacillariophyta) under the copper ions impact. *Marine Biological Journal*, 7(4), pp. 31–45. EDN: NGURDH. (In Russ.)
- Nevrova, E. L., Snigireva, A. A., Petrov, A. N., Kovaleva, G. V. 2015. Guidelines from quality control of the Black Sea. Microphytobenthos. Ed. A. V. Gaevskaya. Simferopol. URL: <https://www.researchgate.net/publication/291148289>. (In Russ.)
- Ovsyaniy, E. I., Romanov, A. S., Ignatieva, O. G. 2003. Distribution of heavy metals in superficial layer of bottom sediments of Sevastopol bay (the Black Sea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 2(2), pp. 85–93. EDN: UCBJFH. (In Russ.)
- Petrov, A. N., Nevrova, E. L. 2003. Influence of anthropogenic stress upon the taxocene structure of diatom alga (Sevastopol bay as an example). In *Modern condition of biological diversity in near-shore zone of Crimea (the Black Sea sector)*. Eds.: V. N. Ereemeev, A. V. Gaevskaya. Sevastopol, pp. 288–302. (In Russ.)
- Petrov, A. N., Nevrova, E. L. 2020. Estimation of cell distribution heterogeneity at toxicological experiments with clonal cultures of benthic diatoms. *Marine Biological Journal*, 5(2), pp. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.2.07>. EDN: ZBK KOV. (In Russ.)
- Petrov, A. N., Nevrova, E. L. 2004. Comparative analysis of taxocene structures of benthic diatoms (Bacillariophyta) in regions with different level of technogenic pollution (the Black Sea, Crimea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 3(2), pp. 72–83. EDN: UBXKHD. (In Russ.)
- Petrov, A. N., Nevrova, E. L., Malakhova, L. V. 2005. Multivariate analysis of benthic diatoms distribution across the multidimensional space of the environmental factors gradient in Sevastopol Bay (the Black Sea, Crimea). *Morskoj ekologicheskij zhurnal*, 4(3), pp. 65–77. EDN: VLMFWX. (In Russ.)
- Principles and methods of environmental toxicology. 2016. Ed. D. B. Gelashvili. Nizhniy Novgorod. (In Russ.)

- Ecological and toxicological aspects of marine environment pollution. Vol. 5. 1985. Ed. S. A. Patin. Leningrad. (In Russ.)
- Romanova, D. Yu., Petrov, A. N., Nevrova, E. L. 2017. Copper sulphate impact on growth and cell morphology of clonal strains of four benthic diatom species (Bacillariophyta) from the Black Sea. *Marine Biological Journal*, 2(3), pp. 53–67. DOI: <https://doi.org/10.21072/mbj.2017.02.3.05>. EDN: ZQKYVX. (In Russ.)
- Fileiko, O. F., Marushkina, E. V., Dmitrieva, A. G. 2007. Assessment of the copper effect on the model population of the *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Bréb. by microculture method. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 42(6), pp. 53–61. (In Russ.)
- Anantharaj, K., Govindasamy, C., Natanamurugaraj, G., Jeyachandran, S. 2011. Effect of heavy metals on marine diatom *Amphora coffeaeformis* (Agardh. Kutz). *Global Journal of Environmental Research*, 5(3), pp. 112–117.
- Burgess, R. M., Terletskaia, A. V., Milyukin, M. V., Povolotskii, M. et al. 2009. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine. *Marine Pollution Bulletin*, 58(8), pp. 1103–1115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.013>.
- Cid, A., Herrero, C., Torres, E., Abalde, J. 1995. Copper toxicity on the marine microalga *Phaeodactylum tricorutum*: Effects on photosynthesis and related parameters. *Aquatic Toxicology*, 31(2), pp. 165–174. DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-445x\(94\)00071-w](https://doi.org/10.1016/0166-445x(94)00071-w).
- Crespo, E., Lozano, P., Blasco, J., Moreno-Garrido, I. 2013. Effect of copper, irgarol and atrazine on epiphytes attached to artificial devices for coastal ecotoxicology bioassays. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 91(6), pp. 656–600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1122-4>.
- Florence, T. M., Stauber, J. L. 1986. Toxicity of copper complexes to the marine diatom *Nitzschia closterium*. *Aquatic Toxicology*, 8(1), pp. 11–26. DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-445x\(86\)90069-x](https://doi.org/10.1016/0166-445x(86)90069-x).
- Kim, J. W., Price, N. M. 2017. The influence of light on copper-limited growth of an oceanic diatom, *Thalassiosira oceanica* (Coscinodiscophyceae). *Journal of Phycology*, 53(5), pp. 938–950. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.12563>.
- Leung, P. T. Y., Yi, A. X., Ip, J. C. H., Mak, S. S. T. et al. 2017. Photosynthetic and transcriptional responses of the marine diatom *Thalassiosira pseudonana* to the combined effect of temperature stress and copper exposure. *Marine Pollution Bulletin*, 124(2), pp. 938–945. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.038>.
- Levy, J., Stauber, J. L., Jolley, D. F. 2007. Sensitivity of marine microalgae to copper: The effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity. *Science of the Total Environment*, 387(1–3), pp. 141–154.
- Markina, Zh. V., Aizdaicher, N. A. 2006. Content of photosynthetic pigments, growth, and cell size of microalga *Phaeodactylum tricorutum* in the copper-polluted environment. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53(3), pp. 305–309. DOI: <https://doi.org/10.1134/s1021443706030034>.
- Miazek, K., Iwanek, W., Remacle, C., Richel, A. 2015. Effect of metals, metalloids and metallic nanoparticles on microalgae growth and industrial product biosynthesis: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), pp. 23929–23969. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms161023929>.
- Niemiec, M., Wiśniowska-Kielian, B., Arasimowicz, M., Kuzminowa, N. 2015. Assessment of the Black Sea ecosystem pollution with copper and cadmium in selected bays of Sevastopol region. *Journal of Ecological Engineering*, 16(5), pp. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/60467>.
- Rijstenbil, J. W., Gerringa, L. J. A. 2002. Interactions of algal ligands, metal complexation and availability, and cell responses of the diatom *Ditylum brightwellii* with a gradual increase in copper. *Aquatic Toxicology*, 56(2), pp. 115–131. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(01\)00188-6](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(01)00188-6).

Сведения об авторах

Петров Алексей Николаевич – пр. Нахимова 2, г. Севастополь, Россия, 299011; Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: alexpet-14@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0137-486X>

Alexey N. Petrov – 2 Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 99011; Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher; e-mail: alexpet-14@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0137-486X>

Неврова Елена Леонидовна – пр. Нахимова 2, г. Севастополь, Россия, 299011; Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН, д-р биол. наук, вед. науч. сотрудник;
e-mail: el_nevrova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9963-4967>

Elena L. Nevrova – 2 Nakhimov Ave., Sevastopol, Russia, 99011; Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas RAS, Dr Sci. (Biology), Leading Researcher; e-mail: el_nevrova@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9963-4967>

Журнал зарегистрирован

Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия
Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-26674 от 22 декабря 2006 г.

Оформить подписку онлайн на журнал «Вестник МГТУ» можно:

– по Объединенному каталогу «ПРЕССА РОССИИ». Подписной индекс – 41212

URL: <https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/i41212/>

Электронные версии журнала «Вестник МГТУ» размещены:

– на веб-сайте ФГАОУ ВО «МГТУ» (URL: <http://vestnik.mstu.edu.ru>)

– в Научной электронной библиотеке «eLIBRARY.RU» (URL: <http://elibrary.ru>)

– в Научной электронной библиотеке «CYBERLENINKA» (URL: <http://cyberleninka.ru>)

– в электронно-библиотечной системе ИД «Лань» (URL: www.e.lanbook.com)

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых
должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования; каталог журналов
открытого доступа DOAJ; в базы данных Zoological Record на платформе Web of
Science (WoS), FSTA, GeoRef.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
95 2000 ОК 005-93

ВЕСТНИК МГТУ
Том 26, № 1 (январь – март) 2023 г.



Подписано в печать 16.03.2023
Дата выхода в свет 31.03.2023
Формат 60×84/8. Бумага типографская
Печать ризографическая
Усл. печ. л. 10.22. Тираж 500 экз. Заказ № 44.
Цена 2 000 руб.00 коп.

Адрес издателя:
ФГАОУ ВО «МГТУ»
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13

Отпечатано в информационно-издательском центре МГТУ :
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13