

ISSN 1560-9278  
eISSN 1997-4736

# Вестник МГТУ

ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ТОМ 26, № 2 (апрель – июнь), 2023 г.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ  
НАУКИ О ЗЕМЛЕ



BIOLOGICAL SCIENCES  
EARTH SCIENCES

# Vestnik of MSTU

SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY  
VOLUME 26, N 2 (April – June), 2023

16+

ISSN 1560-9278  
eISSN 1997-4736

# **Вестник МГТУ**

**ТРУДЫ МУРМАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ТОМ 26, № 2 (апрель – июнь), 2023 г.**



# **Vestnik of MSTU**

**SCIENTIFIC JOURNAL OF MURMANSK STATE  
TECHNICAL UNIVERSITY  
VOLUME 26, N 2 (April – June), 2023**

**Мурманск  
2023**

**Вестник МГТУ**  
**Том 26, № 2 (апрель – июнь), 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:*

Долгов А. В., д-р биол. наук  
(Мурманск, Россия)  
Капков В. И., д-р биол. наук, профессор  
(Москва, Россия)  
Клочкова Т. А., д-р биол. наук  
(Петропавловск-Камчатский, Россия)  
Лайус Д. Л., канд. биол. наук  
(Санкт-Петербург, Россия)  
Макаревич П. Р., д-р биол. наук, профессор  
(Мурманск, Россия)  
Празукин А. В., д-р биол. наук, доцент  
(Севастополь, Россия)  
Савинова Т. Н., канд. биол. наук  
(Тромсё, Норвегия)  
Соколов К. М., канд. биол. наук  
(Мурманск, Россия)

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

**Vestnik of MSTU**  
**Volume 26, N 2 (April – June), 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:*

Dolgov A. V., Dr Sci. (Biology)  
(Murmansk, Russia)  
Kapkov V. I., Dr Sci. (Biology), Professor  
(Moscow, Russia)  
Klochkova T. A., Dr Sci. (Biology)  
(Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia)  
Lajus D. L., Cand. Sci. (Biology)  
(Saint Petersburg, Russia)  
Makarevich P. R., Dr Sci. (Biology), Professor  
(Murmansk, Russia)  
Prazukin A. V., Dr Sci. (Biology), Ass. Professor  
(Sevastopol, Russia)  
Savinova T. N., Cand. Sci. (Biology)  
(Tromsø, Norway)  
Sokolov K. M., Cand. Sci. (Biology)  
(Murmansk, Russia)

**The Editorial Office address**  
MSTU, Sportivnaya St., 13,  
183010, Murmansk, RUSSIA  
Phone/ Fax: (8152) 40-33-56  
E-mail: redvst@mstu.edu.ru

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

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.

Журнал включен в базу данных Zoological Record на платформе Web of Science (WoS).

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

**СОДЕРЖАНИЕ****Биологические науки**

- Алехнович А. В.** Влияние промыслового лова на размерную и возрастную структуру популяций длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus*..... 93
- Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н., Измятинский Д. В.** Взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов в биологических ритмах южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья..... 99
- Малавенда С. В., Никулина В. Д.** Особенности структуры популяции *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) в разных районах Мурманского берега Баренцева моря в 2021 г. .... 112
- Пахомов М. В., Зайцев А. А., Литвинов Ю. В., Трошичев А. Р.** Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной средах..... 121

**Краткое сообщение**

- Гонтарь В. И., Шарапова Т. А.** Новый вид пресноводных мшанок *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata) из Западной Сибири (Россия)..... 131

**Науки о Земле**

- Горячев А. А., Макаров Д. В., Потапов С. С., Беляевский А. Т., Семушин В. В., Компанченко А. А.** Переработка руды месторождения Нюд II методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония..... 137
- Латюк Е. С., Горячев А. А., Компанченко А. А.** Извлечение цветных металлов из сульфидных руд с помощью биовыщелачивания на примере Аллареченского техногенного месторождения... 150
- Кузина З. Я., Неведрова Н. Н., Санчаа А. М.** Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств..... 160
- Кузнецов Н. Н., Кондрашов Л. Ю.** Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера..... 170
- Нерадовский Ю. Н.** Реконструкция условий формирования красноцветных песчаников Терского берега на основе сравнительного анализа структуры древних и современных отложений (Кольский полуостров)..... 180
- Щеглов Г. А.** Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris*..... 191

**Книжная полка**

- Подобед Н. Е.** Методические материалы для подготовки технических специалистов в новых условиях..... 200

## C O N T E N T S

**Biological Sciences**

- Alekhovich A. V.** Populations of long-clawed crayfish *Pontastacus leptodactylus*: Effect of commercial fishing on the size and age structure..... 93
- Vdovin A. N., Chetyrbotsky A. N., Izmyatinsky D. V.** The interaction of endogenous and exogenous factors in the biological rhythms of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the Primorie waters..... 99
- Malavenda S. V., Nikulina V. D.** Features of the population structure of *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) in different areas of the Murmansk coast of the Barents Sea, 2021..... 112
- Pakhomov M. V., Zaytsev A. A., Litvinov Yu. V., Troshichev A. R.** Application of tonal audiometry methods to assess the hearing of gray seals in air and water environments..... 121

*Short Communications Article*

- Gontar V. I., Sharapova T. A.** New species of freshwater bryozoans *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata), Western Siberia (Russia)..... 131

**Earth Sciences**

- Goryachev A. A., Makarov D. V., Potapov S. S., Belyaevskiy A. T., Semushin V. V., Kompanchenko A. A.** Processing of ore from the Nud II deposit by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate..... 137
- Latyuk E. S., Goryachev A. A., Kompanchenko A. A.** Recovery of non-ferrous metals from sulfide ores by bioleaching on the example of the Allarechensk technogenic deposit..... 150
- Kuzina Z. Ya., Nevedrova N. N., Sanchaa A. M.** Structural features of the upper part of the section of the Gorniy Altai Uimon depression according to electrotomography data using 3D software..... 160
- Kuznetsov N. N., Kondrashov L. Yu.** Rockburst hazard potential assessment of rocks of the Khibiny massif deposits according to the Kaiser criterion..... 170
- Neradovsky Yu. N.** Reconstruction of the conditions for the formation of red-colored sandstones of the Tersky coast based on a comparative analysis of the structure of ancient and modern deposits (Kola Peninsula)..... 180
- Shcheglov G. A.** Changes of inorganic nitrogen compounds concentration in a mining enterprise wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*..... 191

*Bookshelf*

- Podobed N. E.** Methodological materials for the training of technical specialists in new conditions..... 200

## Влияние промыслового лова на размерную и возрастную структуру популяций длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus*

А. В. Алехнович

Научно-практический центр Национальной академии наук (НАН) Беларуси по биоресурсам,  
г. Минск, Республика Беларусь;  
e-mail: [alekhnovichav@gmail.com](mailto:alekhnovichav@gmail.com)

### Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
01.03.2023;

получена  
после доработки  
06.04.2023;

принята к публикации  
20.04.2023

### Ключевые слова:

длиннопалый рак,  
водохранилище,  
промысел,  
биомасса популяций,  
выживаемость особей

Промысел оказывает влияние на популяцию раков, при этом он изменяет их размерные и возрастные характеристики. Проведено сравнение размерных и возрастных показателей двух популяций длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus* в водохранилищах Локтыши Брестской области и Краснослободское Минской области (Республика Беларусь). Краснослободское водохранилище интенсивно эксплуатируется с ежегодным выловом 3–4 т раков. На водохранилище Локтыши промысловый лов отсутствует. Исследования показывают, что средние размеры особей в интенсивно эксплуатируемой популяции оказываются меньшими в сравнении с популяцией, где промыслового лова раков нет. Поскольку промысел раков регулируется среди прочего также и промысловой мерой (10,5 см общей длины), то в интенсивно эксплуатируемых популяциях средние размеры особей близки к этим граничным значениям. Продолжительность жизни раков несколько выше в вдхр. Локтыши, где отмечен только любительский лов раков. Интенсивный промысел увеличивает смертность самок, годовая выживаемость которых составляет 37 %, в то время как в отсутствие промысла выживаемость самок увеличивается до 57 %. Годовая выживаемость самцов составляет 41–49 %. Промысловый пресс ведет к снижению выживаемости особей и исчезновению из популяции раков возраста 9–10 лет.

### Для цитирования

Алехнович А. В. Влияние промыслового лова на размерную и возрастную структуру популяций длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus*. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 93–98. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-93-98>.

## Populations of long-clawed crayfish *Pontastacus leptodactylus*: Effect of commercial fishing on the size and age structure

Anatoly V. Alekhnovich

Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources,  
Minsk, Belarus; e-mail: [alekhnovichav@gmail.com](mailto:alekhnovichav@gmail.com)

### Article info

Received  
01.03.2023;

received  
in revised form  
06.04.2023;

accepted  
20.04.2023

### Key words:

narrow-clawed crayfish,  
reservoir,  
crayfishing,  
population size,  
survival rate

### Abstract

Fishing affects the population of crayfish, while it changes the size and age characteristics. The size and age parameters of two populations of the narrow-clawed crayfish *Pontastacus leptodactylus* in the Loktyshi (Brest Region) and Krasnoslobodskoe (Minsk Region) reservoirs in Belarus have been compared. The Krasnoslobodskoye reservoir is intensively exploited with an annual catch of 3–4 tons of crayfish. There is no commercial fishing in the Loktyshi reservoir. Studies show that the average size of individuals in an intensively exploited population is smaller in comparison with a population where there is no commercial fishing for crayfish. Since crayfish fishing is regulated by a commercial measure (10.5 cm of total length) in intensively exploited populations, the average sizes of individuals are close to these limiting values. The life expectancy of crayfish is somewhat higher in the Loktyshi reservoir, where only amateur crayfish fishing is noted. Intensive fishing increases the mortality of females, whose annual survival rate is 37 %, while in the absence of fishing, the survival of females increases up to 57 %. The annual survival rate of males is 41–49 %. The fishing pressure leads to decrease in the survival rate of individuals and disappearance of crayfish aged 9–10 years from the population.

### For citation

Alekhnovich, A. V. 2023. Populations of long-clawed crayfish *Pontastacus leptodactylus*: Effect of commercial fishing on the size and age structure. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 93–98. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-93-98>.

## Введение

Промысел является мощным фактором прямого воздействия на эксплуатируемые популяции раков. Он оказывает огромное влияние на популяции, при этом существенно изменяя их характеристики (Momot, 1991; 1993; Skurdal et al., 2002; Tulonen et al., 2008).

Цель работы – определить эффекты воздействия промысла на размерные и возрастные показатели эксплуатируемых популяций длиннопалого рака.

В основу работы легли исследования, выполненные по оценке запасов и определению лимитов вылова длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus* в Краснослободском водохранилище (Минская область) и водохранилище Локтыши (Брестская область) на территории Беларуси. Ранее исследования популяций длиннопалого рака данных водохранилищ не проводились.

## Материалы и методы

*Краткая характеристика мест исследований.* Для сравнения размерных и возрастных характеристик были взяты популяции длиннопалого рака Краснослободского водохранилища и водохранилища Локтыши.

Краснослободское водохранилище (52.829055 с. ш., 26.980748 в. д.) расположено на реке Морочь. Площадь водного зеркала 23,7 км<sup>2</sup>. Средняя глубина 3,0 м. Водоохранилище Локтыши (52.799758 с. ш., 26.742396 в. д.) находится на реке Лань. Площадь водного зеркала составляет 15,9 км<sup>2</sup>, максимальная глубина 4,9 м. Берега водохранилищ – облесенные, заболоченные. Мелководья обильно заросли тростником, рогозом, камышом. Погруженная водная растительность развита слабо.

На водохранилище Локтыши до 2021 г. велся только любительский лов раков, на Краснослободском в течение последних 6 лет наряду с любительским был организован промысловый лов раков.

Работы по оценке численности раков проводились с использованием промысловых раколовки типа вентерь. В качестве наживки применялась свежая рыба или куриные шеи. В раколовках использовалась дель<sup>1</sup> 16–22 мм (расстояние от узелка до узелка).

Для анализа размерной и возрастной структуры популяций анализировались данные, собранные в октябре 2004 г. и ноябре 2020 г. в вдхр. Локтыши и в октябре 2016 г. и ноябре 2020 г. в Краснослободском вдхр.

На вдхр. Локтыши в октябре 2004 г. использовалось 14 ловушек, в ноябре 2020 г. – 44 ловушки. На Краснослободском вдхр. в октябре 2016 г. применялось 24 раколовки, в 2020 г. – 38. Пойманных раков просчитывали и измеряли. Количество пойманных раков показано в табл. 1. В период исследований минимальные размеры особей в уловах в водохранилище Локтыши были 8,9 см, максимальные – 18,1 см, в Краснослободском вдхр. минимальные – 8,5 см, максимальные – 16,7 см.

Расчет численности проведен с использованием данных о суточной активности раков и возможной облавливаемой площади одной раколовки. Суточные перемещения раков колеблются в широких пределах, но в среднем составляют несколько метров (Цукерзис, 1989). Я. М. Цукерзис отмечает, что за сутки раки редко удаляются от своего убежища на расстояние больше 25 м.

С учетом этих данных было принято, что раколовки облавливают площадь круга с радиусом 5 м. Площадь, облавливаемая одной раколовкой, составляет в среднем 80 м<sup>2</sup>.

Коэффициент уловистости раколовки был принят равным 1. Принятый коэффициент уловистости и площадь облова одной раколовкой проверены в работах по оценке численности и определению лимитов вылова раков. Оценка запасов раков в более 15 водоемах показала реалистичность таких допущений. Полученные величины адекватно отражают запасы раков и обеспечивают их рациональный промысел.

Оценка численности и плотности раков в водоеме произведена только для облавливаемой части популяции. Раки возраста 1–2, а иногда и 3 года из-за селективности орудий лова не облавливались в полном объеме. Поэтому размерная структура уловов имела колоколообразную кривую распределения с восходящей левой ветвью и нисходящей правой. Анализировалась убыль особей в правой нисходящей ветви размерного ряда, в которой численность особей убывала с увеличением их возраста, что рассматривалось как отражение реальной убыли особей с увеличением размеров и возраста раков. Особи правой части кривой размерно-возрастного распределения имели возраст 4 и более лет для водохранилища Локтыши и 3 года для раков, обитающих в Краснослободском водохранилище (табл. 2 и 3).

У раков нет регистрирующих возраст структур, поэтому возрастные группы выделялись на основе вероятностно-статистического анализа: предполагается, что каждый возрастной класс характеризуется нормальным распределением (Алимов, 1989).

Расшифровка размерной структуры и определение возрастов начинались с определения модальных значений размеров раков в отдельных возрастных классах с использованием уравнения роста Берталанфи (Алехнович, 2015), далее корректировку возрастных классов проводили с учетом того, что в пределах каждого

<sup>1</sup> Дель – разновидность сетеполотна, применяемого для производства отцеживающих орудий лова, изготовленных из нитей, диаметр которых в соотношении к размеру ячеи больше 0,01 ( $d/a > 0,01$ ).

возрастного класса размеры особей определены в соответствии с законом нормального распределения. Распределение частот встречаемости всех особей на общем рабочем графике будет представлено ломаной кривой, состоящей из отдельных прямых отрезков, между которыми будет наблюдаться сравнительно плавный переход. Подсчет этих прямых отрезков на полимодальном частотно-размерном распределении особей позволяет выделить возрастные классы. Расшифровка размерно-возрастной структуры как самцов, так и самок в водохранилищах проводилась по массовым сборам ноября 2020 г.

Общая численность самцов и самок затем перераспределялась в соответствии с общей площадью облова и долей отдельных возрастных классов в общей размерной структуре облавливаемой части популяции.

Для определения значений общей мгновенной смертности ( $Z$ ) использовалась линейная зависимость между натуральным логарифмом плотности самок как зависимой переменной и соответствующим возрастом – независимой переменной, коэффициент наклона (угловой коэффициент) дает значение мгновенной смертности (Полищук, 1986).

Выживаемость ( $S$ ) определяли как  $e^{-Z}$ , где  $e$  – основание натурального логарифма.

Раков измеряли от острия рострума до конца тельсона с точностью до 1 мм.

### Результаты и обсуждение

На водохранилище Локтыши в 2015–2020 гг. существовал только любительский лов длиннопалого рака. Ежегодный вылов оценивается нами весьма приблизительно в объеме несколько сотен килограммов. В течение вегетационного периода ежедневно на водохранилище Локтыши присутствовало 1–2 любителя (иногда больше, иногда их не было вообще), которые вылавливали примерно 4 кг раков в день.

На Краснослободском водохранилище в этот период наряду с любительским ловом раков активно велся промышленный лов. Ежегодный вылов раков в Краснослободском водохранилище в течение 2016–2020 гг. с учетом любительского и промыслового лова составлял 3–4 т<sup>2</sup>.

В 2020 г. нами выполнены работы по оценке численности и определению лимитов вылова раков в вдхр. Локтыши. Численность раков облавливаемой части популяции в вдхр. Локтыши в 2020 г. составила 377 000 особей, общая биомасса раков в водохранилище была 17 т, лимит на заготовку определен в 6,7 т.

Численность раков облавливаемой части популяции в Краснослободском вдхр. в 2020 г. оценена в 577 000 особей, общая биомасса раков в водохранилище составляла 19,9 т, лимит на заготовку составил 6,8 т.

В табл. 1 приведены средние размеры самцов и самок облавливаемой части популяций длиннопалого рака в водохранилищах в разное время сбора проб.

Таблица 1. Средние размеры раков облавливаемой части популяции, собранных на вдхр. Локтыши и Краснослободском  
Table 1. The average size of crayfish in the fished part of the population collected in the Loktyshi and Krasnoslobodskoye reservoirs

Пол / время	К-во особей	Средняя ± s.d.	Пол / время	К-во особей	Средняя ± s.d.
Вдхр. Локтыши			Краснослободское вдхр.		
Самцы, октябрь 2004 г.	89	13,4 ± 2,2	Самцы, октябрь 2004 г.	229	10,8 ± 1,4
Самцы, ноябрь 2020 г.	130	11,5 ± 1,6	Самцы, ноябрь 2020 г.	247	10,6 ± 1,1
Самки, октябрь 2004 г.	50	12,6 ± 1,4	Самки, октябрь 2004 г.	149	10,7 ± 1,0
Самки, ноябрь 2020 г.	71	11,4 ± 1,3	Самки, ноябрь 2020 г.	182	11,0 ± 1,2

Для вдхр. Локтыши средняя длина особей за период наблюдений статистически значимо снизилась. В Краснослободском вдхр. этот показатель остался без изменений.

В 2020 г. доля промысловых раков, т. е. раков общей длиной  $\geq 10,5$  см, в вдхр. Локтыши составляла 76 %, в Краснослободском – 64 %.

Максимальная продолжительность жизни раков составила 10 лет в вдхр. Локтыши, в Краснослободском вдхр. – 8 лет. Наибольшего возраста достигали самцы, но их численность в возрасте 9–10 лет была низкой (табл. 2).

В табл. 3 показана возрастная структура облавливаемой части популяции длиннопалого рака Краснослободского вдхр.

<sup>2</sup> Государственный кадастр животного мира [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://belfauna.by>. Дата обращения : 01.07.2016.

Таблица 2. Возрастная структура облавливаемой части популяции длиннопалого рака вдхр. Локтыши  
Table 2. Size – age structure of populations of narrow-clawed crayfish in the Loktyshi reservoir

Возраст, годы	3	4	5	6	7	8	9	10
Самцы								
Диапазон длины, см	9,0–10,0	10,2–11,2	11,3–12,2	12,3–13,3	13,4–14,2	14,4–14,8	15,3–15,7	16,3
Средние значения, см	9,7	10,8	11,7	12,7	13,7	14,6	15,5	16,3
Плотность, инд./м <sup>2</sup>	0,003	0,018	0,006	0,003	0,003	0,001	0,0004	0,0002
Самки								
Диапазон длины, см	9,0–9,9	10,2–10,9	11,0–11,9	12,1–12,7	13,0–13,7	14,1–14,5	15,0	–
Средние значения, см	9,6	10,2	11,5	12,4	13,1	14,3	15,0	–
Плотность, инд./м <sup>2</sup>	0,004	0,010	0,006	0,004	0,004	0,001	0,0004	–

Таблица 3. Возрастная структура облавливаемой части популяции длиннопалого рака Краснослободского вдхр.

Table 3. Size – age structure of populations of narrow-clawed crayfish in the Krasnoslobodskoe reservoir

Возраст, годы	3	4	5	6	7	8
Самцы						
Диапазон длины, см	9,2–10,4	10,5–11,2	11,3–12,0	12,2–13,0	13,2–13,9	14,1
Средние значения, см	9,9	10,9	11,7	12,6	13,7	14,1
Плотность, инд./м <sup>2</sup>	0,037	0,025	0,009	0,007	0,003	0,0003
Самки						
Диапазон длины, см	8,9–10,0	10,1–11,2	11,3–12,3	12,4–13,1	13,5–13,7	14,2–14,3
Средние значения, см	9,6	10,7	11,8	12,7	13,6	14,2
Плотность, инд./м <sup>2</sup>	0,021	0,029	0,024	0,011	0,001	0,001

Для обоих исследуемых водоемов численность раков предыдущего возрастного класса выше последующего, начиная с возраста 4 года. Снижение численности особей с увеличением возраста отражает уровень общей смертности.

На рис. показана зависимость натурального логарифма плотности особей от их возраста. Эти зависимости хорошо аппроксимируются прямой линией, корреляционная связь сильная и значимая (уравнения 1, 2, 3, 4). Угловой коэффициент уравнений линейных зависимостей показывает общую мгновенную смертность.

$$\text{Вдхр. Локтыши, самцы} \quad D = -1,28 - 0,71t; r = -0,99; p = 0,00 \quad (1),$$

$$\text{Вдхр. Локтыши, самки} \quad D = -2,16 - 0,57t; r = -0,96; p = 0,00 \quad (2),$$

$$\text{Краснослободское вдхр., самцы} \quad D = -0,27 - 0,88t; r = -0,95; p = 0,00 \quad (3),$$

$$\text{Краснослободское вдхр., самки} \quad D = 0,83 - 0,99t; r = -0,937; p = 0,02 \quad (4),$$

где  $D$  – натуральный логарифм ( $\ln$ ) плотности раков;  $t$  – возраст, годы;  $r$  – коэффициент корреляции;  $p$  – уровень значимости.

Средние значения общей мгновенной смертности половозрелых самцов определены как  $-0,71$ ,  $-0,27$  в вдхр. Локтыши и Краснослободское соответственно. Средние значения общей мгновенной смертности половозрелых самок –  $-0,57$ ,  $-0,99$  в вдхр. Локтыши и Краснослободское соответственно. Полученные зависимости воспринимаются наглядней, если выразить их в величинах выживаемости: самцы в популяции вдхр. Локтыши характеризуются выживаемостью  $e^{-0,71} = 0,49$ , выживаемость самцов Краснослободского

вдхр. – 0,41. Данный показатель у самок составляет 0,57 и 0,37 для Локтышей и Краснослободского водохранилища соответственно.

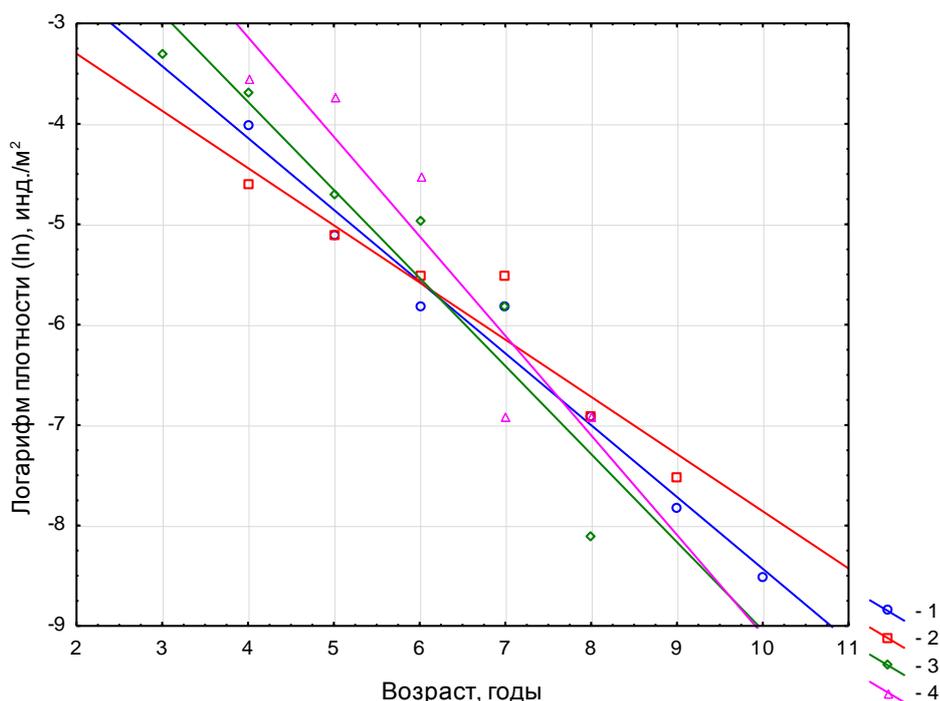


Рис. Изменения логарифма плотности особей в водохранилищах Локтыши и Краснослободское в зависимости от возраста раков: 1 – самцы, 2 – самки (вдхр. Локтыши); 3 – самцы, 4 – самки (Краснослободское вдхр.)

Fig. Natural logarithm of density of males and females depending on age in the Loktyshi and Krasnoslobodskoe reservoirs: 1 – males, 2 – females (Loktyshi); 3 – males, 4 – females (Krasnoslobodskoe)

Таким образом, выживаемость раков в интенсивно эксплуатируемой Краснослободской популяции ниже. Эксплуатационный пресс сильнее сказывается на самках, значительно снижая их выживаемость.

Исследования показывают, что средние размеры особей в интенсивно эксплуатируемой популяции оказываются меньшими в сравнении с популяцией, где промыслового лова раков нет. Поскольку промысел раков регулируется в том числе и промысловой мерой (10,5 см общей длины от острия рострума до конца тельсона), то в интенсивно эксплуатируемых популяциях средние размеры особей близки к этим граничным значениям.

Продолжительность жизни раков в вдхр. Локтыши, где отмечен только любительский лов, составляет 10 лет, в Краснослободском вдхр., где ведется промысловый лов, – 8 лет.

Интенсивный промысел увеличивает смертность самок, выживаемость которых составляет 37 %, в то время как в отсутствие промысла выживаемость самок увеличивается до 57 %.

### Заключение

Проведенные исследования доказывают, что выживаемость и продолжительность жизни длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus* увеличиваются в популяциях с низкой промысловой нагрузкой. Промысловый пресс ведет к снижению выживаемости особей длиннопалого рака. Возрастная структура неэксплуатируемой популяции длиннопалого рака представлена 10 годовыми возрастными классами, эксплуатируемая популяция – только 8.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках задания "Комплекс мероприятий по увеличению промысла длиннопалого рака (увеличение объема вылова раков)" государственной научно-технической программы (ГНТП) "Зеленые технологии ресурсопользования и экобезопасности", 2021–2025 гг., подпрограмма "Устойчивое природопользование и инновационные технологии переработки, охраны и воспроизводства природных ресурсов".

Автор выражает благодарность неизменному участнику экспедиций Д. В. Молоткову за действенную помощь при сборе материала.

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Алехнович А. В. Особенности группового роста особей в популяциях длиннопалого рака *Astacus leptodactylus* // Гидробиологический журнал. 2015. Т. 51, № 5. С. 3–16.
- Алимов А. Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л. : Гидрометеоиздат, 1989. 151 с.
- Полищук Л. В. Динамические характеристики популяций планктонных животных // Труды Всесоюзного гидробиологического общества / отв. ред. Г. Г. Винберг ; Акад. наук СССР, Всесоюз. гидробиол. о-во. Москва : Наука, 1986. Т. 26. 126 с.
- Цукерзис Я. М. Речные раки. Вильнюс : Мокслас, 1989. 142 с.
- Momot W. T. Potential for exploitation of freshwater crayfish in coolwater systems: Management guidelines and issues // Fisheries. 1991. Vol. 16, № 5. P. 14–21. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1991\)016<0014:PFE OFC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1991)016<0014:PFE OFC>2.0.CO;2).
- Momot W. T. The role of exploitation in altering the processes regulation crayfish populations // Freshwater Crayfish. 1993. Vol. 9. P. 101–117.
- Skurdal J., Garnas E., Taugbøl T. Management strategies, yield and population development of the noble crayfish *Astacus astacus* in Lake Steinsfjorden // Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture. 2002. Vol. 367. P. 845–860.
- Tulonen J., Erkamo E., Jussila J., Mannonen A. The effects of minimum size regulations and exploitation on population dynamics of the noble crayfish (*Astacus astacus* (Linnaeus)) in a small lake in central Finland: A seven year study // Freshwater Crayfish. 2008. Vol. 16. P. 7–14. DOI: 10.5869/fc.2008.v16.7.

### References

- Alekhovich, A. V. 2015. Peculiarities of growth of individuals in populations of narrow-clawed crayfish *Astacus leptodactylus*. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, 51(5), pp. 3–16. (In Russ.)
- Alimov, A. F. 1989. Introduction to production hydrobiology. Leningrad. (In Russ.)
- Polishchuk, L. V. 1986. Dynamic characteristics of populations of planktonic animals. In *Proceedings of the All-Union Hydrobiological Society*. Ed. G. G. Vinberg. Moscow. (In Russ.)
- Tsukerzys, Ya. M. 1989. Freshwater crayfish. Vilnius. (In Russ.)
- Momot, W. T. 1991. Potential for exploitation of freshwater crayfish in coolwater systems: Management guidelines and issues. *Fisheries*, 16(5), pp. 14–21. DOI: [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1991\)016<0014:PFE OFC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1991)016<0014:PFE OFC>2.0.CO;2).
- Momot, W. T. 1993. The role of exploitation in altering the processes regulation crayfish populations. *Freshwater Crayfish*, 9, pp. 101–117.
- Skurdal, J., Garnas, E., Taugbøl, T. 2002. Management strategies, yield and population development of the noble crayfish *Astacus astacus* in Lake Steinsfjorden. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 367, pp. 845–860.
- Tulonen, J., Erkamo, E., Jussila, J., Mannonen, A. 2008. The effects of minimum size regulations and exploitation on population dynamics of the noble crayfish (*Astacus astacus* (Linnaeus)) in a small lake in central Finland: A seven year study. *Freshwater Crayfish*, 16, pp. 7–14. DOI: 10.5869/fc.2008.v16.7.

### Сведения об авторе

**Алехнович Анатолий Васильевич** – ул. Академическая, 27, г. Минск, Республика Беларусь, 220072; Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [Alekhnovichav@gmail.com](mailto:Alekhnovichav@gmail.com)

**Anatoly V. Alekhnovich** – 27 Akademicheskaya Str., Minsk, Republic of Belarus, 220072; Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher; e-mail: [Alekhnovichav@gmail.com](mailto:Alekhnovichav@gmail.com)

УДК 597.556.334.1–13(265.54)

## Взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов в биологических ритмах южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья

А. Н. Вдовин\*, А. Н. Четырбоцкий, Д. В. Измятинский

\*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии ("ВНИРО"),  
Тихоокеанский филиал ("ТИНРО"), г. Владивосток, Россия;  
e-mail: [aleksandr.vdovin@tinro-center.ru](mailto:aleksandr.vdovin@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-5340>

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
10.03.2023;  
получена  
после доработки  
23.03.2023;  
принята к публикации  
06.04.2023

### Ключевые слова:

южный одноперый  
терпуг *Pleurogrammus  
azonus*, биоритмы,  
экзогенные  
и эндогенные факторы,  
соматический и  
генеративный рост,  
осцилляция  
температуры

### Реферат

Южный одноперый терпуг *Pleurogrammus azonus* является важным промысловым видом в водах России и Японии. В российских водах Японского моря регулярное изучение его биологии проводилось на акватории Приморского края, где выполнялись ежегодные траловые съемки. Сборы материала охватывали весь календарный год. В ходе исследования установлено, что в согласовании биоритмов южного одноперого терпуга решающую роль играют эндогенные ритмы (внутренние биологические часы). Это предположение подтверждается разной продолжительностью экзогенных и эндогенных ритмов: динамика температурного показателя имеет выраженную периодизацию, равную одному астрономическому году, а продолжительность цирканых ритмов в динамике физиологических процессов и главных компонент меняется с возрастом. Связь показателей соматического и генеративного роста с осцилляцией температуры подвержена возрастной изменчивости. У молодежи эта связь явно не прослеживается. В начале периода половозрелости терпуга проявляются значимые связи. Затем зависимость показателей роста от осцилляции температуры снижается, поскольку возрастает избирательная способность рыб к выбору температурного диапазона. Избирательная способность к условиям среды в большей степени определяется не индивидуальным, а групповым поведением вида.

### Для цитирования

Вдовин А. Н. и др. Взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов в биологических ритмах южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 99–111. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-99-111](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-99-111)

## The interaction of endogenous and exogenous factors in the biological rhythms of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the Primorie waters

Alexander N. Vdovin\*, Alexander N. Chetyrbotsky, Denis V. Izmyatinsky

\*Pacific Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries  
and Oceanography "VNIRO" ("TINRO"), Vladivostok, Russia;  
e-mail: [aleksandr.vdovin@tinro-center.ru](mailto:aleksandr.vdovin@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-5340>

### Article info

Received  
10.03.2023;  
received in revised  
23.03.2023;  
accepted  
06.04.2023

### Key words:

Arabesque greenling  
*Pleurogrammus azonus*,  
biorhythms, exogenous  
and endogenous factors,  
somatic and generative  
growth, temperature  
oscillation

### Abstract

Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* is an important commercial species in the waters of Russia and Japan. In the Russian waters of the Japan Sea, regular study of its biology was conducted in the waters of the Primorsky Krai, where annual trawl surveys were performed. Material collections covered the entire calendar year. Endogenous rhythms (internal biological clocks) play a crucial role in the coordination of biorhythms of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. This assumption is confirmed by the different duration of exogenous and endogenous rhythms: the dynamics of the temperature index has a pronounced periodization equal to one astronomical year, and the duration of the mixed rhythms in the dynamics of physiological processes and main components changes with age. The relationship of somatic and generative growth with temperature oscillation is subjected to age-related variability. In juveniles, this relationship is not clearly traceable. At the beginning of puberty period, significant connections are manifested. Then the dependence of growth indicators on the temperature oscillation is reduced, as the selective ability of the Arabesque greenling to choose the temperature range increases. Selective ability to environmental conditions is largely determined not by individual but by group behavior.

### For citation

Vdovin, A. N. et al. 2023. The interaction of endogenous and exogenous factors in the biological rhythms of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the Primorie waters. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 99–111. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-99-111](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-99-111)

## Введение

Южный одноперый терпуг *Pleurogrammus azonus* – важный промысловый вид в водах России и Японии. В российских водах Японского моря регулярное изучение его биологии проводится на акватории Приморского края, где выполняются ежегодные траловые съемки.

Адаптация вида к изменчивости среды происходит через упорядоченное распределение физиологических процессов по времени (Дольник, 1975; Шилов, 2001 и др.). Внутренние изменения нередко опережают, "предсказывают" внешние, что позволяет особи (группе особей) оптимально приспособиться к изменившимся внешним условиям.

Согласованность биологических ритмов внутри организма определяется взаимодействием эндогенных (физиологических) и экзогенных (экологических) ритмов (Мина и др., 1976; 1980; Браун, 1977 и др.). В ряду экзогенных особо выделяются такие мощные факторы, как кормовая база и температура (Бретт, 1983; Elliot, 1975).

Стадийность онтогенеза и ритмичность физиологических процессов изучена нами на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* Jordan et Metz, 1913 (сем. Hexagrammidae) и представлена в работах (Вдовин и др., 2018; 2019), где взаимодействие организма со средой детально не рассматривалось (приведены только отдельные факты). Настоящее исследование является продолжением указанных публикаций. Цель работы состоит в оценке влияния возрастной изменчивости биологического состояния терпуга на согласованность биологических ритмов с внешними экзогенными ритмами, которая определяется взаимодействием физиологических циклов с условиями среды.

## Материалы и методы

Биологический материал собран в 1960–1996 гг. в морских водах Приморья (подзона Приморье, южнее м. Золотой); использованы пробы, взятые на научно-исследовательских и промысловых судах, а также рыбокомбинатах Приморья. Для биологического анализа было собрано 7 155 экземпляров. Содержание депозитного жира определено у 2 407 особей. У 1 112 экземпляров взвешивались гонады и пищевой комок. Пробы на содержание белка взяты у 906 рыб. Методы сбора проб и первичной обработки материала по физиологическим показателям (длина и масса тела, масса гонад, депозитного жира, белка и пищевого комка) представлены в наших предыдущих работах (Вдовин и др., 1993; Vdovin et al., 2014; Вдовин и др., 2015а; б; 2018; 2019).

Показатели физиологических процессов имеют следующие обозначения:  $FL$ , см – стандартная длина;  $Ws$ , г – соматические значения массы тела;  $Q$ , г – масса гонад;  $Fa$ , г – общая масса депозитного жира, являющаяся суммой печеночного, полостного и мышечного жиров;  $Pr$ , г – масса белка;  $fo$ , г – масса пищевого комка. Удельные скорости физиологических процессов  $Y$  рассчитаны по формуле (1а), указанной в работе А. Н. Вдовина и А. Н. Четырбоцкого (2018):

$$Y(t_i) = \frac{1}{X(t_i)} \frac{X(t_{i+1}) - X(t_i)}{t_{i+1} - t_i},$$

где  $X(t)$  – значения параметров физиологических процессов в момент времени  $t$ .

Измерения температуры воды проводились в ходе научно-исследовательских рейсов на гидрологических станциях в 1978–2018 гг.; они были выполнены совместно с тралениями (или с постановкой дрейферных сетей) при наличии в уловах южного одноперого терпуга. Общее количество таких станций составило 6 679: 6 114 – на донных тралениях; 449 – на пелагических тралениях; 86 – на станциях дрейферного лова. Количество измерений температуры было меньше, чем количество станций, так как: 1) не на всех станциях измерялась температура; 2) некоторые значения являлись артефактами. При исключении артефактов (нереально низких или высоких значений температур) ориентировались на опубликованные термические характеристики водных масс российских вод Японского моря (Зуенко, 1994; 1998; 2008). Выборка промеров температуры у дна составила 3 170 измерений, у поверхности – 449 измерений; всего осуществлено 3 624 измерения. Показателем температурного фона служил размах вариации  $VR$  – разница между крайними значениями температуры. Другие параметры, представляющие какой-либо центр распределения значений температуры (средняя, мода, медиана), не показали значимых связей с интенсивностью физиологических процессов.

Для количественной оценки интенсивности физиологических процессов использовалась выборка наблюдений, которая характеризует 12 признаков: по 6 вышеприведенных физиологических показателей для самцов и самок. Ее построение выполнялось с помощью процедуры `gprncmp` системы MATLAB (Дьяконов и др., 2002). Целесообразность использования процедуры обусловлена потребностью построения небольшого числа интегральных показателей, которые обеспечивают хорошую аппроксимацию исходных коррелированных наблюдений. При работе с большим выборочным многопараметрическим числовым материалом наблюдается взаимозависимость между динамическими рядами отдельных показателей, где для представления парной связи между ними обычно используется коэффициент корреляции (диапазон его изменения от –1 до 1). В случае его высокого значения (не ниже 0,5) целесообразно на базе таких

показателей сформировать новый набор интегральных показателей, куда каждый из исходных показателей вносит определенный вклад. Этот вклад оценивается на основании матрицы корреляции между показателями. Количество данных интегральных показателей равно количеству исходных признаков. Вместе с тем наиболее важная информация определяется набором только первых из них (на практике обычно первых двух показателей). Процедура оценки этих вкладов в формирование интегрального показателя выполняется методом главных компонент (ГК). В системе Matlab реализация алгоритма выполняется с использованием процедуры `princomp` (`principal component`), входным параметром которой является матрица выборочного распределения, а на выходе – значения главных компонент и весовые нагрузки для исходных переменных.

Здесь первая главная компонента ГК1 обеспечивает 46,6 % исходной дисперсии многомерной выборки (ее доля среди собственных значений матрицы корреляции выборочных данных), а вторая компонента ГК2 – 41 %. Эта ситуация отражает тот факт, что первые две главные компоненты показывают с высокой степенью достоверности характер связей выборочных данных.

При хронологическом описании физиологических процессов нами использовался термин "цирканный (цирканный, циркануальный, околгодичный) ритм", поскольку биологические ритмы, как правило, не равны геофизическим (Браун, 1977; Шилов, 2001).

В отличие большинства схем эндогенных часов концепция хронона основывается на представлениях молекулярной биологии (Браун, 1977). ДНК программирует синтез РНК, а РНК – синтез белка. Для транскрипции всего комплекса необходимо около 24 часов, после чего начинается новый цикл. Скорость генетической транскрипции регулируется целым комплексом клеточных факторов. Настройка эндогенных часов частично осуществляется экзогенными часами (суточная ритмика освещенности) и внешними сезонными факторами (например, температура). Внешние факторы действуют на молекулярные опосредованно, через клеточные факторы. На клеточные факторы также влияют физиологические процессы, интенсивность которых отчасти зависит от внешних условий. Биоритм организма складывается под воздействием комплекса причин и может меняться с возрастом. На наш взгляд, это единственная известная нам схема эндогенных часов, которая позволяет наглядно продемонстрировать взаимодействие эндогенных и экзогенных факторов.

## Результаты и обсуждение

Стадийность онтогенеза южного одноперого терпуга определяется интенсивностью физиологических процессов и сменой их приоритетности с возрастом. Первые два года преобладает накопление вещества, а далее – циклическое чередование ассимиляции и диссимиляции. С увеличением возраста снижается интенсивность физиологических процессов и в целом обмена веществ (Вдовин и др., 2018).

С возрастом также четче проявляется цикличность изменения значений физиологических процессов. Это проявляется и в динамике таких интегральных показателей, как главные компоненты ГК1 и ГК2 (рис. 1). Более четко периодичность проявляется в динамике значений ГК2. Хронологические отрезки между минимальными значениями, соответствующие околгодичному (цирканныму) биоритму, составляют 11–12 месяцев. Изменчивость размеров подобных хронологических отрезков для ГК1 составляет 10–14 месяцев. В целом околгодичный жизненный цикл терпуга длится от 9–11 до 13 месяцев, увеличиваясь с возрастом (Вдовин и др., 1993).

Периодичность динамики ГК2 подобна периодичности активности питания, которая выражается через массу пищевого комка. Коэффициент корреляции между этой компонентой и удельной скоростью динамики массы пищевого комка составляет 0,895. Следующим по значимости показателем для ГК2 является динамика депозитного жира. Корреляция между удельной скоростью данного показателя и ГК2 равна 0,548. Питание является физиологическим процессом, т. е. эндогенным фактором, и в первую очередь определяется потребностью организма. Последнее напрямую подтверждается тем, что с возрастом уменьшается относительное потребление пищи (Вдовин и др., 2018). Такой внешний фактор, как кормовая база, в российских водах Японского моря рыбами используется только частично. При этом терпуг не имеет явных конкурентов (Пуцина, 2005; Пуцина и др., 2014). Таким образом, кормовая база не может оказывать на терпуга не только ультимативного, но и сколько-нибудь значительного влияния. Корреляция с показателем температуры для ГК2 составляет всего 0,225.

Периодичность и ход динамики ГК1 практически идентичны таковым для половых продуктов. Корреляция между ГК1 и удельной скоростью динамики массы гонад составляет 0,88. Связь между ГК1 и  $VR, ^\circ C$ , невелика – коэффициент корреляции равняется 0,429. Значимость коррелятивной связи на третьем-пятом годах (от 2+ до 4+) заметно выше 0,522. Таким образом, некое упорядочение хода динамики физиологических процессов (периодизация и согласованность) происходит после снижения темпов соматического роста на третьем году жизни (Вдовин и др., 2018).

Сходство хода циклических (цирканных) ритмов становится очевидным для ГК с четвертого года (рис. 1). Возрастная изменчивость цирканых биоритмов у терпуга отмечалась и ранее (Вдовин и др., 1993; 2015a). Динамика же температурного показателя имеет четкую периодизацию, равную астрономическому году. С возрастом меняется только размах колебаний температурного показателя (рис. 1). Взаимосвязь интенсивности физиологических процессов с температурным фактором также имеет выраженную возрастную изменчивость (таблица; рис. 2). При рассмотрении всего возрастного ряда зависимость физиологических

показателей и главных компонент от температурного фактора не прослеживается: все значения коэффициента корреляции ниже 0,5 (таблица). В возрастном ряду от 2+ до 6+ (впервые созревающие и половозрелые особи) корреляция выше 0,5 отмечается для трех физиологических процессов: линейного (*FL*), белкового (*Pr*) и соматического (*Ws*) роста. У отдельных возрастных групп отмечаются значения коэффициентов корреляции  $Y(fo)$  и ГК1 немногим выше 0,5.

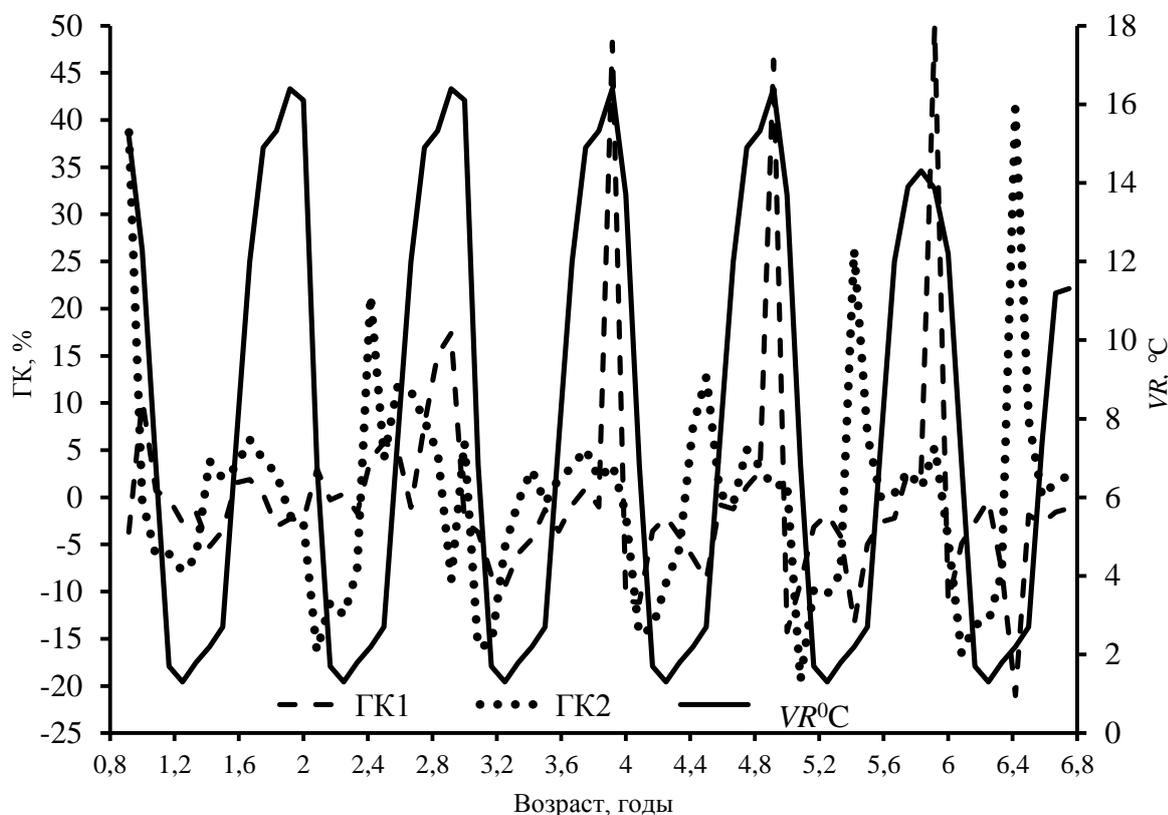


Рис. 1. Возрастное распределение значений главных компонент ГК1 и ГК2 и размаха вариации температуры  $VR$  в водах Приморья у *Pleurogrammus azonus*  
 Fig. 1. Age distribution of the values of the principal components (PC1 – first, PC2 – second) and the range of temperature variation ( $VR$ ) in the habitat (in the waters of the Primorsky Krai) of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*

Таблица. Возрастная изменчивость коррелятивных связей размаха вариации температуры  $VR$  у *Pleurogrammus azonus* с удельной скоростью физиологических процессов и главными компонентами в водах Приморья  
 Table. Age-related variability of correlative relationships of the scope of variation of the temperature ( $VR$ ) in the habitat (in the waters of the Primorsky Krai) of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* with the specific rate of physiological processes and the principal components

Возраст $T$ , годы	$Y(FL)$	$Y(Pr)$	$Y(Ws)$	$Y(Q)$	$Y(Fa)$	$Y(fo)$	ГК1	ГК2
0+	-0,583	-0,453	-0,456	–	–	-0,423	–	–
1+	0,283	0,151	0,278	0,379	-0,040	0,407	0,182	0,338
2+	<b>0,816</b>	<b>0,835</b>	<b>0,743</b>	<b>0,528</b>	-0,237	0,117	<b>0,513</b>	0,214
3+	<b>0,714</b>	<b>0,626</b>	<b>0,567</b>	<b>0,548</b>	-0,120	-0,015	<b>0,542</b>	0,466
4+	<b>0,815</b>	<b>0,637</b>	<b>0,631</b>	0,473	-0,174	-0,050	<b>0,509</b>	0,290
5+	<b>0,611</b>	<b>0,684</b>	<b>0,554</b>	0,436	-0,079	-0,199	0,463	0,072
6+	<b>0,501</b>	<b>0,640</b>	<b>0,578</b>	0,399	0,091	-0,163	0,363	-0,036
7+	<b>0,529</b>	0,479	0,286	0,428	-0,104	-0,069	–	–
От 0+ до 7+	0,479	0,421	0,420	0,376	-0,100	-0,036	0,431	0,233
От 2+ до 6+	<b>0,700</b>	<b>0,595</b>	<b>0,616</b>	0,480	-0,112	-0,058	0,483	0,212

Примечание. Положительные значения корреляции величиной больше 0,5 выделены жирным шрифтом.

Самые слабые связи с температурой для всего возрастного ряда (близкие к нулю) отмечены для интенсивности питания и жиронакопления. Отметим, что два этих процесса тесно взаимосвязаны (*Вдовин и др., 2018*). Интенсивность питания и темпы жиронакопления характеризуются низкими коррелятивными связями со скоростями других физиологических процессов. Высокая корреляция удельной скорости массы пищевого комка ( $R = 0,895$ ) отмечается только с ГК2. Можно предположить, что интенсивность питания не определяется каким-либо физиологическим процессом, связанным с такими факторами среды, как температура и кормовая база, а зависит от общих потребностей организма. О малозначимой роли кормовой базы уже сказано выше. О влиянии температуры на скорость пищеварения и интенсивность питания издано множество публикаций. Мы полагаем уместным сослаться на работу (*Пономарев, 1993*): благодаря температурной компенсации пищеварительной функции, рыбы обладают способностью к эффективному гидролизу пищи в любое время года. Разумеется, речь не идет о значениях температур, выходящих за пределы толерантности. Однако терпуг и не выходит за пределы толерантности, а обычно обитает в пределах температурного оптимума, активно перемещаясь в градиентном поле температуры (*Вдовин, 1998*). По данным Симомура и Фукутаки, полученным в 1957 г. [цитируется по работе (*Горбунова, 1962*)], уже личинки терпуга обладают высокой избирательной способностью к условиям среды – они активно избегают районов с температурой выше 7 °С и соленостью ниже 17 ‰.

Жир и пища, как внутренний и внешний источники энергии, вероятно, необходимы для воплощения эргономической стратегии посредством адаптивной самоорганизации и не могут следовать какому-либо одному процессу. Приоритетной составляющей в эргономической стратегии является соотношение скорости и эффективности обмена веществ (*Бретт и др., 1983; Шмидт-Ниельсен, 1987*). Известно, что при снижении скорости обмена веществ повышается его эффективность. Данная ситуация ранее описывалась для терпуга (*Вдовин и др., 2018*). Определяющими для биологического состояния организма являются процессы соматического и генеративного роста. Интенсивность именно этих процессов определяет стадийность онтогенеза. Тем не менее динамика соматического и генеративного роста не играет определяющей роли в регуляции интенсивности физиологических процессов, а, скорее всего, задается генетической программой. Структура различий биологического состояния на разных этапах и периодах онтогенеза может определяться фенотипической настройкой (*Вдовин и др., 2018*).

Действительно, одним из критериев возрастной периодизации является оценка взаимодействия организма с условиями среды (*Антонова, 2006*). Температура – один из определяющих внешних факторов, влияющих на обмен веществ (*Джеббадзе, 2001* и др.). Широко распространено мнение, что у пойкилотермных животных повышение температуры ускоряет биохимические реакции и повышает интенсивность физиологических процессов (*Шмидт-Ниельсен, 1982* и др.). Однако многочисленные эксперименты показывают, что большее стимулирующее действие на обмен веществ рыб оказывают смена температурного режима и особенно осцилляция температуры (*Бретт, 1983; Константинов и др., 1989, 1996*). В работе (*Проссер, 1977*) приводится интересный пример в опытах с серебряным карасем *Carassius auratus gibelio*: избыточный подъем интенсивности обмена наблюдается при быстром изменении температуры в том и другом направлении.

Важнейшая роль температуры, по мнению некоторых исследователей, видится в синхронизации биоритмов (*Браун, 1977*). При этом синхронизация более эффективно проявляется не у отдельного индивидуума, а у группы особей (*Слоним, 1971*). В частности, в экспериментах с грызунами при понижении температуры обмен веществ в группе особей понижался сильнее, чем у отдельных индивидуумов. Согласованность биоритмов в группе особей определяется взаимным влиянием друг на друга. Примеры, имеющиеся для южного одноперого терпуга, весьма показательны. У особей одного возраста, но разного биологического состояния, физиологические и миграционные процессы проходят сходным образом (*Вдовин, 1998*). После перехода к придонно-пелагическому образу жизни распределение молоди и половозрелых рыб принципиально не различается, о чем свидетельствует тот факт, что в нерестовый период неполовозрелые рыбы и производители, особенно одного возраста, совершают сходные миграции (*Вдовин и др., 1994*).

Динамика массы половых продуктов у особей, участвующих и не участвующих в нересте, также подобны (*Вдовин и др., 1995*). Сигнальным фактором для начала нереста служит понижение температуры на нерестилищах. Абсолютная величина температуры особой роли не играет, поскольку ее значения на разных нерестилищах отличаются на 20–40 % (*Горбунова, 1962; Ковтун, 1979; Гомелюк, 1987; Китакама и др., 1967*). Нерест начинают самые крупные особи. По мере уменьшения размеров и возраста сдвигаются сроки нереста (становятся более поздними), что обусловлено территориальным поведением терпуга. Крупные производители занимают глубокие и обширные нерестовые участки (*Гомелюк, 1987*). В период весенней нагульной миграции половозрелые особи подходят к берегу раньше молоди (*Вдовин, 1998*).

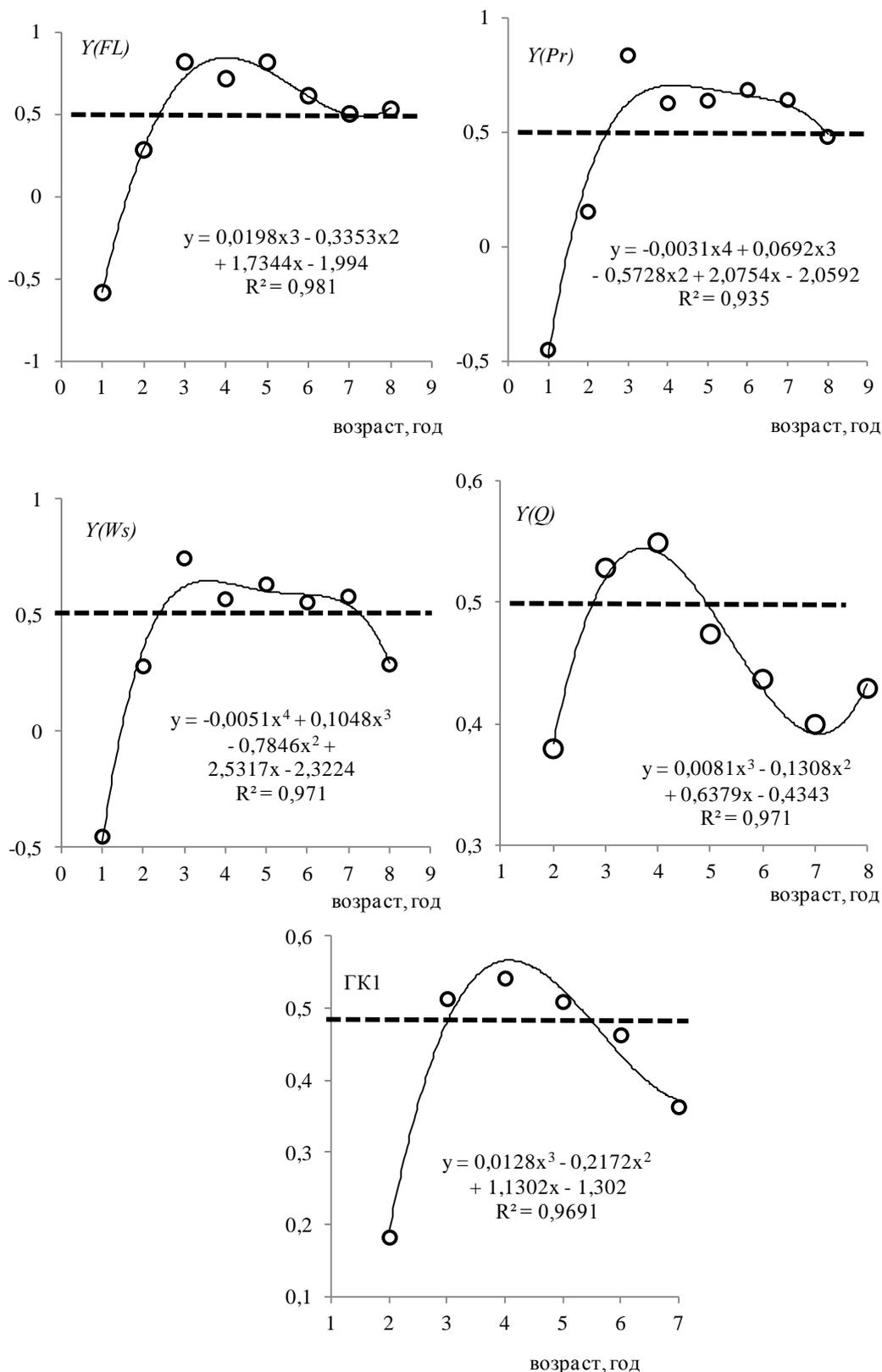


Рис. 2. Возрастная изменчивость коррелятивных связей размаха вариации температуры VR с удельной скоростью физиологических процессов и ГК1 у *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья. По оси ординат – значения коэффициентов корреляции. Пунктирная линия разделяет значения R по 0,5

Fig. 2. Age-related variability of correlative relationships of the scope of variation of the temperature (VR) in the habitat (in the waters of the Primorsky Krai) of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* with the specific rate of physiological processes and PC1. There are the values of the correlation coefficients on the ordinate axis. The dotted line divides the R values by 0.5

Отметим, что именно у половозрелых особей связь интенсивности отдельных физиологических процессов и ГК1 с температурным фактором проявляется более отчетливо, чем у неполовозрелых (рис. 2). Ход возрастной динамики связи температурного фактора с перечисленными показателями схож. В течение двух первых лет (молодь) корреляция ниже 0,5, при этом она заметно возрастает на втором году жизни. С третьего года жизни корреляция температуры с рассматриваемыми показателями в течение 2–6 лет выше 0,5. Самые высокие значения корреляционных связей осцилляции температуры отмечаются с  $Y(FL)$  и  $Y(Pr)$  (рис. 2). Отметим, что линейный рост является весьма условным показателем и отражает и другие процессы, в частности процесс белкового роста (*Вдовин и др., 1993*). Белковый, как и линейный, рост у терпуга носит поступательный характер – без потерь белковой массы с возрастом. Удельная скорость белкового роста тесно связана с удельными скоростями линейного и весового роста. Корреляция между этими показателями больше 0,9. Коэффициенты корреляции между остальными показателями не превышают 0,5. Основным показателем роста следует считать удельную скорость белкового роста. Содержание белка и размеры костей являются абсолютными показателями роста (*Бретт и др., 1983; Антонова, 2006*).

Тем не менее не следует забывать, что рост является комплексным процессом и тесно связан с развитием (*Мина и др., 1976; Зотин и др., 1993*). Поэтому мы полагаем, что эти три показателя (соматическая масса тела, содержание белка и линейные размеры тела) характеризуют один процесс – соматический рост.

В течение первых двух лет определенной связи соматического роста с температурным фактором не наблюдается (рис. 2). Этот хронологический отрезок ранее назван нами ювенальным этапом (*Вдовин и др., 2018*). На данном этапе преобладает активное накопление органического вещества с малозаметными кратковременными потерями. В первый год жизни (ювенильный период ювенального этапа) при самых высоких темпах соматического роста у всех трех его показателей отмечаются обратные связи с осцилляцией температуры (таблица; рис. 2). Происходит это потому, что при тренде снижения темпов соматического роста температурный тренд имеет противоположную направленность. На первом году жизни темпы роста у рыб всегда самые высокие (*Самрана, 2001*). Точнее, они должны быть самыми высокими всегда, за исключением ультимативных условий среды.

На втором году жизни (пубертатный период ювенального этапа) при некотором снижении темпов соматического роста и активизации генеративного роста и жиронакопления корреляция показателей соматического роста с жиронакоплением становится положительной (таблица; рис. 2), но ее значения меньше 0,5. Постепенная перестройка организма к этапу половозрелости не нуждается в стимуляции обмена веществ температурой. Роль температурного фактора, возможно, начинает проявляться в отдельные моменты, в частности с апреля по июнь, когда при весеннем подъеме температуры активизируется генеративный рост.

На следующем этапе онтогенеза – половозрелости, длящегося с третьего по восьмой год жизни (*Вдовин и др., 2018*), связь показателей соматического роста с размахом вариации температуры весьма стабильна (рис. 2). Полиномиальные тренды показывают наличие устойчивой тенденции: связь показателей роста с температурным фактором постепенно снижается к концу жизни. Указанная тенденция прослеживается и для показателя генеративного роста  $Y(Q)$ , и для ГК1 (рис. 2). В данном случае уместнее говорить не о ходе отдельных процессов, а о зависимости от температуры интенсивности обмена веществ, которую эти процессы отражают. Полагаем, что данная зависимость определяется степенью согласованности физиологических процессов. Особенно обращает на себя внимание подобие хода генеративного роста у половозрелых и впервые созревающих рыб. Несмотря на качественные различия гаметогенеза в каждой возрастной группе, динамика хода генеративного роста имеет сходный характер (*Вдовин и др., 1995*). Механизм приведения в соответствие процессов генеративного роста с другими физиологическими процессами позволяет одновозрастным рыбам относительно одновременно участвовать в нересте (*Вдовин, 1998*). Корреляция между процессами соматического и генеративного роста с температурным фактором позволяет предположить его значительную регулируемую роль в синхронизации этих процессов.

Как было отмечено выше, влияние температуры на рыб проявляется эффективней для группы видов, чем для отдельного индивидуума (*Вдовин, 1998; Вдовин и др., 1994; 1995; Слоним, 1971*). В данном случае имеются особи, которые первыми реагируют на изменения температурного фактора, а их поведение стимулирует к подобным действиям других рыб.

По мере увеличения возраста корреляция размаха вариации температуры с показателями соматического и генеративного роста уменьшается. Последнее связано с возрастанием самоорганизации для реализации эргономической стратегии (*Вдовин и др., 2018*). Во-первых, с возрастом увеличивается конкурентоспособность в борьбе за благоприятные условия. Крупные самцы первыми занимают лучшие нерестовые участки и не пускают туда молодых (*Гомелюк, 1987*). Избирательная способность к условиям среды также увеличивается, в частности снижается температурный диапазон (рис. 1). Снижение температурного диапазона у терпуга с возрастом происходит направленно. Иначе говоря, потребность в стимуляции обменных процессов температурой снижается. Рыбы крупнее 36 см перестают встречаться в пелагиали. Такого размера терпуг в массе достигает к концу пятого года жизни. Во-вторых, снижение температурного

диапазона должно способствовать снижению интенсивности общего обмена, что и происходит у терпуга с возрастом. Таким образом, воплощается адаптивная самоорганизация эргономической стратегии (Вдовин и др., 2018). О том, что интенсивность обмена и питания тесно связана с температурой, говорится во многих источниках (Кафанов и др., 1983; Фандж и др., 1983 и др.). По нашим данным, интенсивность питания не коррелирует с температурой (таблица). По мнению В. И. Пономарева (1993), активность пищеварения и не должна быть тесно связана с температурой среды из-за температурной компенсации пищеварительной функции. Однако подобная связь в условиях экспериментов, длящихся непродолжительное время, может проявляться. В нашем случае максимальная интенсивность питания непродолжительное время (июль – сентябрь) также наблюдается на фоне самой высокой осцилляции температуры. Полагаем, что интенсивность питания и жиронакопления (физиологических процессов, слабо коррелирующих с температурой) не зависит от внешних условий, а определяется потребностями организма. По данным, указанным в работе (Суханов, 1979), пойкилотермный организм в течение всего года постоянно находится в условиях среды, близких к оптимальным для роста. Снижение с возрастом температурного диапазона и обмена веществ также является благоприятным фактором для терпуга.

Снижение обмена веществ с возрастом – явление универсальное. Важнее тот факт, что по мере взросления уменьшение интенсивности обмена сопровождается повышением его эффективности (Бретт и др., 1983; Шмидт-Ниельсен, 1987). Снижение обмена веществ способствует увеличению продолжительности жизни (Радзинская и др., 1987; Зотин и др., 1993). В статьях (Суханов, 1979; Кафанови др., 1983) на основе опубликованной информации и собственных расчетов выводится постулат о зависимости продолжительности жизни от температурного режима, что связано с замедлением обмена веществ. По мнению В. В. Суханова (1979), "по мере роста и увеличения возраста организмы с оптимальным поведением должны мигрировать в среду с более низкими температурами". Данный постулат убедительно подтверждается нашими данными по терпугу. Разумеется, продолжительность жизни зависит не только от обмена веществ. Предельная продолжительность жизни у самок на год больше, чем у самцов: вероятно, процессы обновления организма у самок эффективнее, чем у самцов (Зотин и др., 1993). Тем не менее стадийность онтогенеза у обоих полов почти идентична, а сезонная динамика интенсивности физиологических процессов почти не отличается (Вдовин и др., 2018).

Биологическая ритмика прежде всего определяется наследственной программой (Мина и др., 1976; Браун, 1977 и др.). Точкой отсчета околосеasonного (цирканного) ритма следует считать нерест, сроки которого отличаются у разных популяций. Темпы роста и полового созревания у южного одноперого терпуга, обитающего в водах России и Японии, весьма схожи (Вдовин, 1998; Вдовин и др., 2018; Irie, 1986; Takashima et al., 2016). Из существующих схем биологических (эндогенных) часов, основывающихся на молекулярных представлениях, наиболее убедительной и простой, на наш взгляд, является концепция хронона (Браун, 1977): "Предполагают, что существуют очень длинные фрагменты ДНК, на протяжении которых скорость генетической транскрипции регулируется целым комплексом клеточных факторов...". На клеточные факторы, в свою очередь, могут оказывать влияние внешние факторы.

Для согласования физиологических процессов, а в целом и для регуляции обмена веществ, температура окружающей среды имеет большое значение. Однако терпуг способен контролировать этот фактор благодаря активному перемещению в градиентном поле. Самый широкий температурный диапазон наблюдается в июле – августе, в преднерестовый период, когда молодь и половозрелые особи совершают миграции, направленные к берегу (и из придонных слоев воды в пелагиаль) (Вдовин, 2004) (рис. 1). Резкая смена температурного режима позволяет активизировать обмен веществ, а также соматический и генеративный рост (Вдовин и др., 2018).

О взаимосвязи разных уровней экзогенных и эндогенных ритмов имеется множество публикаций. Схему согласования биоритмов можно описать следующим образом:

1. На молекулярном уровне (хронон) скорость генетической транскрипции (соответственно, синтез пептидных цепей) регулируется комплексом клеточных факторов (ферментами и гормонами, а также комплексом метаболитов) (Браун, 1977). Гормональная и ферментативная активность во многом зависит от условий среды и главным образом от температурного режима (Проссер, 1977).

2. На уровне органов и тканей интенсивность и приоритетность физиологических процессов меняется в зависимости от биологического состояния организма. В течение первых двух лет преобладает накопление вещества, в дальнейшем – чередование фаз ассимиляции и диссимиляции (Вдовин и др., 2018). Широкий температурный диапазон активизирует обмен веществ, а узкий – снижает его интенсивность. Данная зависимость имеет не только сезонную, но и возрастную динамику. В теплый период года расширяется температурный диапазон обитания и активизируются обменные процессы. С возрастом снижается обмен веществ и сужается температурный диапазон (рис. 1).

3. На уровне организма температурный режим также играет роль сигнального. В частности, он служит сигналом начала нереста для самых зрелых особей. Наличие индивидуальной биологической ритмики и индивидуальных вариаций биологического состояния позволяет предположить разную ответную реакцию особей одного возраста на внешние раздражители (Браун, 1977).

4. Особи одного возраста, но разного биологического состояния, характеризуются подобием хода физиологических процессов и совершают сходные миграции. Так, у созревающих особей и половозрелых рыб отмечается подобие хода динамики генеративного роста (Вдовин и др., 1995). Особи способны оказывать влияние друг на друга, вследствие чего повышается групповая избирательность к условиям среды. Первыми в район нереста следуют самцы, затем самки. Эту же миграцию без захода на нерестилища повторяют созревающие, но не готовые к нересту особи (Вдовин и др., 1990; 1994). Таким образом, синхронизация биоритмов более эффективно проявляется не у отдельного индивидуума, а у группы особей (Слоним, 1971).

5. Для демонстрации согласованности нами предлагается упрощенная схема, в основу которой положена концепция хронона (Браун, 1977) (рис. 3). Предполагается, что настройка биологических часов (хронон) определяется клеточными факторами. На клеточные факторы, в свою очередь, могут влиять физиологические процессы, а точнее – их интенсивность. Физиологические процессы и клеточные факторы взаимосвязаны. На клеточные факторы, физиологические процессы и биоритмы организма оказывают влияние внешние условия. Непосредственное влияние внешних факторов на биоритмы может проявляться как сигнал к смене биологического сезона. Возрастной биоритм у терпуга определяется способностью выбора оптимальных условий среды.

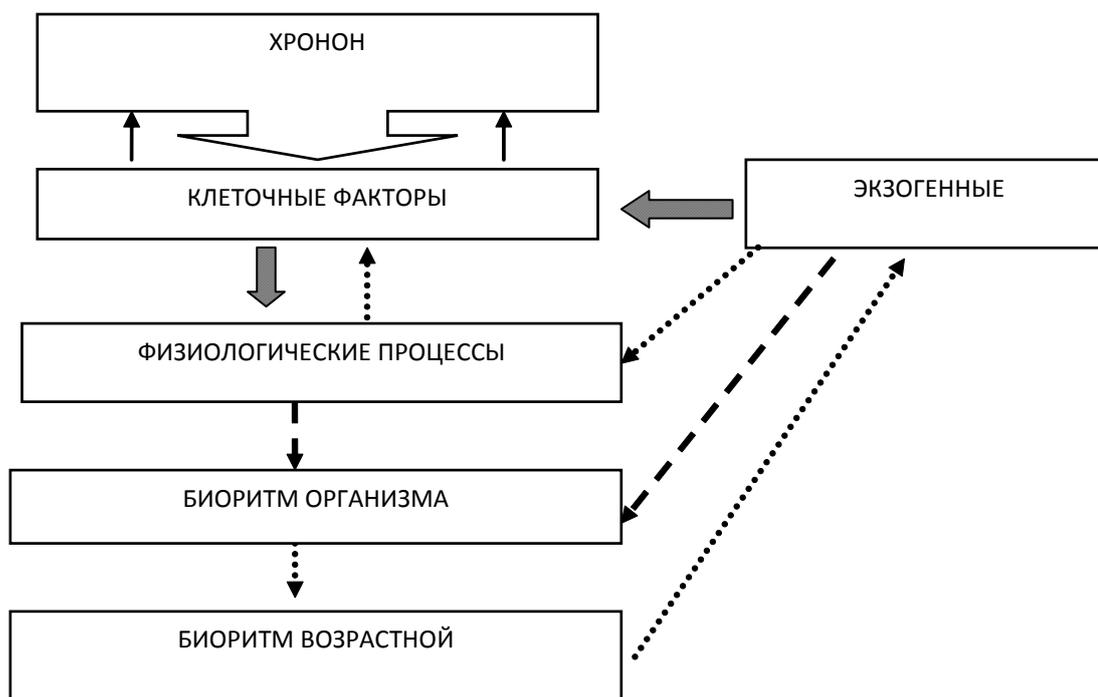


Рис. 3. Схема согласования биоритмов южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*  
Fig. 3. Scheme of coordination of the Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* biorhythms

### Заключение

В синхронизации биоритмов южного одноперого терпуга решающую роль играют эндогенные ритмы (внутренние биологические часы). Данное предположение подтверждается аргументами, свидетельствующими о разной продолжительности экзогенных и эндогенных ритмов:

– динамика температурного показателя в среде обитания терпуга имеет выраженную периодизацию, равную одному астрономическому году. Продолжительность цирканых ритмов в динамике физиологических процессов и главных компонент меняется с возрастом. Изменчивость цирканного ритма физиологических процессов терпуга по ГК1 составляет 10–14 месяцев, по ГК2 – 11–12 месяцев. В целом окологодичный жизненный цикл терпуга длится от 9–11 до 13 месяцев, увеличиваясь с возрастом;

– возрастной изменчивости подвержена связь показателей соматического и генеративного роста с температурным фактором. Тенденция этой изменчивости проявляется одинаково для всех показателей роста. В течение первых двух лет, когда в росте терпуга не проявляется явная периодичность и преобладает процесс накопления органического вещества, корреляция с температурным фактором незначительна. В начале периода половозрелости наблюдаются значимые связи, затем зависимость показателей роста от температуры снижается, поскольку возрастает избирательная способность терпуга к выбору температурного диапазона;

– избирательная способность к условиям среды в большей степени определяется не индивидуальным, а групповым поведением терпуга.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Антонова О. А. Возрастная анатомия и физиология. М. : Высшее образование, 2006. 192 с.
- Браун Ф. Биологические ритмы // Сравнительная физиология животных. В 3 т. Т. 2 / под ред. Л. Проссера. М. : Мир, 1977. С. 208–260.
- Бретт Д. Р. Факторы среды и рост // Биоэнергетика и рост рыб / под ред. У. Хоара [и др.]. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 275–345.
- Бретт Д. Р., Гроувс Д. Д. Физиологическая энергетика // Биоэнергетика и рост рыб / под ред. У. Хоара [и др.]. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 203–274.
- Вдовин А. Н. Биология и динамика численности южного одноперого терпуга (*Pleurogrammus azonus*) // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 16–45. EDN: YPWUXS.
- Вдовин А. Н. Океанологические аспекты распределения и динамики численности массовых и обычных видов терпуговых (Hexagrammidae) в северо-западной части Японского моря // Гидрометеорология и гидрохимия морей. В 10 т. Т. 8. Японское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / отв. ред. Ф. С. Терзиев. СПб., 2004. С. 219–229.
- Вдовин А. Н., Корниенко Е. С., Дроздов А. Л. Особенности гаметогенеза впервые размножающихся особей южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* // Биология моря. 1995. Т. 21, № 5. С. 329–332. EDN: YOQYAK.
- Вдовин А. Н., Швыдкий Г. В., Гомелюк В. Е. Особенности распределения южного одноперого терпуга в летне-осенний период в заливе Петра Великого // Рыбное хозяйство. 1990. № 11. С. 25–27.
- Вдовин А. Н., Швыдкий Г. В. Физиологические аспекты роста одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Приморья // Вопросы ихтиологии. 1993. Т. 33, № 1. С. 156–160.
- Вдовин А. Н., Швыдкий Г. В. Батиметрические миграции терпуга *Pleurogrammus azonus* осенью в заливе Петра Великого // Биология моря. 1994. Т. 20, № 5. С. 351–358.
- Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н. Рост и стадийность онтогенеза южного одноперого терпуга в водах Приморья (Японское море) // Труды ВНИРО. 2018. Т. 170. С. 26–46. EDN: OVUATZ.
- Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н. Проявления полового диморфизма в соматическом и генеративном росте южного одноперого терпуга // Труды ВНИРО. 2019. Т. 175. С. 48–63. EDN: QYSSEV.
- Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н., Четырбоцкий В. А. Компьютерное моделирование динамики роста рыб (на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*). Часть I // Информационные технологии. 2015а. Т. 21, № 2. С. 116–120. EDN: TIXJZR.
- Вдовин А. Н., Четырбоцкий А. Н., Четырбоцкий В. А. Компьютерное моделирование динамики роста рыб (на примере южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus*). Часть II // Информационные технологии. 2015б. Т. 21. № 3. С. 187–192. EDN: TMZWVZ.
- Гомелюк В. Е. Нерестовое поведение южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в заливе Петра Великого // Вопросы ихтиологии. 1987. Т. 27, № 6. С. 991–999.
- Горбунова Н. Н. Размножение и развитие семейства терпуговых (Hexagrammidae) // Труды Института океанологии АН СССР. 1962. Т. 59. С. 118–182.
- Дгебуадзе Ю. Ю. Экологические закономерности изменчивости роста рыб. М. : Наука, 2001. 276 с.
- Дольник В. Р. Миграционное состояние птиц. М. : Наука, 1975. 398 с.
- Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб. : Питер, 2002. 448 с.
- Зотин А. И., Зотина Р. С. Феноменологическая теория развития, роста и старения организмов. М. : Наука, 1993. 364 с.
- Зуенко Ю. И. Типы термической стратификации вод на шельфе Приморья // Комплексные исследования морских гидробионтов и условий их обитания. Владивосток : ТИНРО, 1994. С. 20–39.
- Зуенко Ю. И. Элементы структуры вод северо-западной части Японского моря // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 262–290. EDN: JDOUXK.
- Зуенко Ю. И. Промысловая океанология Японского моря. Владивосток : ТИНРО-Центр, 2008. 227 с.
- Китакама М., Накамити К., Ямомото М., Исикава М. Исследования стадных признаков одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в водах Хоккайдо // Bull. Hokkaido. Reg. Fish. Res. Lab. 1967. N 33. P. 2–15. (In Japan.).
- Ковтун А. А. О нерестовом периоде южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* (Jordan et Metz) в прибрежье о. Манерон // Вопросы ихтиологии. 1979. Т. 19. Вып. 5. С. 847–852.
- Константинов А. С., Зданович В. В., Костюк Ю. А., Соловьева Е. А. Скорость изменения метаболизма рыб при смене гомотермальной среды на гетеротермальную // Вопросы ихтиологии. 1996. Т. 36, № 6. С. 834–837.

- Константинов А. С., Зданович В. В., Тихомиров Д. Г. Влияние осцилляции температуры на энергетику роста рыб // Вопросы ихтиологии. 1989. Т. 29, № 6. С. 1019–1027.
- Мина М. В., Клевезаль Г. А. Рост животных. Анализ на уровне организма. М. : Наука, 1976. 291 с.
- Мина М. В., Клевезаль Г. А. Ритмы роста и развития животных // Проблемы космической биологии. Т. 41. Биологические ритмы / Акад. наук СССР, Отд-ние биол. наук. М., 1980. С. 139–159.
- Пономарев В. И. Межсезонные изменения уровня активности пищеварительных ферментов у рыб северных широт // Вопросы ихтиологии. 1993. Т. 33, № 3. С. 401–406.
- Проссер Л. Температура // Сравнительная физиология животных. В 3 т. Т. 2 / под ред. Л. Проссера. М. : Мир, 1977. С. 84–209.
- Пущина О. И. Питание и пищевые взаимоотношения массовых видов донных рыб в водах Приморья в весенний период // Известия ТИНРО. 2005. Т. 127. С. 203–208.
- Пущина О. И., Соломатов С. Ф., Борисов Б. М. Особенности питания тихоокеанской сельди *Clupea pallasii*, минтая *Theragra chalcogramma* и южного одноперого терпуга *Pleurogrammus azonus* в зал. Петра Великого (Японское море) // Известия ТИНРО. 2014. Т. 176. С. 189–200. EDN: SFCKJP.
- Радзинская Л. И., Никольская И. С., Чудакова И. В. Влияние аллатектомии на дыхание, вес и продолжительность жизни домового сверчка *Acheta domestica* L. // Онтогенез. 1987. Т. 18, № 3. С. 281–287.
- Слоним А. Д. Экологическая физиология животных. М. : Высшая школа, 1971. 448 с.
- Суханов В. В., Кафанов А. И. Температурная зависимость продолжительности развития и жизни у пойкилотермных животных: эколого-физиологическая интерпретация // Биология моря. 1983. Т. 9, № 5. С. 21–27. EDN: WCAIXT.
- Суханов В. В. Рост пойкилотермных животных под влиянием температурных и пищевых условий среды // Биология моря. 1979. № 4. С. 6–13. EDN: WCAHJJ.
- Фандж Р., Гроув Д. Пищеварение // Биоэнергетика и рост рыб / под ред. У. Хоара [и др.]. М. : Легкая и пищевая промышленность, 1983. С. 112–202.
- Шилов И. А. Экология. М. : Высшая школа, 2001. 512 с.
- Шмидт-Ниельсен К. Физиология животных. Приспособление и среда. В 2 кн. Кн. 1. М. : Мир, 1982. 414 с.
- Шмидт-Ниельсен К. Размеры животных: почему они так важны? М. : Мир, 1987. 259 с.
- Campana S. E. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods // Fish Biology. 2001. V. 59, Iss. 2. P. 197–242. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2001.tb00127.x>.
- Elliot J. M. The growth rate of brown trout, *Salmo trutta* L., fed on maximum ration // The Journal of Animal Ecology. 1975. Vol. 44, Iss. 3. P. 805–821. DOI: <https://doi.org/10.2307/3720>.
- Irie T. Stock assessment of Hokke (*Pleurogrammus azonus*) and estimation of the effect of fishing regulation for the stock // Report of Fish. Res. Invest. Japan. Gov. 1986. N 25 (Nov.). P. 74–97. (In Japanese with English abstract).
- Takashima T., Okada N., Asami H., Hoshino N. [et al.]. Maturation process and reproductive biology of female Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the Sea of Japan, off the west coast of Hokkaido // Fisheries Science. 2016. Vol. 82, Iss. 2. P. 225–240.
- Vdovin A., Antonenko D. Correlation between fat content and features of generative growth of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* // Journal of Coastal Life Medicine. 2014. Vol. 2, Iss. 9. P. 679–683.

## References

- Antonova, O. A. 2006. Age-related anatomy and physiology. Moscow. (In Russ.)
- Brown, F. 1977. Biological rhythms. In *Comparative physiology of animals*, 2. Mir, Moscow, pp. 208–260. (In Russ.)
- Brett, D. R. 1983. Environmental factors and growth. In *Bioenergetics and growth of fish*. Ed. U. Hoar. Moscow, pp. 275–345. (In Russ.)
- Brett, D. R., Groves, D. D. 1983. Physiological energetic. In *Bioenergetics and growth of fish*. Ed. U. Hoar. Moscow, pp. 203–274. (In Russ.)
- Vdovin, A. N. 1998. Biology and population dynamics of Arabesque greenling (*Pleurogrammus azonus*). *Izvestiya TINRO*, 123, pp. 16–45. EDN: YPWUXS. (In Russ.)
- Vdovin, A. N. 2004. Oceanological aspects of distribution and population dynamics of mass and common species of greenlings (Hexagrammidae) in the north-western part of the Japan/East Sea. In *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas, 8, Japan/East Sea, 2, Hydrochemical conditions and oceanological foundations of biological productivity*. Sankt Petersburg, pp. 219–229. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Kornienko, E. S., Drozdov, A. L. 1995. Features of gametogenesis of the first-time breeding individuals of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. *Russian Journal of Marine Biology*, 21(5), pp. 329–332. EDN: YOQYAK. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Shvydky, G. V., Gomelyuk, V. E. 1990. Features of the distribution of Arabesque greenling in the Summer-Autumn period in Peter the Great Bay. *Fisheries*, 11, pp. 25–27. (In Russ.)

- Vdovin, A. N., Shvydky, G. V. 1993. Physiological aspects of the growth of the greenling *Pleurogrammus azonus* in the waters of Primorye. *Journal of Ichthyology*, 33(1), pp. 156–160. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Shvydky, G. V. 1994. Bathymetric migrations of the greenling *Pleurogrammus azonus* in Autumn in Peter the Great Bay. *Russian Journal of Marine Biology*, 20(5), pp. 351–358. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Chetyrbotsky, A. N. 2018. Growth and stages of ontogenesis of Arabesque greenling in the waters of Primorye (the Japan/ East Sea). *Trudy VNIRO*, 170, pp. 26–46. EDN: OVUATZ. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Chetyrbotsky, A. N. 2019. Manifestations of sexual dimorphism in somatic and generative growth of Arabesque greenling in the waters of Primorye (the Japan/ East Sea). *Trudy VNIRO*, 175, pp. 48–63. EDN: QYSSEV. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Chetyrbotsky, A. N., Chetyrbotsky, V. A. 2015a. Computer modeling of the dynamics of fish growth (using the example of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*), Part 1. *Information Technologies*, 21(2), pp. 116–120. EDN: TIXJZP. (In Russ.)
- Vdovin, A. N., Chetyrbotsky, A. N., Chetyrbotsky, V. A. 2015b. Computer modeling of the dynamics of fish growth (using the example of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*), Part 2. *Information Technologies*, 21(3), pp. 187–192. EDN: TMZWVZ. (In Russ.)
- Gomelyuk, V. E. 1987. Spawning behavior of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in Peter the Great Bay. *Voprosy ikhtiologii*, 27(6), pp. 991–999. (In Russ.)
- Gorbunova, N. N. 1962. Reproduction and development of the family of greenlings (Hexagrammidae). *Trudy Instituta Okeanologii AN SSSR*, 59, pp. 118–182. (In Russ.)
- Dgebuadze, Yu. Yu. 2001. Ecological aspects of fish growth variability. Moscow. (In Russ.)
- Dolnik, V. R. 1975. Migration state of birds. Moscow. (In Russ.)
- Dyakov, V., Kruglov, V. 2002. MATLAB. Analysis, identification and modeling of systems. Special reference book. St. Petersburg. (In Russ.)
- Zotin, A. I., Zotina, R. S. 1993. Phenomenological theory of development, growth and aging of organisms. Moscow. (In Russ.)
- Zuenko, Yu. I. 1994. Types of thermal stratification of waters on the Primorye shelf. In *Complex studies of marine hydrobionts and their habitat conditions*. Vladivostok, pp. 20–39. (In Russ.)
- Zuenko, Yu. I. 1998. Elements of the structure of the waters of the north-western part of the Japan/East Sea. *Izvestiya TINRO*, 123, pp. 262–290. EDN: JDOUXK. (In Russ.)
- Zuenko, Yu. I. 2008. Commercial oceanology of the Japan/Sea. Vladivostok. (In Russ.)
- Kitakama, M., Nakamiti, K., Yamamoto, M., Ishikawa, M. 1967. Studies of herd characteristics of Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the waters of Hokkaido. *Bull. Hokkaido. Reg. Fish. Res. Lab.*, 33, pp. 2–15. (In Japan.)
- Kovtun, A. A. 1979. On the spawning period of the southern greenling *Pleurogrammus azonus* (Jordan et Metz) in the coastal area of Maneron Island. *Voprosy ikhtiologii*, 19(5), pp. 847–852. (In Russ.)
- Konstantinov, A. S., Zdanovich, V. V., Kostyuk, Yu. A., Solovieva, E. A. 1996. The rate of change in fish metabolism during the change of homothermal environment to heterothermal. *Voprosy ikhtiologii*, 36(6), pp. 834–837. (In Russ.)
- Konstantinov, A. S., Zdanovich, V. V., Tikhomirov, D. G. 1989. The influence of temperature oscillations on the energy of fish growth. *Voprosy ikhtiologii*, 29(6), pp. 1019–1027. (In Russ.)
- Mina, M. V., Clevezal, G. A. 1976. The growth of animals. Analysis at the level of the organism. Moscow. (In Russ.)
- Mina, M. V., Clevezal, G. A. 1980. Rhythms of growth and development of animals. In *Problemy kosmicheskoy biologii. T. 41. Biologicheskiye ritmy*, Akad. nauk SSSR, pp. 139–159. (In Russ.)
- Ponomarev, V. I. 1993. Inter-seasonal changes in the activity level of digestive enzymes in fish of northern latitudes. *Voprosy ikhtiologii*, 33(3), pp. 401–406. (In Russ.)
- Prosser, L. 1977. Temperature. In *Comparative physiology of animals*, 2. Moscow, pp. 84–209. (In Russ.)
- Pushchina, O. I. 2005. Feeding and nutritional relationships of mass species of bottom fish in the waters of Primorye in the spring. *Izvestiya TINRO*, 127, pp. 203–208. (In Russ.)
- Pushchina, O. I., Solomatov, S. F., Borisov, B. M. 2014. Feeding features of Pacific herring *Clupea pallasii*, Walleye pollock *Theragra chalcogramma* and Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in Peter the Great Bay (the Japan/ East Sea). *Izvestiya TINRO*, 176, pp. 189–200. EDN: SFCKJP. (In Russ.)
- Radzinskaya, L. I., Nikolskaya, I. S., Chudakova, I. V. 1987. The effect of allatectomy on respiration, weight and life duration of the house cricket *Acheta domestica* L. *Ontogenez*, 18(3), pp. 281–287. (In Russ.)
- Slonim, A. D. 1971. Ecological physiology of animals. Moscow. (In Russ.)
- Sukhanov, V. V., Kafanov, A. I. 1983. Temperature dependence of the duration of development and life in poikilothermic animals: ecological and physiological interpretation. *Russian Journal of Marine Biology*, 9(5), pp. 21–27. EDN: WCAIXT. (In Russ.)
- Sukhanov, V. V. 1979. The growth of poikilothermic organisms under the influence of temperature and food conditions of the environment. *Russian Journal of Marine Biology*, 4, pp. 6–13. EDN: WCAHJJ. (In Russ.)
- Fange, R., Grove, D. 1983. Digestion. In *Bioenergetics and growth of fish*. Moscow, pp. 112–202. (In Russ.)

- Shilov, I. A. 2001. Ecology. Moscow. (In Russ.)
- Schmidt-Nielsen, K. 1982. Animal physiology, adaptation and environment, Book 1. Moscow. (In Russ.)
- Schmidt-Nielsen, K. 1987. Animal sizes: Why are they so important? Moscow. (In Russ.)
- Campana, S. E. 2001. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Fish Biology*, 59(2), pp. 197–242. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2001.tb00127.x>.
- Elliot, J. M. 1975. The growth rate of brown trout, *Salmo trutta* L., fed on maximum ration. *The Journal of Animal Ecology*, 44(3), pp. 805–821. DOI: <https://doi.org/10.2307/3720>.
- Irie, T. 1986. Stock assessment of Hokke (*Pleurogrammus azonus*) and estimation of the effect of fishing regulation for the stock. *Report of Fish. Res. Invest. Japan. Gov.*, 25 (Nov.), pp. 74–97. (In Japanese with English abstract)
- Takashima, T., Okada, N., Asami, H., Hoshino, N. et al. 2016. Maturation process and reproductive biology of female Arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* in the Sea of Japan, off the west coast of Hokkaido. *Fisheries Science*, 82(2), pp. 225–240.
- Vdovin, A., Antonenko, D. 2014. Correlation between fat content and features of generative growth of arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*. *Journal of Coastal Life Medicine*, 2(9), pp. 679–683.

#### Сведения об авторах

**Вдовин Александр Николаевич** – пер. Шевченко, 4, г. Владивосток, Россия, 690091; Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии ("ВНИРО"), Тихоокеанский филиал ("ТИНРО"), канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [aleksandr.vdovin@tinro-center.ru](mailto:aleksandr.vdovin@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-5340>

**Alexander N. Vdovin** – 4 Shevchenko Lane, Vladivostok, Russia, 690091; Pacific Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography "VNIRO" ("TINRO"), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher; e-mail: [aleksandr.vdovin@tinro-center.ru](mailto:aleksandr.vdovin@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0754-5340>

**Четырбоцкий Александр Наумович** – пр. 100-летия Владивостока, 159, г. Владивосток, Россия, 690022; Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [chetyrbotsky@yandex.ru](mailto:chetyrbotsky@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3982-3608>

**Alexander N. Chetyrbotsky** – 159, 100-letiya Ave., Vladivostok, Russia, 690022; Far East Geological Institute FEB RAS, Dr Sci. (Physics & Mathematics), Senior Researcher; e-mail: [chetyrbotsky@yandex.ru](mailto:chetyrbotsky@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3982-3608>

**Измятинский Денис Владимирович** – пер. Шевченко, 4, г. Владивосток, Россия, 690091; Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии ("ВНИРО"), Тихоокеанский филиал ("ТИНРО"), канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [denis.izmyatinskiy@tinro-center.ru](mailto:denis.izmyatinskiy@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5167-330X>

**Denis V. Izmyatinsky** – 4 Shevchenko Lane, Vladivostok, Russia, 690091; Pacific Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography "VNIRO" ("TINRO"), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher; e-mail: [denis.izmyatinskiy@tinro-center.ru](mailto:denis.izmyatinskiy@tinro-center.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5167-330X>

УДК 574.3

## Особенности структуры популяции *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) в разных районах Мурманского берега Баренцева моря в 2021 г.

С. В. Малавенда\*, В. Д. Никулина

\*Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия;  
e-mail: malavenda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8314-3255>

### Информация о статье

### Реферат

Поступила в редакцию 06.04.2023; получена после доработки 25.04.2023; принята к публикации 26.04.2023

### Ключевые слова:

фукусовые водоросли, температура воды, антропогенное загрязнение, возраст, длина и масса талломов

Возрастная, размерно-массовая и репродуктивная структура популяции *Fucus vesiculosus* в районах Мурманского берега изучена на валунных грунтах среднего горизонта литорали при ослабленном прибое. В исследованных районах, характеризующихся различными температурными условиями и степенью антропогенного воздействия, биомасса *F. vesiculosus* статистически достоверно не различается. Минимальная численность популяции выявлена в среднем колене Кольского залива, максимальная – в восточных районах. В более теплых губах Печенга и Ретинская рецептакулы образуются на талломах с большим количеством ветвлений, чем в губах Зеленецкая и Ярнышная; талломы на западном Мурмане имеют меньший возраст появления рецептакулов. Линейные размеры талломов и их масса не различаются на исследованных участках. Начало прорастания зигот, судя по размерам проростков, одинаково на всем побережье. Максимальная фертильность наблюдается в возрасте 2,5–3 лет. Различия между ценопопуляциями *F. vesiculosus* Западного и Восточного Мурмана свидетельствуют о важной роли климата в формировании облика литоральной растительности. Существующий уровень загрязнения в Кольском заливе оказывает негативное воздействие на выживаемость проростков фукуса, однако можно сделать вывод о том, что продолжительность жизни талломов высокая и состояние популяции является устойчивым.

### Для цитирования

Малавенда С. В. и др. Особенности структуры популяции *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) в разных районах Мурманского берега Баренцева моря в 2021 г. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 112–120. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-112-120

## Features of the population structure of *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) in different areas of the Murmansk coast of the Barents Sea, 2021

Svetlana V. Malavenda\*, Viktoria D. Nikulina

\*Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia;  
e-mail: malavenda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8314-3255>

### Article info

### Abstract

Received 06.04.2023;

received in revised 25.04.2023;

accepted 26.04.2023

### Key words:

fucus algae, water temperature, anthropogenic pollution, age, length and mass of thalli

The age, size-mass and reproductive structure of the *Fucus vesiculosus* population in the areas of the Murmansk coast has been studied on boulder soils of the middle horizon of the littoral with weakened surf. In the studied areas characterized by different temperature conditions and the degree of anthropogenic impact the biomass of *F. vesiculosus* does not differ statistically significantly. The minimum population size has been found in the middle knee of the Kola Bay, the maximum – at the eastern stations. In the warmer Pechenga and Retinskaya Bays, receptacles form on thalli with more branching than in the Zelenetskaya and Yarnyshnaya Bays; thalli in western Murman have a lower age of appearance of receptacles. The linear dimensions of thalli and their mass do not differ in the studied areas. The beginning of zygote germination judging by the size of seedlings is the same on the entire coast. Maximum fertility is observed at the age of 2.5–3 years. Differences between the coenopopulations of *F. vesiculosus* in Western and Eastern Murman indicate the important role of climate in shaping the appearance of littoral vegetation. The current level of pollution in the Kola Bay has a negative impact on the survival of fucus seedlings, however, it can be concluded that the life span of thalli is high and the population is stable.

### For citation

Malavenda, S. V. et al. 2023. Features of the population structure of *Fucus vesiculosus* L. (Phaeophyceae) in different areas of the Murmansk coast of the Barents Sea, 2021. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 112–120. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-112-120

## Введение

Значимость изучения *Fucus vesiculosus* обусловлена его колоссальной биомассой – данный вид формирует примерно половину от общей биомассы водорослей-макрофитов на литорали Мурмана (Малавенда и др., 2015). Фукусовые многолетние размножаются только половым путем; рост строго апикальный. Биомасса фукусовых водорослей может существенно изменяться в связи с климатическими сдвигами (Krause-Jensen et al., 2020; Thyrring et al., 2021; Preston et al., 2023). Все перечисленные факторы оказывают влияние на фукусовые и вслед за ними на фитоценозы в целом (Harley et al., 2012).

Активное исследование фукусовых водорослей Мурмана велось с самого начала альгологических работ на Баренцевом море, но популяционные исследования начались сравнительно недавно. Первое описание популяции *F. vesiculosus* было сделано для южной части Кольского залива (Завалко и др., 2008). Впоследствии были описаны размерно-массовая и возрастная структура популяции *F. vesiculosus* для районов южного и среднего колен Кольского залива (Гончарова и др., 2013; Малавенда и др., 2010; Малавенда, 2016; Канищева и др., 2020), Ура-губы (Евсеева, 2015) и Восточного Мурмана (Малавенда и др., 2008). Актуальность регулярного мониторинга состояния мурманской популяции *F. vesiculosus* обусловлена наличием антропогенной нагрузки на биоту Мурмана<sup>1</sup> (Кольский залив и нефть..., 2018), которая уменьшает видовое разнообразие, изменяет распределение некоторых видов. Однако ранее исследования на Мурмане проводились в основном точно, охватывая лишь небольшой район (одну-две губы, расположенные рядом).

Цель данного исследования – сравнение плотности и структуры популяции *F. vesiculosus* из разных районов Мурманского побережья в летний период. Предположительно, климатическая разница между Западным и Восточным Мурманом, прежде всего в температуре воды, должна оказывать влияние на рост и биомассу *F. vesiculosus*. Антропогенное загрязнение также может негативно сказаться на плотности популяции. Для проверки данного предположения было важно собрать материал в максимально сжатые сроки. Полученные данные отражают текущее состояние зарослей *F. vesiculosus* Мурманского берега и свидетельствуют о важной роли климата и антропогенной нагрузки в формировании облика литоральной растительности.

## Материалы и методы

Район исследования включает семь участков Мурманского побережья (рис. 1). Пробы были отобраны в 2021 г. в губах Печенга, Териберская, Кольском заливе (25–30 июля) и в губах Ярншная и Зеленецкая (14–17 августа) на среднем горизонте литорали, примерно в центральной части пояса произрастания вида. Также были использованы данные, полученные в Печенге (2012 г.), губе Ретинская (2009 и 2013 гг.), губе Завалишина (2013 г.).

Отбор проб осуществляли по стандартной методике учетных площадей (Изучение экосистем..., 2005). На площадке с проективным покрытием более 80 % рамкой со сторонами 0,5 м отбирали по три пробы водорослей. В пробу относили все талломы, основание которых попало внутрь рамки. У талломов определяли массу (точностью до 0,01 г) и общую длину (точностью до 1 мм) от подошвы до кончика апексов; отмечали наличие рецептакул и степень их зрелости. Возраст талломов определяли по числу дихотомических ветвлений лидирующей ветви. У талломов *F. vesiculosus*, произрастающих в западной части побережья, в среднем формируется 4 ветвления за год, в восточной части – 3,5 ветвления, что использовали для расчета абсолютного возраста исследованных экземпляров (Malavenda et al., 2022).

В качестве показателя плотности популяции оценивали биомассу ( $B$ , г/м<sup>2</sup>) и численность ( $N$ , экз./м<sup>2</sup>) талломов. Возрастную структуру популяции описывали как по числу дихотомий, так и абсолютному возрасту талломов. Статистический анализ данных включал в себя расчет средних значений морфологических параметров (длины и массы талломов) и плотности, а также доверительных интервалов к ним при 95%-м уровне значимости. Сравнение средних проводили методом ANOVA в пакете PAST (Hammer et al., 2001).

---

<sup>1</sup> Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2021 г. Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Мурманск, 2022. URL: [file:///C:/Users/inuyukinamv/Downloads/2022.06.29-Doklad\\_za-2021-god.pdf](file:///C:/Users/inuyukinamv/Downloads/2022.06.29-Doklad_za-2021-god.pdf).

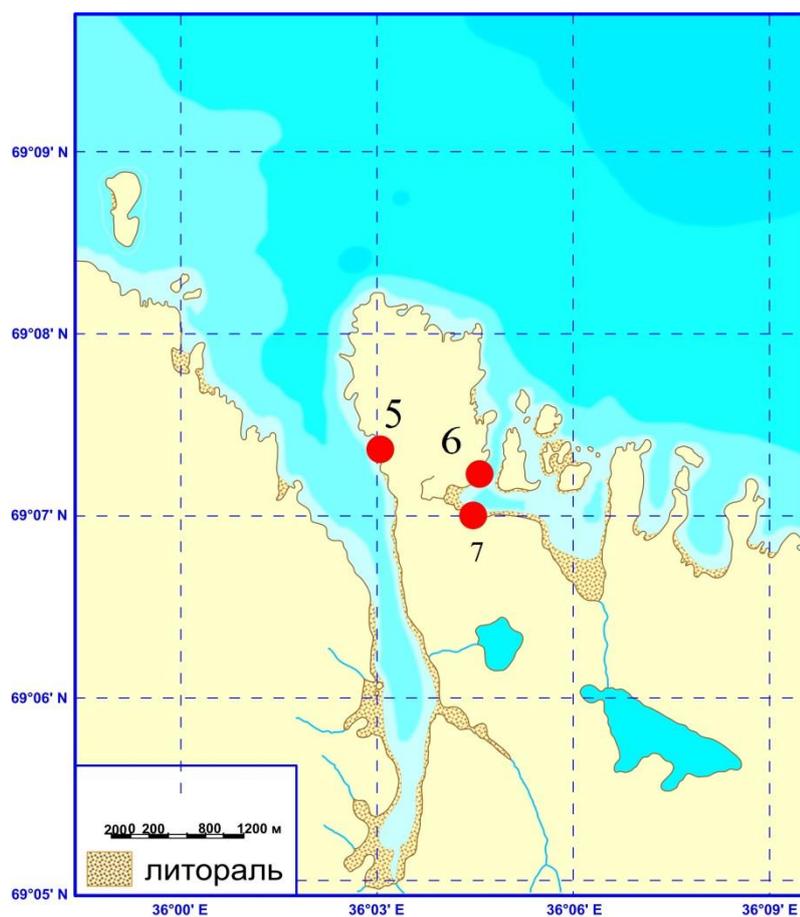
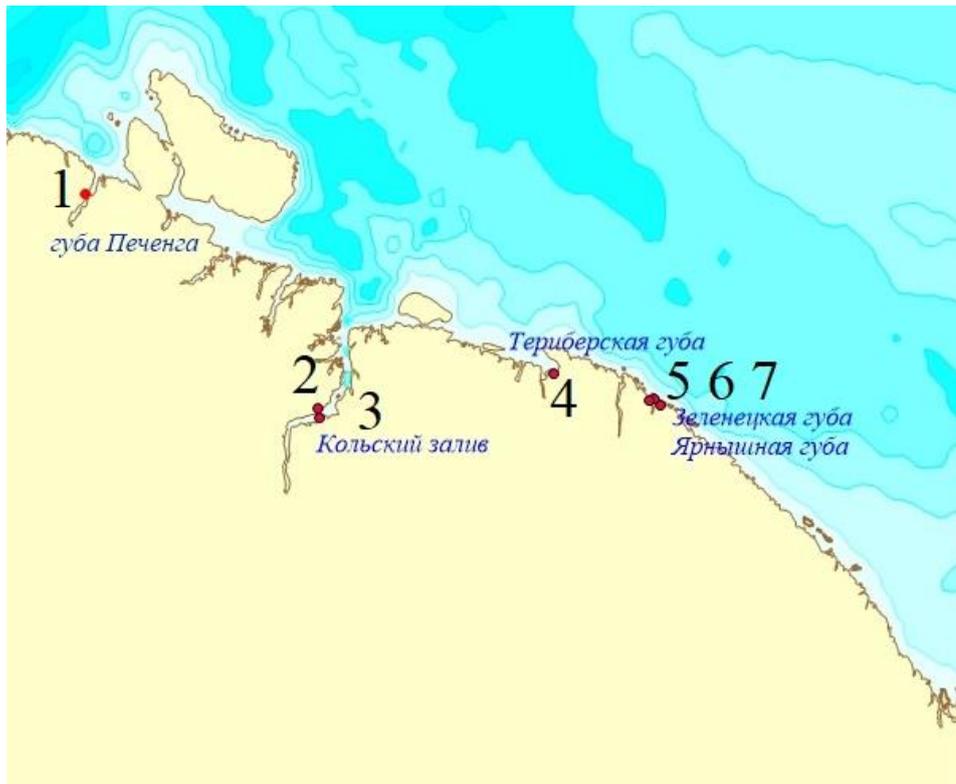


Рис. 1. Районы сбора проб: 1 – губа Печенга; 2 – губа Ретинская; 3 – губа Хлебная; 4 – губа Териберская; 5 – губа Ярнышная; 6 и 7 – губа Зеленецкая  
Fig. 1. Sample collection areas: 1 – Pechenga Bay; 2 – Retinskaya Bay; 3 – Khlebnaya Bay; 4 – Teriberskaya Bay; 5 – Yarnyshnaya Bay; 6 and 7 – Zelenetskaya Bay

## Результаты и обсуждение

### Плотность популяции

Плотность популяции *F. vesiculosus* на участках отбора проб значительно различалась. Максимальная биомасса ( $12\,981\text{ г/м}^2$ ) выявлена в губе Печенга (станция 1), минимальная ( $493\text{ г/м}^2$ ) – в губе Ярнышная (станция 5). Максимальная численность талломов ( $2\,140$  на  $1\text{ м}^2$ ) обнаружена в губе Зеленецкая (станция 6), минимальная ( $190$  талломов на  $1\text{ м}^2$ ) – в губе Ретинская (станция 2). Средние значения биомассы в поселениях *F. vesiculosus* снижались с запада на восток, однако достоверных различий не выявлено (рис. 2, а). Статистический анализ данных биомассы популяции подтвердил различия между участками; критерий  $F = 97,14$ ,  $df = 5,914$ ,  $p = 0,0001$ . Парное сравнение выявило, что различия между станциями 5, 6 и другими станциями достоверны. Также проверка различий данных по численности показала, что станции 5 и 6 имеют отличия: критерий  $F = 9,991$ ,  $df = 5,654$ ,  $p = 0,0079$  (рис. 2, б).

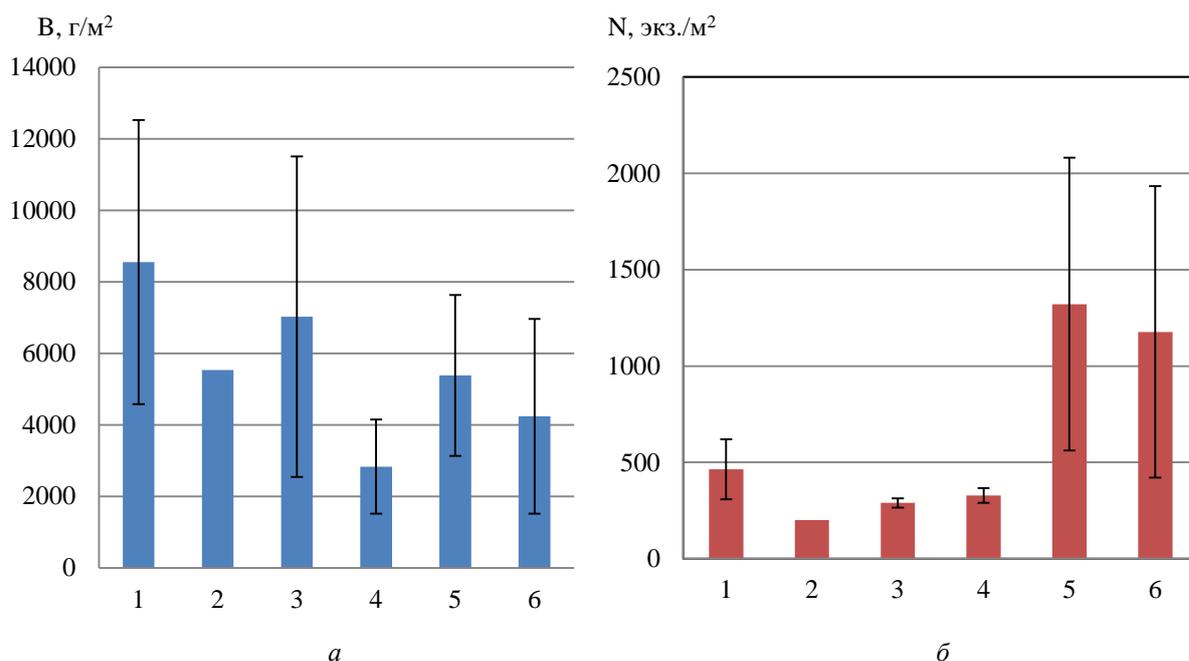


Рис. 2. Плотность популяции *F. vesiculosus* в разных точках Мурманского берега в 2021 г.: а – биомасса, г/м<sup>2</sup>; б – численность, экз./м<sup>2</sup>. На оси абсцисс указаны районы отбора проб.

Районы исследования обозначены согласно карто-схеме (рис. 1)

Fig. 2. Population density of *F. vesiculosus* at different points of the Murmansk coast in 2021: а – biomass, g/m<sup>2</sup>; б – abundance, ind./m<sup>2</sup>. The sampling areas are indicated on the abscissa axis. Numbering as in Fig. 1

Согласно ранее полученным данным в губе Печенга (станция 1) в 2012 г. биомасса *F. vesiculosus* составляла  $7\,269 \pm 2\,640\text{ г/м}^2$ , в губе Ретинская Кольского залива (станция 2) в 2009 г. –  $2\,600 \pm 1\,100\text{ г/м}^2$ , в 2013 г. –  $5\,600 \pm 4\,780\text{ г/м}^2$ , в губе Завалишина (станция 4) –  $562 \pm 279\text{ г/м}^2$ . Парное сравнение данных для одного района с применением критерия Стьюдента дало значения  $t$ -критерия 0,3796 для губы Печенга, 1,969 и 0,0174 – для губы Ретинская (2009, 2013 и 2021 гг.), 2,3846 – для губы Завалишина. Для выборки из трех проб с вероятностью 0,05 все отличия статистически не достоверны. Если анализировать только средние арифметические, то биомасса *F. vesiculosus* растет в последние годы, но разницу доказать сложно из-за очень неравномерного распределения биомассы на литорали.

### Возрастная структура популяции

Возрастная структура популяции в разных районах Мурмана различалась по продолжительности жизни и распределению численности одновозрастных талломов, но имела несколько общих черт: 1) очень низкое количество талломов с одним-двумя ветвлениями в губах Печенга и Териберская и постепенное увеличение числа талломов возрастом до 5–6 ветвлений; 2) неравномерное распределение численности талломов по возрастам в губе Ретинская Кольского залива (рис. 3, а).

### Размерно-массовая структура

Размерно-массовая структура популяции *F. vesiculosus* в целом типична для данного вида: с увеличением возраста талломов их масса возрастает по экспоненте (рис. 3, б), а длина – линейно (рис. 3, в).

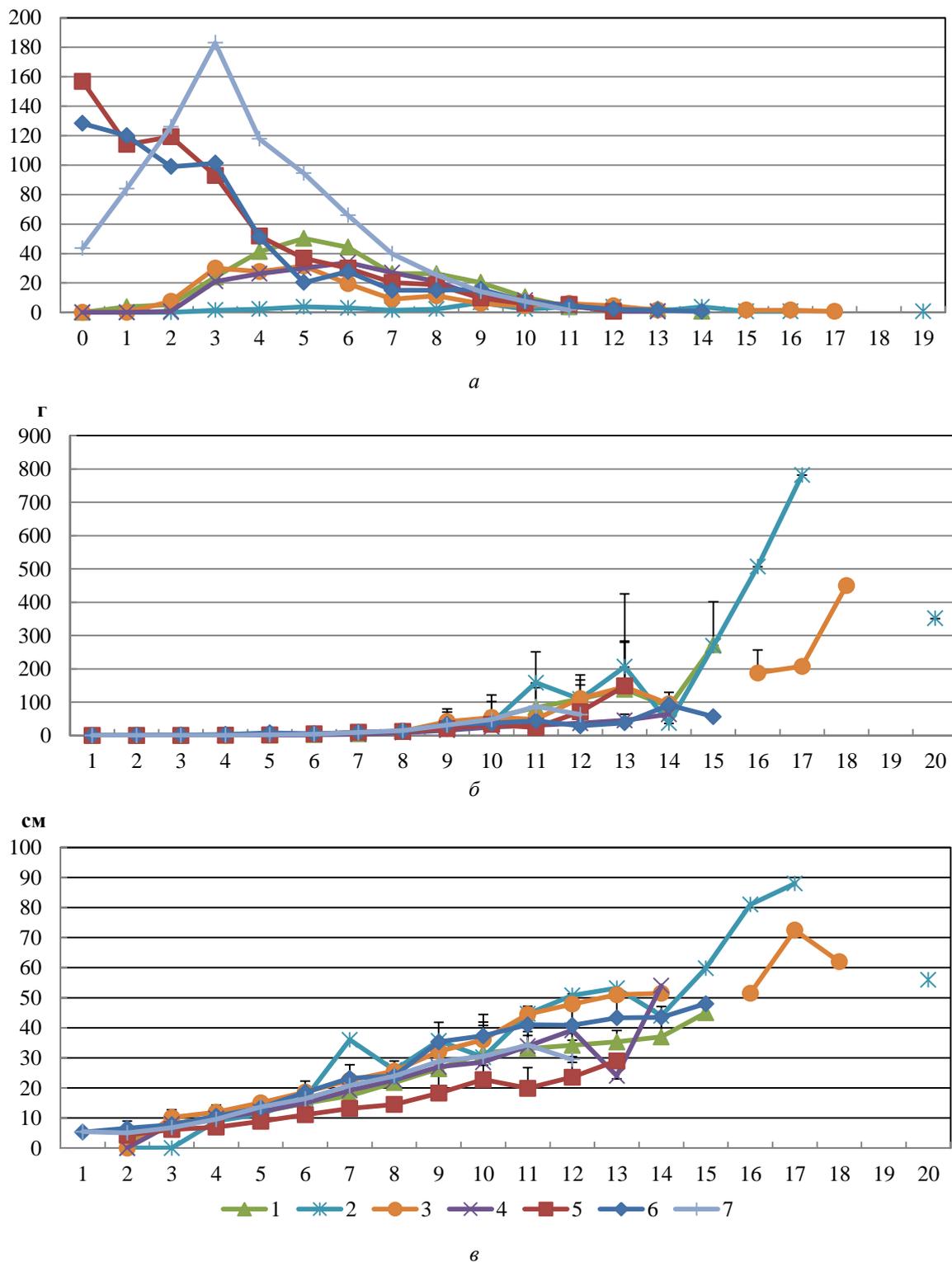


Рис. 3. Структура популяции *F. vesiculosus* на Мурманском побережье в 2021 г.: а – число талломов с определенным числом ветвлений (на 1 м<sup>2</sup>); б – средняя масса талломов с определенным числом ветвлений, г; в – средняя длина талломов с определенным числом ветвлений, см.

По оси абсцисс – число дихотомических ветвлений на лидирующей ветви таллома.

Районы исследования обозначены согласно карто-схеме (рис. 1)

Fig. 3. Population structure of *F. vesiculosus* on the Murmansk coast in 2021:

a – the number of thalli with a certain number of branches (per 1 m<sup>2</sup>); б – the average mass of thalli with a certain number of branches, g; в – the average length of thalli with a certain number of branches, sm.

Along the abscissa axis – the number of dichotomous branches on the leading branch of the thallus.

The study areas are indicated by numbers according to the cartographic diagram, Fig. 1

### Репродуктивная структура

Репродуктивная структура популяции оценивалась только по числу фертильных талломов (талломов с рецептакулами). В губах Печенга и Ретинская 100%-я фертильность наступала у талломов с 10 ветвлениями, в губе Териберская – с 8 ветвлениями. В то же время возраст, с которого талломы приступали к размножению в 2021 г., значительно варьировал: в губе Печенга рецептакулы обнаруживались у талломов с 2 ветвлениями, в губе Ретинская – с 8, Териберская – с 5 ветвлениями.

Западный и Восточный Мурман относятся к разным климатическим провинциям Баренцева моря, поскольку температуры воды и воздуха здесь достоверно различаются, что подтверждается многолетними данными метеостанций, расположенных в районах исследования: в губах Печенга и Териберская, в Кольском заливе (порт Мурманск), на острове Харлов<sup>2</sup>. Полученные данные свидетельствуют о том, что температура снижается в направлении с запада на восток, поскольку теплое Мурманское прибрежное течение постепенно ослабевает и отходит от берега (таблица).

Таблица. Средняя температура воды в районах исследования<sup>3</sup>  
Table. The water average temperature in the study areas

Месяц	Губа Печенга (пос. Лиинахамари)	Кольский залив (г. Мурманск)	Губа Териберская (пос. Териберка)	Остров Харлов (вблизи губ Ярнышная и Зеленецкая)
Июнь	8,16	6,99	5,94	4,47
Июль	11,02	9,67	9,52	6,82
Август	10,71	9,79	9,71	7,88
Сентябрь	8,28	8,05	8,05	7,36
Февраль	1,04	0,72	0,14	-0,25
Март	0,91	0,67	0,16	0,0

Предыдущие исследования показали, что у талломов с 6 ветвлениями в губе Печенга за год формируется в среднем 4 ветвления, а в губе Зеленецкая – 3,5 ветвлений. (*Malavenda et al.*, 2022). Данное исследование выявило, что в более теплых губах Печенга и Ретинская рецептакулы образуются на талломах с большим количеством ветвлений, чем в губах Зеленецкая и Ярнышная, но возраст талломов, способных формировать рецептакулы, составляет 2,5–3 года. В губе Печенга обнаружено больше талломов, на которых сформировались рецептакулы при меньшем числе дихотомий. Точные причины размножения талломов разного возраста и значительного разброса в скорости роста предстоит выяснить в ходе дальнейших исследований.

Начало прорастания зигот, судя по размерам проростков, одинаково на всем Мурмане. Однако выявлено принципиальное различие в доле молодых талломов в поселениях фукусов на западе и на востоке Мурманского побережья (рис. 2, а).

Работы на Западном и Восточном Мурмане проводились с разрывом в две недели. За это время появились молодые талломы с 1 ветвлением (или без ветвлений). Возможно, поэтому так существенно различается доля таких талломов в разных районах (рис. 2, а). Длина и масса одного таллома незначительно различаются в разных местообитаниях; различия статистически недостоверны. В возрасте 4–5 лет в сообществе выявляются единичные талломы, у которых есть оборванные ветви.

Отмеченная в 2021 г. очень низкая доля талломов *F. vesiculosus* 1-го года жизни в Кольском заливе согласуется с литературными данными. В 1999 и 2009 гг. доля молодых талломов также была очень мала (*Канищева (Гончарова)*, 2015). Исследователи указали в качестве основной причины наличие нефтяной пленки в заливе, которая препятствует выживанию проростков водорослей. В 2021 г. загрязнение тяжелыми металлами и нефтепродуктами в Кольском заливе сохранялось<sup>4</sup>. Поселение в заливе самоподдерживается, но ситуация внушает опасение, что может быть нарушено воспроизводство фукусов под влиянием антропогенного загрязнения.

<sup>2</sup> Климат морей России и ключевых районов Мирового океана: Электронный атлас [входит в Единую систему информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО)] / ВНИИГМИ МЦД. Обнинск, [Б. г.] ([http://www.esimo.ru/atlas/Var/2\\_watertemp.html](http://www.esimo.ru/atlas/Var/2_watertemp.html)). Дата обращения 31.01.2023.

<sup>3</sup> Там же.

<sup>4</sup> Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2021 г. Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области. Мурманск, 2022. URL: [file:///C:/Users/inuyukinamv/Downloads/2022.06.29-Doklad\\_za-2021-god.pdf](file:///C:/Users/inuyukinamv/Downloads/2022.06.29-Doklad_za-2021-god.pdf).

### Заключение

Популяция *F. vesiculosus* Мурмана находится в устойчивом состоянии, идет естественное воспроизводство, биомасса стабильна. На скорость линейного роста талломов и образование дихотомических ветвлений влияет средняя температура воды, но срок появления проростков, средняя длина и масса талломов с одинаковым числом ветвлений на всех обследованных районах Мурманского берега достоверно не различаются. В Кольском заливе, несмотря на очевидное негативное влияние загрязнений, популяция не исчезает и имеет высокую продолжительность жизни, однако следует отметить низкие значения биомассы и численности талломов первого года жизни.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках госзадания ММБИ РАН 9-22-01 "Донные биоценозы Баренцева моря, его водосборного бассейна и сопредельных вод в современных условиях".

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Гончарова О. В., Шошина Е. В. Морфофункциональные параметры *Fucus vesiculosus* в условиях Кольского залива // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 437–448. EDN: RJVILN.
- Евсеева Н. В. Структура ценопопуляций промысловых фукусовых водорослей на литорали Западного Мурмана // Труды ВНИРО. 2015. Т. 154. С. 70–79. EDN: UADJVV.
- Завалко С. Е., Шошина Е. В. Многоуровневая морфофизиологическая оценка состояния фукусовых водорослей в условиях антропогенного загрязнения (Кольский залив, Баренцево море) // Вестник МГТУ. 2008. Т. 11, № 3. С. 423–431. EDN: JRGMD.
- Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. Выпуск 3. Методы ландшафтных исследований и оценки запасов донных беспозвоночных и водорослей морской прибрежной зоны / авт.-сост.: Е. И. Блинова, О. Ю. Вилкова, Д. М. Милютин [и др.]. М. : ВНИРО, 2005. 135 с.
- Канищева (Гончарова) О. В., Шошина Е. В. Возрастная структура поселений *Fucus vesiculosus* на литорали Кольского залива // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25, № 1. С. 40–47. EDN: TNCVZT.
- Канищева О. В., Канищев А. А., Шошина Е. В. Многолетняя изменчивость возрастной структуры ценопопуляции фукуса пузырчатого (*Fucus vesiculosus* L.) на литорали Кольского залива в условиях антропогенного воздействия // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 2. С. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-2-139-149>. EDN: HJVDSH.
- Кольский залив и нефть: биота, карты уязвимости, загрязнение / под ред. А. А. Шавыкина. РАН. СПб. : Реноме, 2018. 520 с.
- Малавенда С. В., Воскобойников Г. М. Влияние абиотических факторов на структуру популяции бурой водоросли *Fucus vesiculosus* Восточного Мурмана (Баренцево море) // Биология моря. 2008. Т. 34, № 1. С. 30–34. EDN: OWNVYF.
- Малавенда С. В., Шавыкин А. А., Ващенко П. С. Биомасса макрофитобентоса и районы его наибольшей уязвимости от разливов нефти в Кольском заливе // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 12. С. 5–12. EDN: UYHJVX.
- Малавенда С. С. Динамика биомассы и численности фукусовых водорослей Кольского залива Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1/2. С. 296–301. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/2-296-301>. EDN: VXPVFT.
- Малавенда С. С., Кравец П. П., Шошина Е. В. Исследование фитобентосных сообществ литорали губы Тюва Кольского залива // Рыбное хозяйство. 2010. № 5. С. 62–65. EDN: NBICHD.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4, Iss. 1. Article number 9. URL: [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- Harley C. D. G., Anderson K. M., Demes K. W., Jorve J. [et al.]. Effects of climate change on global seaweed communities // Journal of Phycology. 2012. Vol. 48, Iss. 5. P. 1064–1078. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>.
- Krause-Jensen D., Archambault P., Assis J., Bartsch I. [et al.]. Imprint of climate change on pan-Arctic marine vegetation // Frontiers in Marine Science. 2020. Vol. 7. Article number 617324. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.617324>

- Malavenda S. S., Malavenda S. V. Growth rate of Fucales on the Murman Coast, the Barents Sea // *BIO Web of Conferences*. 2022. Vol. 52. Article number 00077. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200077>.
- Preston R., Rodil I. F. Genetic characteristics influence the phenotype of marine macroalga *Fucus vesiculosus* (Phaeophyceae) // *Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 13, № 2. Article number e9788. <https://doi.org/10.1002/ece3.9788>.
- Thyrring J., Wegeberg S., Blicher M. E., Krause-Jensen D. [et al.]. Latitudinal patterns in intertidal ecosystem structure in West Greenland suggest resilience to climate change // *Ecography*. 2021. Vol. 44, Iss. 8. P. 1156–1168. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.05381>.

## References

- Goncharova, O. V., Shoshina, E. V. 2013. Morphofunctional parameters of *Fucus vesiculosus* in the conditions of the Kola Bay. *Vestnik of MSTU*, 16(3), pp. 437–448. EDN: RJVILN. (In Russ.)
- Evseeva, N. V. 2015. Structure of cenopopulations of commercial fucus algae on the littoral of Western Murmansk. *Trudy VNIRO*, 154, pp. 70–79. EDN: UADJVV. (In Russ.)
- Zavalko, S. E., Shoshina, E. V. 2008. Multilevel morphophysiological assessment of the state of fucus algae in conditions of anthropogenic pollution (Kola Bay, Barents Sea). *Vestnik of MSTU*, 11(3), pp. 423–431. EDN: JRGMD. (In Russ.)
- Study of ecosystems of fishery reservoirs, collection and processing of data on aquatic biological resources, equipment and technology for their extraction and processing. 2005. Iss. 3. In *Methods of landscape research and assessment of stocks of benthic invertebrates and algae of the marine coastal zone*. Eds.: E. I. Blinova et al. Moscow. (In Russ.)
- Kanishcheva (Goncharova), O. V., Shoshina, E. V. 2015. Age structure of *Fucus vesiculosus* settlements in the littoral of the Kola Bay. *Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*, 25(1), pp. 40–47. EDN: TNCVZT. (In Russ.)
- Kanishcheva, O. V., Kanishchev, A. A., Shoshina, E. V. 2020. Long-term variability of the age structure of the coenopopulation of *Fucus vesiculosus* L. on the littoral of the Kola Bay under anthropogenic impact. *Vestnik of MSTU*, 23(2), pp. 139–149. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-2-139-149>. EDN: HJVDSH. (In Russ.)
- Kola Bay and oil: Biota, vulnerability maps, pollution. 2018. Ed. A. A. Shavykin. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Malavenda, S. V., Voskoboynikov, G. M. 2008. Influence of abiotic factors on the structure of the population of the brown algae *Fucus vesiculosus* of the Eastern Murmansk (the Barents Sea). *Biologiya moray*, 34(1), pp. 30–34. EDN: OWNVYF. (In Russ.)
- Malavenda, S. V., Shavykin, A. A., Vashchenko, P. S. 2015. Biomass of macrophytobenthos and areas of its greatest vulnerability to oil spills in the Kola Bay. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 12, pp. 5–12. EDN: UYHJVX. (In Russ.)
- Malavenda, S. S. 2016. Dynamics of biomass and abundance of fucus algae of the Kola Bay of the Barents Sea. *Vestnik of MSTU*, 19(1/2), pp. 296–301. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2016-1/2-296-301>. EDN: VXPFVT. (In Russ.)
- Malavenda, S. S., Kravets, P. P., Shoshina, E. V. 2010. Investigation of phytobenthic communities of the littoral of the Tyuva Bay of the Kola Bay. *Fisheries*, 5, pp. 62–65. EDN: NBICH. (In Russ.)
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1). Article number 9. URL: [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- Harley, C. D. G., Anderson, K. M., Demes, K. W., Jorve, J. et al. 2012. Effects of climate change on global seaweed communities. *Journal of Phycology*, 48(5), pp. 1064–1078. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2012.01224.x>.
- Krause-Jensen, D., Archambault, P., Assis, J., Bartsch, I. et al. 2020. Imprint of climate change on pan-Arctic marine vegetation. *Frontiers in Marine Science*, 7. Article number 617324. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.617324>
- Malavenda, S. S., Malavenda, S. V. 2022. Growth rate of Fucales on the Murman Coast, the Barents Sea. *BIO Web of Conferences*, 52. Article number 00077. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20225200077>.
- Preston, R., Rodil, I. F. 2023. Genetic characteristics influence the phenotype of marine macroalga *Fucus vesiculosus* (Phaeophyceae). *Ecology and Evolution*, 13(2). Article number e9788. <https://doi.org/10.1002/ece3.9788>.
- Thyrring, J., Wegeberg, S., Blicher, M. E., Krause-Jensen, D. et al. 2021. Latitudinal patterns in intertidal ecosystem structure in West Greenland suggest resilience to climate change. *Ecography*, 44(8), pp. 1156–1168. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.05381>.

**Сведения об авторах**

**Малавенда Светлана Владимировна** – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010;  
Мурманский морской биологический институт РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: malavenda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8314-3255>

**Svetlana V. Malavenda** – 17, Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Marine  
Biological Institute RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Scientist;  
e-mail: malavenda@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8314-3255>

**Никулина Виктория Дмитриевна** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;  
Мурманский государственный технический университет, лаборант; e-mail: vika.nikulina.2000@mail.ru

**Victoria D. Nikulina** – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;  
Murmansk State Technical University, Laboratory Assistant; e-mail: vika.nikulina.2000@mail.ru

УДК 500.7

## Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной среде

М. В. Пахомов, А. А. Зайцев\*, Ю. В. Литвинов, А. Р. Трошичев

\*Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
30.03.2023;  
  
получена  
после доработки  
27.04.2023;  
  
принята  
к публикации  
10.05.2023

### Ключевые слова:

серый тюлень,  
аудиограмма,  
слух в воздухе,  
слух под водой

### Реферат

Антропогенная шумовая нагрузка на традиционные места обитания морских млекопитающих продолжает возрастать в связи с активным освоением Арктической зоны. Изучение слуха арктических тюленей имеет большое значение для разработки мер по снижению степени воздействия техногенных шумов. В ходе исследования группу из десяти серых тюленей разного возраста и пола обучили нажимать на специальную клавишу при демонстрации звука чистого тона с частотой из стандартного и расширенного набора частот, рекомендованных для проведения тональной аудиометрии. Эксперименты проводили при размещении клавиши и источника звука в воздушной и водной (на глубине 2 м) среде. Основным показателем являлось время реакции тюленя на демонстрируемый стимул. Для каждого тюленя были составлены индивидуальные аудиограммы для слуха в воздухе и воде с использованием 32 частот. Анализ полученных данных показал, что время реакции может служить индивидуальным показателем при исследовании слуха серых тюленей, отражающим их возрастные особенности. По времени реакции на звуки с разной частотой тона можно установить биологически значимые и индифферентные частоты для серых тюленей.

### Для цитирования

Пахомов М. В. и др. Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной среде. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 121–130. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130)

## Application of tonal audiometry methods to assess the hearing of grey seals in air and water environments

Miron V. Pakhomov, Alexandr A. Zaytsev\*, Yuri V. Litvinov, Alexandr R. Troshichev

\*Murmansk Marine Biological Institute RAS, Murmansk, Russia;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

### Article info

Received  
30.03.2023;  
  
received  
in revised  
27.04.2023;  
  
accepted  
10.05.2023

### Key words:

grey seal,  
audiogram,  
hearing in the air,  
hearing underwater

### Abstract

Anthropogenic noise load on the traditional habitats of marine mammals continues to increase due to the active development of the Arctic zone. The study of the hearing of Arctic seals is of great importance for the development of measures to reduce the impact of technogenic noise. During the study, a group of ten grey seals of different ages and genders has been trained to press a special key when demonstrating a pure tone sound with a frequency from the standard and extended set of frequencies recommended for pure tone audiometry. The experiments have been carried out by placing the key and the sound source in air and water (at a depth of 2 m) environment. The main indicator is the reaction time of the seal to the demonstrated stimulus. For each seal, individual audiograms for hearing in air and in water have been compiled using 32 frequencies. An analysis of the data obtained has shown that the reaction time can serve as an individual indicator in the study of the hearing of grey seals reflecting their age characteristics. According to the response time to sounds with different tone frequencies it is possible to establish biologically significant and indifferent frequencies for grey seals.

### For citation

Pakhomov, M. V. et al. 2023. Application of tonal audiometry methods to assess the hearing of grey seals in air and water environments. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 121–130. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130)

## Введение

Степень влияния антропогенного шумового загрязнения на морских млекопитающих является дискуссионным вопросом. Ряд авторов указывает, что морские млекопитающие покидают зоны с повышенным уровнем техногенного акустического шума; примером может служить снижение численности ластоногих в районе расположения ветроэлектростанций (*Wilson et al., 2010*) или сокращение численности морских котиков в районе лежки вблизи от Пеликан Пойнт (Намибия) в результате увеличения морских и наземных перевозок (*Martin et al., 2022*). Однако многие авторы публикуют результаты наблюдений за лежбищами ластоногих вблизи аэропортов или портов, где уровень шума достаточно высок (*Johnson et al., 1989; Bonner, 1983*). Явные патологические изменения слуха у морских млекопитающих фиксируются при воздействии мощных источников звуковых сигналов, таких как сонары (*Harris et al., 2018*) и подводные взрывы (*Wiggins et al., 2021*), тем не менее в таких случаях сложно отличить травмирующее действие взрывной волны от воздействий именно звуковых колебаний.

Антропогенная нагрузка на традиционные места обитания морских млекопитающих, прежде всего арктических тюленей, продолжает возрастать в связи с активным освоением Арктической зоны. В указе Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г."<sup>1</sup> предполагается интенсивное развитие судоходства и соответствующей портовой инфраструктуры региона на всем протяжении Северного морского пути. Согласно этому документу регион может пострадать из-за возрастающего антропогенного воздействия и сопутствующих климатических и экологических изменений, что, несомненно, увеличит шумовую нагрузку и на морских млекопитающих.

Таким образом, изучение слуха морских млекопитающих имеет большое значение для разработки мер по снижению степени воздействия техногенных шумов, оптимизации маршрутов и правил судоходства в арктических морях, правил по строительству и эксплуатации морской и прибрежной инфраструктуры в Арктическом регионе. Одним из наиболее информативных и наименее травмирующим методом исследования слуха является тоновая аудиометрия, так как, во-первых, в ходе ее применения собрана база данных медицинских и ветеринарных исследований, во-вторых, указанный метод отлично адаптируется с методами регистрации поведенческих реакций, используемых при работе с морскими млекопитающими. В научной литературе представлены исследования слуха серых тюленей в воздушной среде (*Ruser et al., 2014*), ларг (*Sills et al., 2014*) и кольчатых нерп (*Sills et al., 2015*) в воздушной и водных среде. Основным показателем слуха в этих исследованиях служил пороговый уровень звукового давления, при котором животное выказывало поведенческую реакцию (*Sills et al., 2014; 2015*) или регистрировались вызванные потенциалы спинного мозга (*Ruser et al., 2014*). Следует отметить, что обе методики требуют либо долговременной высококвалифицированной тренерской подготовки исследуемого животного, либо применения наркоза, как при изучении слуха серых тюленей.

При применении тоновой аудиометрии основным показателем являлось время реакции на предъявляемый звуковой стимул, т. е. время между началом демонстрации звукового сигнала и нажатием на специальную клавишу. В предыдущих исследованиях зрения (*Пахомов и др., 2022*) и слуха (*Литвинов и др., 2019; 2022*) серых тюленей было установлено, что время реакции является достаточно надежным показателем сенсомоторной реакции исследуемого животного на стимулы разной модальности.

В ходе исследований (*Литвинов и др., 2022*) тюлени были обучены реагировать нажатием на клавишу при демонстрации чистого тона на заданной частоте. Работы проводились в воздушной среде с использованием 10 типовых частот (125, 250, 500, 1 250 Гц; 3, 8, 12,5, 16, 20 кГц), наиболее часто применяемых при изучении слуха ластоногих (*Ruser et al., 2014; Sills et al., 2014; 2015*). Экспериментально установлено, что время реакции на звуковой раздражитель может быть показателем сенсомоторной реакции серых тюленей. Полученные данные продемонстрировали индивидуальные, возрастные, половые различия испытуемых серых тюленей во времени реакции на звуки с разной частотой тона и послужили основой для исследования слуха серых тюленей не только в воздушной, но и в водной среде, с использованием как стандартного, так и расширенного набора частот, рекомендованных для проведения тональной аудиометрии (ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017).

Целями настоящего исследования являются: 1) установление для каждого исследуемого тюленя показателей времени реакции на звуковой стимул чистого тона с частотами из наборов стандартного и расширенного диапазонов, используемых в тональной аудиометрии; 2) получение данных о восприятии набора звуковых стимулов в воздушной среде и аналогичных наборов звуковых стимулов в водной среде; 3) определение индивидуальных отличий во времени реакции на звуковой стимул в зависимости от частоты тона при восприятии в воздушной и водной среде; 4) сравнительный анализ индивидуальных показателей тюленей и выявление возрастных и половых отличий.

---

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года".

## Материалы и методы

Экспериментальные работы проведены в аквакомплексе Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ РАН) в Кольском заливе Баренцева моря.

В качестве экспериментальных животных использовались серые тюлени (*Halecoerus grupus* Fabricius, 1791), которые подразделялись на три возрастных группы: 15-летние – 4 самки (тюлени под номерами 1–4); 5-летние – 3 самки (номера 5–7) и 1 самец (номер 8); 6-месячные самцы (номера 9 и 10). Все животные принадлежали к одной популяции; 15- и 5-летние тюлени в разное время были отловлены в районе Айновых островов в период окончания постнатальной линьки; 6-месячные тюлени были рождены самкой под номером 4 (тюлень 9 – в 2019 г., тюлень 10 – в 2021 г.). Эксперименты со взрослыми тюленями и молодым тюленем 9 проводились с 2020 г., с молодым тюленем 10 – с 2022 г.

Работы выполняли по парадигме "стимул – реакция", где стимулом служил звук чистого тона на различных частотах, а реакцией – нажатие тюленем специальной клавиши. Верная реакция подкреплялась пищевым поощрением в виде кусочка рыбы, вес одной порции рассчитывался индивидуально для каждого тюленя.

На момент начала экспериментальных работ все тюлени были физически здоровы, девиаций в поведении не имели; с ними проводились тренировки по выработке и закреплению навыка "стартовая позиция", когда тюлень должен находиться в определенной позиции и не покидать ее до подачи тренером команды (сигнала) на какое-либо действие. В ходе подготовительных тренировок команда тренера заменялась на звуковой сигнал экспериментальной установки, по которому тюлень должен был нажать на клавишу. В надводном положении тюлень располагался вертикально, по шее погружался в воду и удерживал морду на расстоянии не более 1 см от клавиши (или вплотную к ней), ожидая подачи звукового сигнала. Данная позиция была отработана с помощью команды "Таргет!" и поощрения требуемой позиции. В подводном положении тюлень находился в горизонтальном положении на глубине 2 м и также удерживал морду на расстоянии не более 1 см от клавиши (или вплотную к ней), ожидая подачи звукового сигнала. Данная позиция формировалась на базе уже отработанной позиции в надводном положении, но теперь подкреплялось вертикальное "зависание" тюленя на уровне клавиши. Выработка этой позиции упрощалась тем, что подобное зависание является характерным паттерном поведения серого тюленя, которое в естественных условиях используется для засадной охоты (*Bouveroux et al., 2014*). Также у всех исследуемых животных был сформирован навык "концентрации на выполняемой задаче", т. е. подаваемые тренером и экспериментальной установкой команды выполнялись четко и максимально быстро.

У 15- и 5-летних тюленей большинство навыков были отработаны в ходе предыдущих научных и научно-практических работ; 6-месячных тюленей в разное время обучали необходимым навыкам (начиная с 3-месячного возраста).

Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Тюленям демонстрировались 32 чистых тона из стандартного (125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 750, 800, 1 000, 1 250, 1 500, 1 600, 2 000, 2 500, 3 000, 3 150, 3 200, 4 000, 5 000, 6 000, 6 300, 8 000 Гц) и из расширенного набора частот (9 000, 10 000, 11 200, 12 500, 14 000, 16 000, 18 000, 20 000 Гц), рекомендованных для проведения тональной пороговой аудиометрии (ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017)<sup>2</sup>. Звуковой сигнал создавался в генераторе частоты на основе микросхемы AD9833 по команде с микроконтроллера Arduino UNO R3 и проходил предусиление на цифровом широкодиапазонном усилителе на базе чипа TDA2050, а затем усиливался на усилителе Ural BV 2.70. Звуки на частотах до (и включая) 1 000 Гц воспроизводились на подводной колонке Aquasonic AQ339 (2a); звуки на частотах свыше 1 000 Гц воспроизводились с помощью акустического излучателя на основе пьезоэлектрической диафрагмы CBC2065BAL (2b). Блок динамиков (2) и клавишу (3) размещали на дистанции 1 м друг от друга в воздухе на высоте 30 см от уровня воды и под водой на глубине 2 м.

На каждой тренировке с тюленем проводились работы как в воздушной среде, так и в водной; при этом очередность размещения оборудования в воздушной и водной среде изменялась. Если на первой тренировке сначала оборудование размещалось над водой, а затем погружалось на глубину 2 м, то на следующей сначала проводились подводные испытания, а по их завершении – надводные, и наоборот. Для тюленей 1–9 вопрос первого размещения оборудования решался с помощью порядкового номера исследуемого животного: четные номера – первое размещение оборудования в воздушной среде, нечетные номера – в водной. Для молодого тюленя 10 было выбрано первое размещение оборудования в воздушной среде.

Частоты были разделены на три блока: низкие (125–800 Гц); средние (1 000–8 000 Гц); высокие (9 000–20 000 Гц). Сначала с тюленем отработывался блок средних частот, затем низких, затем высоких. В каждом блоке каждая частота звучала дважды. Последовательность частот генерировалась случайным образом, при этом одна и та же частота не воспроизводилась дважды подряд. Для генерации случайных

<sup>2</sup> ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017. Электроакустика. Аудиометрическое оборудование. Часть 1. Оборудование для тональной и речевой аудиометрии. 2017.

чисел использовался интегрированный в Arduino UNO R3 генератор псевдослучайных чисел с источником в виде электромагнитных помех на первом аналоговом входе.

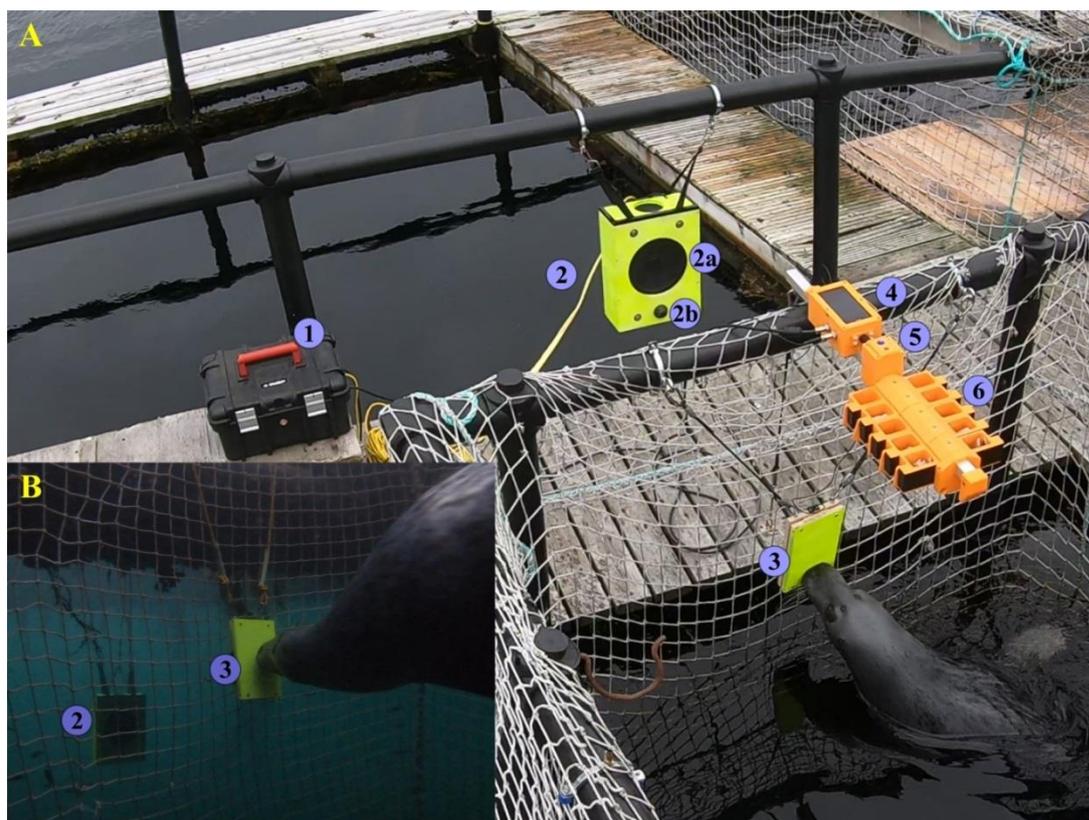


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: А – в надводном положении; Б – в подводном положении; 1 – блок питания, генерации и усиления звукового сигнала; 2 – блок динамиков; 2а – низкочастотный динамик; 2б – высокочастотный динамик; 3 – клавиша для взаимодействия с тюленем; 4 – блок управления; 5 – пульт управления; 6 – блок контейнеров с рыбой

Fig. 1. Experimental installation scheme: A – in air, B – in water; 1 – power, generation and amplifying unit; 2 – acoustic speaker's complex; 2a – low frequency speaker; 2b – high-frequency speaker; 3 – the key for interacting with the seal; 4 – control unit; 5 – control plate; 6 – a case of containers with fish

Интенсивность звука была константна и составляла 50 Дб (отн. 20 мкПа) на расстоянии 1 м от источника на всем диапазоне используемых частот; уровень громкости подстраивался системой автоматически для каждой частоты в соответствии с калибровочными данными для воздушной и водной среды. Такой уровень звукового давления был выбран потому, что, во-первых, естественный уровень акустического шума в районе проведения эксперимента составлял в среднем 35 дБ (отн. 20 мкПа) над водой и 38 дБ (отн. 20 мкПа) под водой на глубине 2 м; во-вторых, при таком уровне звукового давления звук воспринимается именно слуховой системой и не имеет тактильного воздействия, что показано в ряде исследований (*Levänen et al., 2001; Yau et al., 2010; Bernard et al., 2022*).

Работы проводились два раза в день утром и вечером, когда уровень естественного акустического шума минимален и не превышает 40 Дб (отн. 20 мкПа) над и под водой.

Экспериментальная установка работала в автоматическом режиме по следующей схеме. Оператор перед началом каждого опыта оценивал состояние тюленя и окружающей среды, если все было в норме, то принимал решение о начале работы. В контейнеры (5) заряжались 10 порций рыбы; на смартфоне в блоке управления (4) выбирался тюлень, с которым будет проводиться исследование, и по нажатию кнопки на пульте управления (5) запускалась программа опыта. После запуска оператор отходил от вольера, чтобы тюлень не мог его видеть. Система отсчитывала 30 с, давая человеку возможность удалиться, и запускала первый цикл опытов. Установка в случайном порядке выдерживала интервал времени в диапазоне 10–30 с и подавала звуковой сигнал заданной частоты в течение 3 с; если тюлень в это время нажимал на клавишу (3), то система подавала звуковой бридж-сигнал положительного подкрепления (долгий свист), затем запускала механизм открывания первого контейнера (в дальнейших циклах номер контейнера соответствовал номеру цикла), выдавая тюленю кусочек рыбы. Далее система делала задержку в работе на 10 с, давая тюленю возможность съесть кусочек рыбы, а при подводной работе вдохнуть воздуха, и начинала новый цикл.

Если тюлень нажимал на клавишу, когда звуковой стимул не транслировался, то система подавала звуковой бридж-сигнал наказания (два коротких свиста) и начисляла к времени ожидания "штрафные" 10 с. Пропуск звукового сигнала не наказывался; система выдерживала интервал времени в диапазоне 10–20 с и снова проигрывала тот же звуковой сигнал.

Проведя 10 циклов, система делала перерыв в опыте, переходила в режим ожидания и посылала оператору голосовое послание, дублируя его миганием индикаторной лампы на пульте управления (5). Оператор возвращался к вольеру, оценивал состояние тюленя и принимал решение о продолжении или окончании опытов.

Система самостоятельно прекращала опыт в двух случаях: 1) если тюлень начинал бессистемно нажимать или удерживать нажатой клавишу, то каждые 2 с ему начислялись "штрафные" 10 с; при наборе суммарного времени ожидания более 120 с система прекращала опыт и посылала оператору соответствующее звуковое сообщение; 2) если тюлень более 5 раз подряд игнорировал подачу звукового сигнала, то система также прекращала текущий опыт и сигнализировала оператору.

### Результаты и обсуждение

С каждым исследуемым тюленем для каждой демонстрируемой частоты проводили по 100 опытов в воздушной и водной среде. Результаты в виде средних значений времени реакции на звуковой стимул представлены на рис. 2.

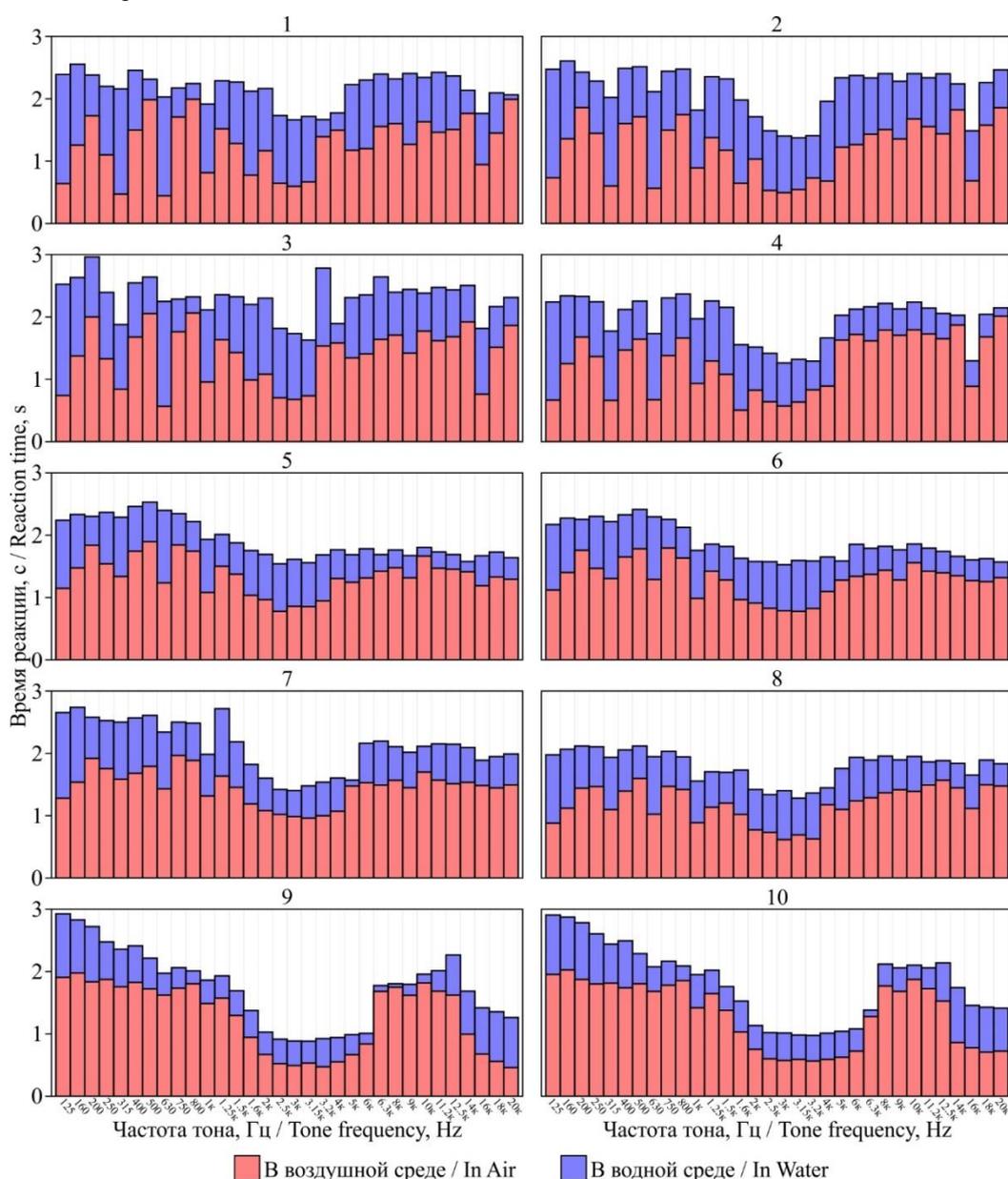


Рис. 2. Индивидуальные аудиограммы серых тюленей  
Fig. 2. Individual audiograms of grey seals

Индивидуальные аудиограммы исследованных серых тюленей показали, что животные подразделяются на пять групп.

В первую группу входили 15-летние самки, при этом для выборок на частоте 4 кГц они подразделялись на две подгруппы: 1) тюлени 1 и 3; 2) тюлени 2 и 4.

Во вторую группу входили 5-летние самки; их внутригрупповые отличия на всем диапазоне частот были минимальны; от группы 15-летних самок они отличались большим временем реакции и более плавным изменением времени реакции при использовании соседних частот.

Третью "группу" представлял 5-летний самец, который отличался от тюленей второй группы более коротким временем реакции, от тюленей первой группы – более плавным изменением времени реакции при использовании соседних частот (характерным для тюленей его возраста).

Молодые 6-месячные тюлени образовывали четвертую группу, наибольшим отличием от остальных групп являлась большая величина стандартного отклонения на всех частотах [кроме частот 2–4 кГц и 14 кГц и выше, где величина стандартного отклонения была соизмерима с другими группами (диапазон 2–4 кГц) или была меньше (диапазон от 14 кГц и выше), в этих же диапазонах время реакции было значительно ниже, чем у тюленей других групп].

Экспериментально установлено, что начиная с частоты 12,5 кГц у 15-летних самок время реакции возрастает, 5-летних – незначительно снижается, 6-месячных – резко уменьшается. Данные тренды различаются по причине снижения с возрастом верхнего предела воспринимаемых частот, что описано в ряде исследований (*Schusterman et al., 2002; Cunningham et al., 2016; D'Agnesse et al., 2021*).

Время реакции всех исследованных тюленей в воздухе меньше, чем время реакции под водой, но при этом разница значений в большинстве случаев константна и составляет около 1 с (у 15-летних тюленей), 0,5–0,7 с (у 5-летних, независимо от пола) и 0,2–0,5 с (у 6-месячных тюленей). Меньшую разницу между временем реакции в воздухе и под водой у молодых тюленей можно объяснить их меньшим весом и линейными размерами, что позволяет быстрее передвигаться под водой. Анализ видеопrotocolов показал, что время между началом подачи звукового сигнала и моментом, когда тюлень начинает движение, в среднем одинаково для идентичных частот в воздушной и водной среде.

Следует отметить, что на определенных частотах время реакции в воздухе и под водой значительно различалось.

Так, 15-летние тюлени очень быстро (относительно соседних частот) реагировали на звуки с частотами 125, 315 и 630 Гц в воздухе и менее быстро – под водой (кроме тюленей 3 и 4, у которых время реакции на данных частотах под водой значительно отличалось от соседних частот). У 5-летних и 6-месячных тюленей такой тенденции выявлено не было. Данную особенность можно объяснить разницей в размерах: у 15-летних тюленей ушной обхват черепа на момент начала эксперимента составлял в среднем  $560 \pm 15$  мм, у 5-летних самок –  $520 \pm 11$  мм, у 5-летнего самца – 540 мм, у 6-месячных – 450 и 470 мм. Эти различия, вероятно, приводили к разным размерам слухового канала, поэтому у взрослых тюленей данные частоты резонировали и, соответственно, усиливались.

В ходе экспериментов выявлена более быстрая (относительно соседних частот) реакция 15-летних тюленей и 5-летнего самца на звук с частотой тона 16 кГц как в воздухе, так и под водой. Этот факт можно объяснить реакцией на хлопки лапами, характерные для половозрелых самцов серого тюленя в период размножения, частотный пик которых приходится именно на 16 кГц (*Hocking et al., 2020*). Данные звуки имеют биологическое значение для половозрелых 15-летних самок, связанное с поиском партнера для спаривания, а для 5-летнего самца, находящегося в начале полового созревания (*Boness et al., 1979; Beest et al., 2019*), – с возможностью избежать встречи с крупными половозрелыми самцами, чем и обусловлено быстрое время реакции на звук чистого тона с частотой 16 кГц.

При использовании средних частот 1–4 кГц у всех тюленей в воздушной и водной среде отмечается самое быстрое время реакции. В этом диапазоне находятся гортанные рыки, издаваемые серыми тюленями как на суше, так и в воде, и щелчки, фиксируемые только под водой. Ряд авторов (*Asselin et al., 1993; Miksis-Olds et al., 2016; Nowak, 2021*) предполагают, что именно эти звуки являются основными коммуникативными сигналами, имеющими амплитудно-темпоральную модуляцию на индивидуальной для каждой особи частоте (форманте), обычно находящейся в пределах 2–3,5 кГц для серых тюленей (*Stansbury et al., 2019*).

Изменения на данных частотах у 5-летних тюленей выражены нечетко, в то время как у 6-месячных и 15-летних на данном диапазоне частот время реакции значительно отличается от более низких и более высоких частот. У 6-месячных тюленей наиболее быстрая реакция фиксируется при применении частот 2–6 кГц, 15-летние тюлени 1 и 3 демонстрируют наиболее быструю реакцию на частотах 3–3,2 кГц, тюлени 2 и 4 имеют более широкий диапазон – 1,6–4 кГц. При этом оба молодых тюленя были рождены и выкармливались 15-летней самкой 4, а самка 2 рожала щенка, но не выкармливала его (*Zaytsev et al., 2021*). Также у рожавших самок время реакции на частоты 3; 3,1 и 3,2 кГц меньше, чем у яловых самок 1 и 3. Данный факт можно объяснить физиологическими изменениями тюленей 2 и 4, связанными с рождением и выкармливанием

щенков. Согласно ряду исследований, посвященных вокализации серых тюленей в период лактации (Caudron *et al.*, 1998; Stansbury *et al.*, 2021), коммуникация самки со щенком происходит на частотах 3–4 кГц.

### Заключение

В результате исследования получены индивидуальные аудиограммы серых тюленей в воздушной и водной среде. Аудиограммы, основанные на времени реакции, имеют зависимость от возрастов испытуемых тюленей: для молодых тюленей характерен более ровный график, время реакции на соседние частоты возрастает и убывает более плавно, чем у взрослых тюленей, на аудиограммах которых наблюдаются скачкообразные переходы. Под водой относительная разница во времени реакции на соседние частоты ниже, чем в воздушной среде на аналогичные частоты. При использовании частот среднего спектра, которые серые тюлени используют для коммуникации, время реакции значительно меньше, чем остальных частот. В ходе экспериментов выявлены частоты (125, 315 и 630 Гц), время реакции на которые при восприятии в воздушной среде значительно меньше, чем на соседние частоты, что особенно четко проявляется у 15-летних тюленей, слабо выражено у 5-летних тюленей и не наблюдается у 6-месячных тюленей. При восприятии данных частот в воде резкие отличия во времени реакции наблюдаются только у рожавших 15-летних самок. В верхней части спектра предъявляемых частот внимание привлекает 16 кГц, быстрая реакция на которую четко выражена у всех 15-летних тюленей как в воздушной среде, так и в водной; снижение скорости реакции выражено у 5-летнего самца; быстрая реакция не наблюдается ни у 5-летних самок, ни у молодых тюленей.

Полученные данные и опыт могут служить основой для проведения дальнейших исследований с использованием электрографических методов фиксации времени реакции, исключая влияние различий во времени, затрачиваемом тюленями на совершение движения нажатия на клавишу: электромиографии или метода вызванных потенциалов спинного мозга (Ruser *et al.*, 2014).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Литвинов Ю. В., Пахомов М. В. Исследование способности серых тюленей дифференцировать сложносоставные звуковые сигналы // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 2. С. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257>. EDN: LXVVVZ.
- Литвинов Ю. В., Пахомов М. В., Зайцев А. А., Трошичев А. Р. Исследование возможности применения времени реакции на звуковой раздражитель в качестве показателя сенсомоторной реакции у серых тюленей // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2022. № 4. С. 59–67. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-4-59-67](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-4-59-67). EDN: LRRTBI.
- Пахомов М. В., Зайцев А. А. Исследование длинноволновой границы спектральной чувствительности у серого тюленя *Halichoerus grypus* (Fabricius, 1791) // Морской биологический журнал. 2022. Т. 7, № 4. С. 46–54. DOI: [10.21072/mbj.2022.07.4.04](https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.04). EDN: EBVGDG.
- Asselin S., Hammil M. O., Barrette C. Underwater vocalizations of ice breeding grey seals // Canadian Journal of Zoology. 1993. Vol. 71, Iss. 11. P. 2211–2219. DOI: <https://doi.org/10.1139/z93-310>.
- Bernard C., Monnoyer J., Wiertelowski M., Ystad S. Rhythm perception is shared between audio and haptics // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article number: 4188. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08152-w>.
- Boness D. J., James H. Reproductive behaviour of the Grey seal (*Halichoerus grypus*) on Sable Island, Nova Scotia // Journal of Zoology. 1979. Vol. 188, Iss. 4. P. 477–500. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1979.tb03430.x>.
- Bonner W. N. Seals and man: A study of interactions // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1983. Vol. 63, Iss. 1. P. 245. DOI: [10.1017/S002531540004995X](https://doi.org/10.1017/S002531540004995X).
- Bouveroux T., Kiszka J. J., Heithaus M. R., Jauniaux T. [et al.]. Direct evidence for grey seal (*Halichoerus grypus*) predation and scavenging on harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) // Marine Mammals Science. 2014. Vol. 30, Iss. 4. P. 1542–1548. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12111>.
- Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of Grey seal (*Halichoerus Grypus*) pup calls // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1998. Vol. 78, Iss. 2. P. 651–658. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315400041680>.
- Cunningham K., Reichmuth C. High-frequency hearing in seals and sea lions // Hearing Research. 2016. Vol. 331. P. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.10.002>.
- D'Agnese E. R., Lambourn D. M., Olson J. K., Huggins J. L. [et al.]. Congenital diseases in harbor seals (*Phoca vitulina richardsii*) from the Salish Sea // Journal of Wildlife Diseases. 2021. Vol. 57, Iss. 3. P. 672–677. DOI: <https://doi.org/10.7589/jwd-d-20-00179>.

- Harris C. M., Thomas L., Falcone E. A., Hildebrand J. [et al.]. Marine mammals and sonar: Dose-response studies, the risk-disturbance hypothesis and the role of exposure context // *Journal of Applied Ecology*. 2018. Vol. 55, Iss. 3. P. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12955>.
- Hocking D. P., Burville B., Parker W. M. G., Evans A. R. [et al.]. Percussive underwater signaling in wild grey seals // *Marine Mammals Science*. 2020. Vol. 36, Iss. 2. P. 728–732. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12666>.
- Johnson S. R., Burns J. J., Malme C. I., Davis R. A. 1989. Synthesis of information on the effects of noise and disturbance on major haulout concentrations of Bering Sea pinnipeds. US Department of the Interior, Minerals Management Service. 266 p. Report No.: OCS Study MMS 88-0092. URL: <https://epis.boem.gov/Final%20Reports/4994.pdf>.
- Levänen S., Hamdorf D. Feeling vibrations: Enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans // *Neuroscience Letters*. 2001. Vol. 301, Iss. 1. P. 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01597-X).
- Martin M., Gridley T., Elwen S. H., Charrier I. Assessment of the impact of anthropogenic airborne noise on the behaviour of Cape fur seals during the breeding season in Namibia // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2022. Vol. 550. Article number: 151721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151721>.
- Miksis-Olds J. L., Van Opzeeland I. C., Van Parijs S. M., Jones J. Pinniped sounds in the Polar Oceans. In: Au, W., Lammers, M. (eds.) *Listening in the Ocean. Modern Acoustics and Signal Processing*. Springer, New York, NY. 2016. P. 257–308. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7_11).
- Nowak L. J. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals // *Bioacoustics*. 2021. Vol. 30, Iss. 6. P. 696–715. DOI: <https://doi.org/10.1080/09524622.2020.1851298>.
- Ruser A., Dähne M., Sundermeyer J., Lucke K. [et al.]. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas // *PLoS One*. 2014. Vol. 9, Iss. 3. Article number: e90824. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090824>.
- Schusterman R. J., Southall B., Kastak D., Kastak C. R. Age-related hearing loss in sea lions and their scientists // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111, Iss. 5. P. 2342–2343. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4777841>.
- Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *Journal of Experimental Biology*. 2015. Vol. 218, Iss. 14. P. 2250–2259. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.120972>.
- Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *Journal of Experimental Biology*, 2014. Vol. 217, Iss. 5. P. 726–760. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.097469>.
- Stansbury A. L., Janik V. M. Formant modification through vocal production learning in Grey seals // *Current Biology*. 2019. Vol. 29, Iss. 13. P. 2244–2249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.071>.
- Stansbury A. L., Janik V. M. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2021. Vol. 376, Iss. 1836. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0251>.
- Van Beest F. M., Mews S., Elkenkamp S., Schuhmann P. Classifying grey seal behaviour in relation to environmental variability and commercial fishing activity – a multivariate hidden Markov model // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number: 5642. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42109-w>.
- Wiggins S. M., Krumpel A., Dorman L. M., Hildebrand J. A. [et al.]. Seal bomb explosion sound source characterization // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2021. Vol. 150. P. 1821–1829. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0006101>.
- Wilson J. C., Elliott M., Cutts N. D., Mander L. [et al.]. Coastal and offshore wind energy generation: Is it environmentally benign? // *Energies*. 2010. Vol. 3, Iss. 7. P. 1383–1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/en3071383>.
- Yau J. M., Weber A. I., Bensmaia S. J. Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions // *Frontiers in Psychology*. 2010. Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00160>.
- Zaytsev A. A., Litvinov Y. V., Pahomov M. V., Troshichev A. R. [et al.]. Birth of a *Halichoerus grypus* Atlantica (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS // *Aquatic Mammals*. 2021. Vol. 47, Iss. 1. P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.1578/am.47.1.2021.36>.

## References

- Litvinov, Yu. V., Pakhomov, M. V. 2019. Investigation of the ability of grey seals to differentiate composite audio signals. *Vestnik of MSTU*, 22(2), pp. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257>. EDN: LXVVVZ. (In Russ.)
- Litvinov, Yu. V., Pakhomov, M. V., Zaytsev, A. A., Troshichev A. R. 2022. Investigation of the possibility of using the reaction time to a sound stimulus as an indicator of sensorimotor reaction in grey seals. *Izvestiya Tula State University*, 4, pp. 59–67. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-4-59-67](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-4-59-67). EDN: LRRTBI. (In Russ.)

- Pakhomov, M. V., Zaytsev, A. A. 2022. Investigation of the long-wavelength threshold of spectral sensitivity in the grey seal *Halichoerus grypus* (Fabricius, 1791). *Marine Biological Journal*, 7(4), pp. 46–54. DOI: 10.21072/mbj.2022.07.4.04. EDN: EBVGDG. (In Russ.)
- Asselin, S., Hammil, M. O., Barrette, C. 1993. Underwater vocalizations of ice breeding grey seals. *Canadian Journal of Zoology*, 71(11), pp. 2211–2219. DOI: <https://doi.org/10.1139/z93-310>.
- Bernard, C., Monnoyer, J., Wiertelowski, M., Ystad, S. 2022. Rhythm perception is shared between audio and haptics. *Scientific Reports*, 12. Article number: 4188. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08152-w>.
- Boness, D. J., James, H. 1979. Reproductive behaviour of the Grey seal (*Halichoerus grypus*) on Sable Island, Nova Scotia. *Journal of Zoology*, 188(4), pp. 477–500. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1979.tb03430.x>.
- Bonner, W. N. 1983. Seals and man: A study of interactions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 63(1), pp. 245. DOI: 10.1017/S002531540004995X.
- Bouveroux, T., Kiszka, J. J., Heithaus, M. R., Jauniaux, T. et al. 2014. Direct evidence for grey seal (*Halichoerus grypus*) predation and scavenging on harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Marine Mammals Science*, 30(4), pp. 1542–1548. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12111>.
- Caudron, A. K., Kondakov, A. A., Siryanov, S. V. 1998. Acoustic structure and individual variation of Grey seal (*Halichoerus Grypus*) pup calls. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 78(2), pp. 651–658. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315400041680>.
- Cunningham, K., Reichmuth, C. 2016. High-frequency hearing in seals and sea lions. *Hearing Research*, 331, pp. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.10.002>.
- D'Agnese, E. R., Lambourn, D. M., Olson, J. K., Huggins, J. L. et al. 2021. Congenital diseases in harbor seals (*Phoca vitulina richardsii*) from the Salish Sea. *Journal of Wildlife Diseases*, 57(3), pp. 672–677. DOI: <https://doi.org/10.7589/jwd-d-20-00179>.
- Harris, C. M., Thomas, L., Falcone, E. A., Hildebrand, J. et al. 2018. Marine mammals and sonar: Dose-response studies, the risk-disturbance hypothesis and the role of exposure context. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), pp. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12955>.
- Hocking, D. P., Burville, B., Parker, W. M. G., Evans, A. R. et al. 2020. Percussive underwater signaling in wild grey seals. *Marine Mammals Science*, 36(2), pp. 728–732. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12666>.
- Johnson, S. R., Burns, J. J., Malme, C. I., Davis, R. A. 1989. Synthesis of information on the effects of noise and disturbance on major haulout concentrations of Bering Sea pinnipeds. US Department of the Interior, Minerals Management Service. Report No.: OCS Study MMS 88-0092. URL: <https://epis.boem.gov/Final%20Reports/4994.pdf>.
- Levänen, S., Hamdorf, D. 2001. Feeling vibrations: Enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience Letters*, 301(1), pp. 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01597-X).
- Martin, M., Gridley, T., Elwen, S. H., Charrier, I. 2022. Assessment of the impact of anthropogenic airborne noise on the behaviour of Cape fur seals during the breeding season in Namibia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 550. Article number: 151721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151721>.
- Miksis-Olds, J. L., Van Opzeeland, I. C., Van Parijs, S. M., Jones, J. 2016. Pinniped sounds in the Polar Oceans. In Au, W., Lammers, M. (eds.) *Listening in the Ocean. Modern Acoustics and Signal Processing*. Springer, New York, NY. P. 257–308. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7_11).
- Nowak, L. J. 2021. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals. *Bioacoustics*, 30(6), pp. 696–715. DOI: <https://doi.org/10.1080/09524622.2020.1851298>.
- Ruser, A., Dähne, M., Sundermeyer, J., Lucke, K. et al. 2014. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas. *PLoS One*, 9(3). Article number: e90824. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090824>.
- Schusterman, R. J., Southall, B., Kastak, D., Kastak, C. R. 2002. Age-related hearing loss in sea lions and their scientists. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(5), pp. 2342–2343. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4777841>.
- Sills, J. M., Southall, B. L., Reichmuth, C. 2015. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. *Journal of Experimental Biology*, 218(14), pp. 2250–2259. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.120972>.
- Sills, J. M., Southall, B. L., Reichmuth, C. 2014. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. *Journal of Experimental Biology*, 217(5), pp. 726–760. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.097469>.
- Stansbury, A. L., Janik, V. M. 2019. Formant modification through vocal production learning in Grey seals. *Current Biology*, 29(13), pp. 2244–2249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.071>.
- Stansbury, A. L., Janik, V. M. 2021. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1836). DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0251>.

- Van Beest, F. M., Mews, S., Elkenkamp, S., Schuhmann, P. 2019. Classifying grey seal behaviour in relation to environmental variability and commercial fishing activity – a multivariate hidden Markov model. *Scientific Reports*, 9. Article number: 5642. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42109-w>.
- Wiggins, S. M., Krumpel, A., Dorman, L. M., Hildebrand, J. A. et al. 2021. Seal bomb explosion sound source characterization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150, pp. 1821–1829. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0006101>.
- Wilson, J. C., Elliott, M., Cutts, N. D., Mander, L. et al. 2010. Coastal and offshore wind energy generation: Is it environmentally benign? *Energies*, 3(7), pp. 1383–1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/en3071383>.
- Yau, J. M., Weber, A. I., Bensmaia, S. J. 2010. Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions. *Frontiers in Psychology*, 1. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00160>.
- Zaytsev, A. A., Litvinov, Y. V., Pahomov, M. V., Troshichev, A. R. et al. 2021. Birth of a *Halichoerus grypus* Atlantica (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquaculture complex of MMBI RAS. *Aquatic Mammals*, 47(1), pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.1578/am.47.1.2021.36>.

#### Сведения об авторах

**Пахомов Мирон Владимирович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, науч. сотрудник;  
e-mail: [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

**Miron V. Pakhomov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Researcher;  
e-mail: [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

**Зайцев Александр Алексеевич** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, науч. сотрудник;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

**Alexandr A. Zaytsev** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Researcher;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

**Литвинов Юрий Владимирович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

**Yuri V. Litvinov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Junior Researcher; e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

**Трошичев Александр Родионович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [troshich@mail.ru](mailto:troshich@mail.ru)

**Alexandr R. Troshichev** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Junior Researcher; e-mail: [troshich@mail.ru](mailto:troshich@mail.ru)

УДК 594.7:591.9

## Новый вид пресноводных мшанок *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata) из Западной Сибири (Россия)

В. И. Гонтарь\*, Т. А. Шарапова

\*Зоологический институт Российской Академии наук, Санкт-Петербург, Россия;  
e-mail: [gontarvi@gmail.com](mailto:gontarvi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-774X>

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
09.01.2023;

получена  
после доработки  
10.05.2023;

принята к публикации  
16.05.2023

### Ключевые слова:

пресноводные  
мшанки,  
Phylactolaemata,  
*Plumatella sibirica*,  
таксономия,  
Западная Сибирь

### Для цитирования

### Реферат

Западная Сибирь является наименее изученным районом в отношении распространения, экологии и систематического состава пресноводных мшанок. Сбор материала по пресноводным мшанкам Западно-Сибирской равнины проводился в рамках исследования зооперифитона водоемов Тюменской области (включая Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа) в период 1987–2016 гг. В результате анализа собранного материала представлено описание нового вида филактолемных мшанок (Bryozoa) *Plumatella sibirica*. Новый вид имеет аутозоиды в виде трубочек с округлым поперечным сечением. Флотобласты овальные, со слегка суженными полюсами. Размеры и морфология поверхности флотобластов и сессобластов отличают вид от близких видов *Plumatella repens* (Linné) и *P. buschnelli* (Wood). Максимальные биомассы зооперифитона озер лесотундры отмечены в сообществах с доминированием крупных колоний *Plumatella sibirica*, где эта мшанка была абсолютным доминантом. В ходе дальнейших исследований новый вид мшанок *Plumatella sibirica* может быть встречен и в других районах Сибири.

Гонтарь В. И. и др. Новый вид пресноводных мшанок *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata) из Западной Сибири (Россия). Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 131–136. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-131-136](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-131-136)

## New species of freshwater bryozoans *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata), Western Siberia (Russia)

Valentina I. Gontar\*, Tatyana A. Sharapova

\*Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia;  
e-mail: [gontarvi@gmail.com](mailto:gontarvi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-774X>

### Article info

Received  
09.01.2023;

received  
in revised  
10.05.2023;

accepted  
16.05.2023

### Key words:

freshwater Bryozoa,  
Phylactolaemata,  
*Plumatella sibirica*,  
taxonomy,  
Western Siberia

### For citation

### Abstract

Western Siberia is the least studied region with respect to the distribution, ecology, and systematic composition of freshwater bryozoans. The collection of material on freshwater bryozoans of the West Siberian Plain was carried out as part of study of the zooperiphyton of the water bodies of the Tyumen region (including the Khanty-Mansiysk and Yamalo-Nenets Autonomous Districts) in 1987–2016. As a result of the collected material analysis, description of a new species of phylactolemic bryozoans (Bryozoa) *Plumatella sibirica* has been presented. The new species has autozooids in the form of tubules with a rounded cross section. Phlotoblasts are oval, with slightly narrowed poles. Size and surface morphology of floto blasts and sessoblasts distinguish the species from related species *Plumatella repens* (Linné) and *P. buschnelli* (Wood). The maximum biomass of zooperiphyton in forest-tundra lakes has been noted in communities dominated by large colonies of *Plumatella sibirica*, where this bryozoan is the absolute dominant. In the course of further studies, a new species of bryozoans *Plumatella sibirica* may also be found in other regions of Siberia.

Gontar, V. I. et al. 2023. New species of freshwater bryozoans *Plumatella sibirica* (Phylactolaemata), Western Siberia (Russia). *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 131–136. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-131-136](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-131-136)

## Введение

Западная Сибирь является наименее изученным районом в отношении распространения, экологии и систематического состава пресноводных мшанок. Незначительное количество информации об этой группе объясняется тем, что регулярные исследования зооперифитона в данном районе осуществлялись лишь с конца 1980-х гг.

Западно-сибирская лесотундра отличается высокой степенью заболоченности; для нее характерны холодная продолжительная зима и короткое лето (60–65 сут) с поздними весенними заморозками (Шаропова и др., 2019).

В настоящее время в континентальных водоемах Западной Сибири обнаружено 10 видов мшанок. К широко распространенным на этой территории относятся филактолемные виды *Hyalinella punctata* (Hancock) и *Plumatella emarginata* (Allman), а также гимнолемная мшанка *Paludicella articulata* (Ehrenberg) (Stenostomata).

В настоящей статье представлены описание нового вида из Phylactolaemata *Plumatella sibirica* n. sp. и сравнительный анализ данного вида с некоторыми ранее встреченными видами (Гонтарь, 2010) с целью установления его валидности.

## Материалы и методы

Сбор материала по пресноводным мшанкам Западно-Сибирской равнины проводился в рамках исследования зооперифитона водоемов Тюменской области [включая Ханты-Мансийский автономный округ (ХМАО) и Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО)] в период 1987–2016 гг. Географическое расположение исследованных 151 водоема – от зоны лесостепи до южной тундры (от 55°38' до 67°23' с. ш.). Пробы зооперифитона были собраны на естественных и искусственных субстратах: затопленной древесине, макрофитах, камнях, бетонных плитах, керамических блоках.

Для определения размеров статобластов (их длины и ширины) в каждой колонии измеряли по 10 экземпляров и по средним значениям рассчитывали индекс  $L/B$  (отношение длины к ширине). Морфология поверхности статобластов исследовалась с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Зоологического института РАН (ЗИН РАН) (Санкт-Петербург, Россия) с использованием стандартных методик (Балашов и др., 1984).

## Систематическое описание нового вида *Plumatella sibirica* Gontar & Sharapova

Class Phylactolaemata Allman, 1856.

Order Plumatellida Allman, 1856.

Семейство Plumatellidae Allman, 1856.

Род *Plumatella* Lamarck, 1816.

Типовой вид. *Tubipora repens* Linnaeus, 1758.

Диагноз. Колония состоит из ветвящихся хитинизированных трубочек; эктоциста (форма и толщина трубочек) варьирует в зависимости от вида, возраста колонии и условий обитания. Колония образует флотобласты и сессобласты; тип флотобластов, в котором отсутствует внутренняя капсула (лептобласт), известен только у *Plumatella casmiana*.

## Описание *Plumatella sibirica* Gontar & Sharapova

Типовой материал. Голотип (№ 1/34-2020), коллекция ЗИН РАН. Колония на затопленной древесине ивы.

Типовое местообитание. Россия, Западная Сибирь, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тазовский район, пойменное озеро № 2 (старица р. Таз), 02.08.2015 г. Сборщик: Валерий Александрович Глазунов.

Паратип (№ 2/35-2020), непоименное озеро, 02.08.2016 г. Колония на затопленной древесине полярной березы. Сборщик: Валерий Александрович Глазунов.

Этимология. Вид назван по месту нахождения.

Описание. Колонии массивные, обрастающие субстрат в виде плотной дерновины длиной в несколько десятков сантиметров (рис. 1, D).

Аутозооиды – с цистидами в виде светло-коричневых трубочек с округлыми отверстиями. Полипид белый, во втянутом состоянии находится ниже краев отверстия цистиды. Свободные статобласты (флотобласты) большие (длина 439–474 мкм, ширина 318–345 мкм,  $L/B = 1,37–1,38$ ). Колонии, найденные в пойменном озере № 2 (старица р. Таз), имели следующие средние размеры флотобластов: длина 464 мкм, ширина 336 мкм,  $L/B = 1,38$ . Колонии, обнаруженные в непоименном озере в лесотундре, имели следующие средние размеры флотобластов: длина 439 мкм, ширина 318 мкм,  $L/B = 1,38$ .

Флотобласты овальной формы, немного суженные на концах (рис. 1, С). При изучении с помощью сканирующего электронного микроскопа было показано, что поверхность дорзальной и вентральной створок флотобластов равномерно покрыта бугорками. Шов между дорзальной и вентральной створками в виде слегка волнистого шнура разделяет флотобласт на две неравные части (рис. 2, С, D). Вентральная створка более выпуклая, дорзальная более плоская. Вентральная фенестра (овальная, вогнутая в центре, покрытая округлыми бугорками) превышает в длину половину от длины фенестры (рис. 3). Дорзальная фенестра округлая. Полярные борозды – в виде серповидного полумесяца. Дорзальная фенестра покрыта бугорками

равномерно, а вентральная фенестра покрыта округлыми бугорками, уменьшающимися по размеру по направлению к центру фенестры. Аннулюс вентральной створки бугорчатый, дорзальной створки – более гладкий.

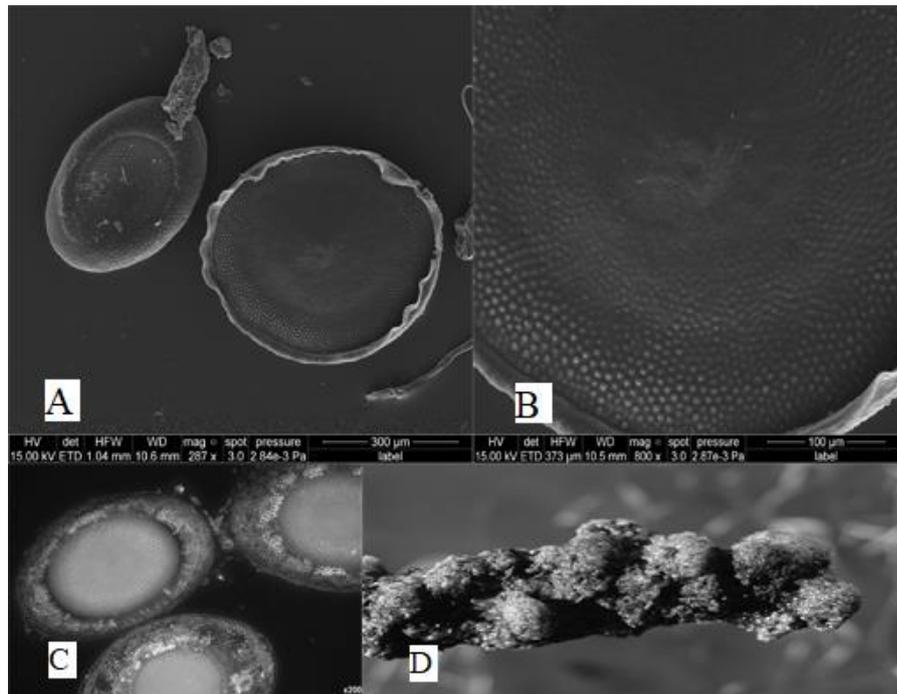


Рис. 1. *Plumatella sibirica* n. sp.: А – флотобласт (слева) и сессобласт (СЭМ); В – фронтальная поверхность сессобласта; С – внешний вид флотобластов (световая микроскопия, увеличение 4);  
D – колония на ветке, извлеченной из воды (размеры более 20 см)  
Fig. 1. *Plumatella sibirica* n. sp.: A – floatblast (left) and sessoblast (SEM); B – frontal surface of sessoblast;  
C – appearance of floatblasts (light microscopy, magnification 4); D – colony on a branch  
extracted from water (sizes greater than 20 cm)

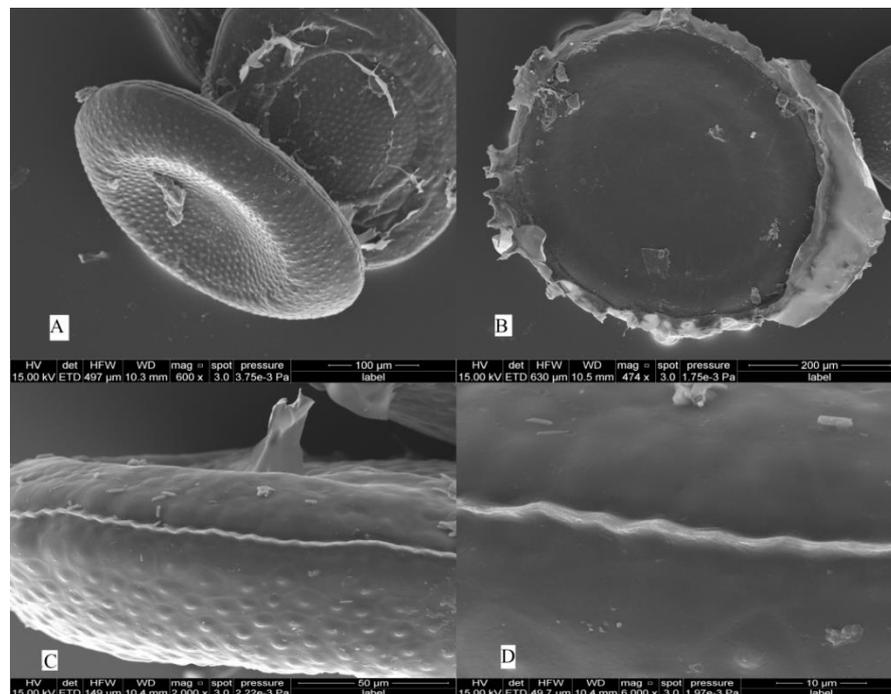


Рис. 2. *Plumatella sibirica* sp. n.: А – вентральная и дорзальная стороны флотобласта;  
B – сессобласт с аннулюсом; C, D – шов флотобласта (все изображения получены с помощью СЭМ)  
Fig. 2. *Plumatella sibirica* sp. n.: A – ventral and dorsal sides of floatblast;  
B – sessoblast with annulus;  
C, D – floatblast suture (all images obtained with SEM)

Сессобласты округлые (рис. 1, А и 2, В), лишь немного больше по размеру, чем флотобласты. Фронтальная створка бугорчатая с более выпуклыми бугорками по направлению к краю, аннулюс хорошо заметен (рис. 1, В). В одном случае был встречен овальный сессобласт.

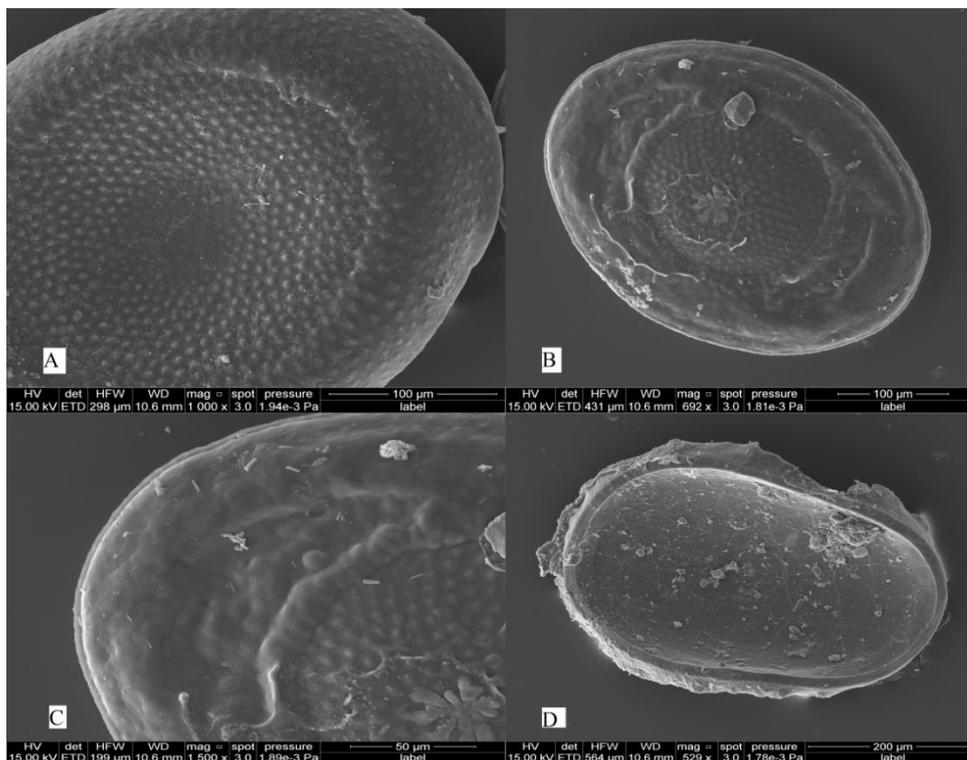


Рис. 3. *Plumatella sibirica* n. sp.: А – поверхность вентральной створки флотобласта; В – дорзальная створка флотобласта с полярными бороздами; С – увеличенный участок дорзальной створки с полярной бороздой; D – овальный сессобласт (все изображения получены с помощью СЭМ)

Fig. 3. *Plumatella sibirica* n. sp.: A – surface of ventral floteblast; B – dorsal valve of floteblast with polar furrows; C – enlarged part dorsal valve with polar furrows; D – oval sesoblast (all images were obtained using SEM)

Вид найден в небольших, неглубоких (до 3 м) озерах площадью менее 10 кв. км. Температура воды в период сбора проб достигала 20–25 °С.

Условия местообитания. Новый вид был встречен в озерах лесотундры, имеющих нейтральный рН, низкую минерализацию и характеризующихся как ультрапресные водоемы.

### Результаты и обсуждение

Флотобласты *Plumatella sibirica* напоминают таковые у *Plumatella repens* (Linné). Существующие различия между ними сводятся к следующему: флотобласты *P. repens* небольшие (длина 420–360 мкм, ширина 352–260 мкм,  $L/B = 1,3–1,23$ ) (Rogick, 1940; Toriumi, 1955; Bushnell, 1965; Geimer et al., 1986; Wood, 1989; Wood et al., 2005); флотобласты *P. sibirica* крупнее (длина 439–474 мкм, ширина 318–345 мкм,  $L/B = 1,37–1,38$ ).

Дорзальная фенестра *P. sibirica* покрыта бугорками равномерно, а вентральная фенестра покрыта округлыми бугорками, уменьшающимися по размеру по направлению к центру фенестры (рис. 2 и 3). У *P. repens* на дорзальной и особенно вентральной фенестрах бугорки по размерам отличаются; более длинные из них располагаются на периферии; на аннулюсе бугорки отсутствуют. Шов между створками у *P. repens* делит флотобласт на две одинаковые половины и представляет собой две серии чередующихся бугорков (Geimer et al., 1986), которые отсутствуют у *P. sibirica* (рис. 3).

*Plumatella bushnelli* – вид, сходный с *P. repens*. Его флотобласты имеют заостренные полюсы и достигают в длину в среднем 399 мкм (Wood, 2001). Поверхность имеет бугорки; а сетчатая структура на дорзальной и вентральной фенестрах слабо заметна. Шов выпирает из кольца и похож на шнур с множеством узелков и больших бугорков, которые придают краю флотобласта гофрированную форму (Taticchi et al., 2009). У *P. sibirica* шов между дорзальной и вентральной створками имеет вид слегка волнистого шнура и разделяет флотобласт на две неравные части.

Следует отметить, что размеры флотобластов нового вида близки к размерам флотобластов вида *Hyalinella punctata* (Hamcock) (Гонтарь, 2010).

### Заключение

Западная Сибирь – наименее изученный район Российской Федерации в отношении распространения, экологии и систематического состава пресноводных мшанок. Новый вид *Plumatella sibirica* найден только в Тазовском районе Тюменской области. Максимальные биомассы зооперифитона озер лесотундры отмечены в сообществах с доминированием крупных колоний *Plumatella sibirica*, где эта мшанка была абсолютным доминантом. Следует отметить, что в ходе дальнейших исследований этот вид может быть встречен и в других районах Сибири.

### Благодарности

Исследования осуществлены в рамках госзадания по теме № 1021051403065-4. Авторы выражают благодарность сотруднику группы электронной микроскопии ЗИН РАН Алексею Миролюбову за помощь при выполнении электронных фотографий. Авторы благодарят рецензента за ценные замечания.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Балашов Ю. С., Леонович С. А. Методы применения растровой электронной микроскопии в зоологии. Л. : Наука, 1984. 70 с.
- Гонтарь В. И. Мшанки (Bryozoa, Polyzoa, Ectoprocta) пресных водоемов России // Алтайский зоологический журнал. 2010. Вып. 4. С. 52–62. EDN: RADYOJ.
- Шарапова Т. А., Гонтарь В. И., Герасимов А. Г. Местонахождение, морфология и экология *Hyalinella punctata* (Hancock, 1950) (Bryozoa: Phylactolaemata) в континентальных водоемах Западной Сибири // Региональная экология. 2019. № 1(55). С. 77–89. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-77-89. EDN: SHBPFO.
- Bushnell J. H. On the taxonomy and distribution of freshwater Ectoprocta in Michigan. Part II // Transactions of the American Microscopical Society. 1965. Vol. 84, N 2. P. 339–358. DOI: <https://doi.org/10.2307/3224722>.
- Geimer G., Massard J. A. Les Bryozoaires du Grand-Duché de Luxembourg et des régions limitrophes. Vol. 7. Luxembourg, 1986. 188 p.
- Rogick M. D. Studies on fresh-water Bryozoa. IX. Additions to New York Bryozoa // Transactions of the American Microscopical Society. 1940. Vol. 592, Iss. 2. P. 187–204. DOI: <https://doi.org/10.2307/3222510>.
- Taticchi M. I., Elia A. C., Battoe L., Havens K. C. First report about freshwater Bryozoa in Florida (Lake Apopka) // Italian Journal of Zoology. 2009. Vol. 76, Iss. 2. P. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1080/11250000802258024>.
- Toriumi M. Taxonomical study on fresh-water Bryozoa IX. *Plumatella repens* (L.) // The Science Reports of the Tohoku University. Series 4. Biology. 1955. Vol. 21, N 1. P. 51–67.
- Wood T. S. Ectoproct bryozoans of Ohio: 008 (Bulletin of the Ohio Academy of Science, New Series). Ohio : Ohio Biological Survey, 1989. 70 p.
- Wood T. S. Three new species of plumatellid bryozoans (Ectoprocta: Phylactolaemata) defined by statoblast nodules // Journal of the North American Benthological Society. 2001. Vol. 20, Iss. 1. P. 133–143. DOI: <https://doi.org/10.2307/1468194>.
- Wood T. S., Okamura B. A new key to the freshwater Bryozoans of Britain, Ireland, and Continental Europe, with notes on their ecology. Ambleside : Freshwater Biological Association, 2005. 113 p.

### References

- Balashov, Yu. S., Leonovich, S. A. 1984. Methods of application of scanning electron microscopy in zoology. Leningrad. (In Russ.)
- Gontar, V. I. 2010. Bryozoa (Bryozoa, Polyzoa, Ectoprocta) of fresh water bodies of Russia. *Altai Zoological Journal*, 4, pp. 52–62. EDN: RADYOJ. (In Russ.)
- Sharapova, T. A., Gontar, V. I., Gerasimov, A. G. 2019. Location, morphology, and ecology of *Hyalinella punctata* (Hancock, 1950) (Bryozoa: Phylactolaemata) in continental water bodies of Western Siberia. *Regionalnaya ekologiya*, 1(55), pp. 77–89. DOI: 10.30694/1026-5600-2019-1-77-89. EDN: SHBPFO. (In Russ.)
- Bushnell, J. H. 1965. On the taxonomy and distribution of freshwater Ectoprocta in Michigan. Part II. *Transactions of the American Microscopical Society*, 84(2), pp. 339–358. DOI: <https://doi.org/10.2307/3224722>.
- Geimer, G., Massard, J. A. 1986. Les Bryozoaires du Grand-Duché de Luxembourg et des régions limitrophes. Vol. 7. Luxembourg.
- Rogick, M. D. 1940. Studies on fresh-water Bryozoa. IX. Additions to New York Bryozoa. *Transactions of the American Microscopical Society*, 592(2), pp. 187–204. DOI: <https://doi.org/10.2307/3222510>.
- Taticchi, M. I., Elia, A. C., Battoe, L., Havens, K. C. 2009. First report about freshwater Bryozoa in Florida (Lake Apopka). *Italian Journal of Zoology*, 76(2), pp. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1080/11250000802258024>.

- Toriumi, M. 1955. Taxonomical study on fresh-water Bryozoa IX. *Plumatella repens* (L.). *The Science Reports of the Tohoku University. Series 4. Biology*, 21(1), pp. 51–67.
- Wood, T. S. 1989. Ectoproct bryozoans of Ohio: 008 (Bulletin of the Ohio Academy of Science, New Series). Ohio.
- Wood, T. S. 2001. Three new species of plumatellid bryozoans (Ectoprocta: Phylactolaemata) defined by statoblast nodules. *Journal of the North American Benthological Society*, 20(1), pp. 133–143. DOI: <https://doi.org/10.2307/1468194>.
- Wood, T. S., Okamura, B. 2005. A new key to the freshwater Bryozoans of Britain, Ireland, and Continental Europe, with notes on their ecology. *Ambleside*.

#### Сведения об авторах

**Гонтарь Валентина Ивановна** – Университетская наб., 1, Санкт-Петербург, Россия, 199034; Зоологический институт РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [gontarvi@gmail.com](mailto:gontarvi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-774X>

**Valentina I. Gontar** – 1 Universitetskaya Emb., Saint Petersburg, Russia, 199034; Zoological Institute RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher; e-mail: [gontarvi@gmail.com](mailto:gontarvi@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7295-774X>

**Шарапова Татьяна Александровна** – ул. Малыгина, 86, г. Тюмень, Россия, 625026; Институт проблем освоения Севера Тюменского научного центра СО РАН, канд. биол. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [tshartum@mail.ru](mailto:tshartum@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-5452>

**Tatyana A. Sharapova** – 86 Malygina Str., Tumen, Russia, 625026; Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Centre Siberian Branch RAS, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher; e-mail: [tshartum@mail.ru](mailto:tshartum@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7547-5452>

УДК 622.78(470.21)

## Переработка руды месторождения Нюд II методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония

А. А. Горячев\*, Д. В. Макаров, С. С. Потапов,  
А. Т. Беляевский, В. В. Семушин, А. А. Компанченко

*\*Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики  
КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: a.goryachev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>*

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
26.01.2023;  
получена  
после доработки  
02.03.2023;  
принята к публикации  
16.03.2023

### Ключевые слова:

медно-никелевые руды,  
низкотемпературный  
обжиг, сульфат  
аммония,  
месторождение Нюд II,  
выщелачивание,  
цветные металлы

### Для цитирования

### Реферат

Мурманская область располагает значительным объемом сульфидного медно-никелевого сырья. Перспективными для переработки являются месторождения массива Нюд, связанные с Мончеплутоном (Нюд II и Терраса). В качестве объекта исследования выбрана забалансовая руда месторождения Нюд II с исходным содержанием никеля 0,45 % и меди 0,39 %. В процессе исследования руду смешивали с сульфатом аммония, измельчали и обжигали полученную смесь в муфельной печи в статической атмосфере воздуха. Обоженную смесь выщелачивали в подогретой дистиллированной воде при постоянном перемешивании. Максимальное извлечение металлов достигается при измельчении до класса –40 мкм, соотношении руды и сульфата аммония 1 : 7, температуре обжига 400 °С, продолжительности обжига 300 мин. В обожженной при данных параметрах смеси в ходе рентгенофазового анализа фиксируются рефлексy сульфатов меди и никеля. На стадии водного выщелачивания максимальное извлечение никеля составило 79,1 %, меди – 75,8 %.

Горячев А. А. и др. Переработка руды месторождения Нюд II методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 137–149. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-137-149

## Processing of ore from the Nud II deposit by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate

Andrey A. Goryachev\*, Dmitriy V. Makarov, Sergey S. Potapov,  
Aleksandr T. Belyaevskiy, Vasilii V. Semushin, Alena A. Kompanchenko

*\*Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic FRC KSC RAS,  
Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: a.goryachev@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>*

### Article info

Received  
26.01.2023;  
received  
in revised  
02.03.2023;  
accepted  
16.03.2023

### Key words:

copper-nickel ores,  
low-temperature roasting,  
ammonium sulfate,  
Nud II deposit,  
leaching,  
non-ferrous metals

### Abstract

The Murmansk region has a significant amount of sulfide copper-nickel raw materials. Deposits of the Nud massif associated with Monchepluton are promising for processing. The Nud II deposit cut-off grade ore with an initial Ni content of 0.45 % and Cu of 0.39 % has been chosen as the research object. During the research, the ore was mixed with ammonium sulfate, grinded, and the mixture was roasted in a muffle furnace with static air atmosphere. The roasted mixture was leached in heated distilled water with constant stirring. The maximum metals recovery was achieved when crushing to a fraction of –40 μm, the ratio of ore : ammonium sulfate is equal to 1 : 7, roasting temperature 400 °C, roasting duration 300 min. In the mixture roasted at these parameters, reflexes of copper and nickel sulfates were recorded by the x-ray phase analysis (XRD) method. At the stage of water leaching, the maximum recovery was: Ni – 79.1 %, Cu – 75.8 %.

### For citation

Goryachev, A. A. et al. 2023. Processing of ore from the Nud II deposit by the method of low-temperature roasting with ammonium sulfate. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 137–149. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-137-149

## Введение

Рост потребления цветных металлов обусловлен их востребованностью в базовых отраслях промышленности. Медь в чистом виде широко используется в электротехнике при производстве силовых кабелей; она является важным компонентом генераторов, трансформаторов, двигателей и систем возобновляемой энергетики. Этот металл применяется для изготовления систем связи, мобильных телефонов и персональных компьютеров, а также в строительной отрасли в ходе создания санитарно-технических систем (Кондратьев и др., 2019). Основная часть вырабатываемого никеля расходуется на производство жаропрочных, конструкционных, инструментальных и нержавеющей сталей, где никель применяется в качестве легирующего элемента; до 20 % никеля используется в производстве сплавов и суперсплавов совместно с железом, хромом, медью, цинком и другими металлами (Игневская, 2005). Значительную роль медь и никель играют в транспортной промышленности. Вследствие увеличения производства электротранспорта спрос на эти металлы существенно возрос. В 2022 г. отмечен значительный рост цен на медь и никель, так как их рыночные запасы находятся на многолетних минимумах. Кроме того, влияние на рост цен оказала геополитическая обстановка.

Авторы работы (Henckens et al., 2020) отмечают тенденцию роста производства меди и никеля и прогнозируют рост объема их производства более чем в 12 раз к 2100 г. В Российской Федерации активно разрабатываются сульфидные медно-никелевые месторождения, на долю которых приходится около 37 % мировых запасов никеля. Характерной особенностью сульфидных месторождений является относительно выдержанный минеральный состав руд. Главными рудными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит и магнетит. Среди второстепенных минералов характерны пирит, кубанит, миллерит, валлериит, минералы группы платины. Руды содержат никель, медь, кобальт, платиноиды, а также селен и теллур, золото, серебро и серу. Месторождения сульфидных руд являются ведущими в запасах и добыче никеля в России.

С Мурманской областью связаны значительные запасы медно-никелевого сырья природного и техногенного происхождения. В проведенных ранее исследованиях по обогащению руд большое внимание уделяется залежам массива Нюд, а именно месторождениям Нюд II и Терраса. Содержание никеля и меди в образцах руды ниже бортового, составляющего для никеля 0,55 % (Терновой и др., 2009). В этом случае эффективность традиционных способов обогащения существенно снижается. Для руд данных месторождений предложены схемы обогащения на основе кучного выщелачивания с применением растворов серной кислоты, а также бактериальных культур (Фокина и др., 2018; Masloboev et al., 2018).

Проведенные исследования указали на перспективность вовлечения забалансовых руд данных месторождений в переработку при создании альтернативных технологий обогащения. По этой причине для переработки руды выбран химический метод обогащения с использованием сульфата аммония, что обусловлено его высокой реакционной способностью и наличием в исходной руде сульфидов цветных металлов, механизм взаимодействия которых с сульфатом аммония был описан нами в предыдущих работах (Горячев и др., 2022). Технология низкотемпературного обжига сульфидного сырья с сульфатом аммония успешно применялась в мировой практике для различных видов сырья (Ju et al., 2023), например латеритных и сульфидных никелевых руд (Li et al., 2018; Cui et al., 2020), бокситовых (Xu et al., 2022), окисленных цинковых (Sun et al., 2015), марганцевых руд (Deng et al., 2018) и др. Технология апробирована ранее для руды отвала Аллареченского месторождения (Горячев и др., 2020) и черного медно-никелевого концентрата, полученного из руды месторождения Заполярное Печенгского рудного поля (Goryachev et al., 2021).

## Материалы и методы

Отбор проб руды месторождения Нюд II выполнен в летний период 2021 г. (рис. 1); руда взята с бортов карьера; среднее содержание Ni составляет 0,45 %, Cu – 0,39 %. Основными рудными минералами являются пирротин, пентландит, халькопирит, магнетит.

В ходе лабораторных исследований сульфидное сырье перемешивали с сульфатом аммония квалификации "химически чистый" (ГОСТ 3769-78) и измельчали полученную смесь в шаровой мельнице ВМУ-100 (HT Machinery Co. Ltd., КНР). После этого смесь обжигали в муфельной печи СНОЛ 3/11 (ООО "НПФ Термикс", Россия), варьируя температуру (300–500 °С) и продолжительность обжига (60–340 мин) в статической атмосфере воздуха. После обжига смесь охлаждали на открытом воздухе при температуре  $\approx 20$  °С в течение 60 мин. Затем обожженную смесь выщелачивали в подогретой до  $\approx 80$  °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании интенсивностью 230 мин<sup>-1</sup>, используя верхнеприводную мешалку MV-6 (ООО "НВ-ЛАБ", Россия).

Для диагностики минерального состава экспериментальных проб был применен метод порошковой рентгеновской дифракции (CuK $\alpha$ -излучение, длина волны 0,154184 Å) на приборе ДРОН-2.0 (АО "ИЦ Буревестник", Россия). Расшифровка дифрактограмм выполнена с использованием эталонов сравнения картотеки рентгеновских данных JCPDS или ASTM. Определение морфологии и состава частиц руды произведено с помощью сканирующего цифрового электронного микроскопа с программным обеспечением

SEM Leo-420 (Carl Zeiss Ltd., Германия) и микросондовой приставки INKA ENERGY-400 (Oxford Instruments plc., Великобритания).



Рис. 1. Отработанный карьер месторождения Нюд II  
Fig. 1. Excavated quarry of the Nud II deposit

Концентрации ионов никеля, меди и железа в продуктивных растворах определены методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Shimadzu-AA7000G, Shimadzu Corp., Япония) с электротермической атомизацией (ПНД Ф 14.1:2:4.140-98). Обработка результатов экспериментов произведена в программном продукте Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

В исходном образце руды месторождения Нюд II с помощью метода РФА<sup>1</sup> обнаружено значительное количество рефлексов нерудных минералов: полевые шпаты, амфиболы, серпентины, тальк  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , кварц  $SiO_2$ . Помимо нерудных минералов выявлены сульфиды: пентландит  $(Fe, Ni)_9S_8$ , пирротин  $Fe_{1-x}S_n$  и халькопирит  $CuFeS_2$  (рис. 2, а); зафиксированы рефлексы магнетита  $FeFe_2O_3$ . После перемешивания руды с сульфатом аммония на дифрактограмме отмечены рефлексы масканьита  $(NH_4)_2SO_4$ , являющегося природным аналогом данного соединения (рис. 2, б). После добавления сульфата аммония не зафиксированы рефлексы халькопирита и магнетита из-за снижения их относительного содержания в смеси. Остальные минералы, входящие в состав исходной руды, главным образом нерудные, диагностируются.

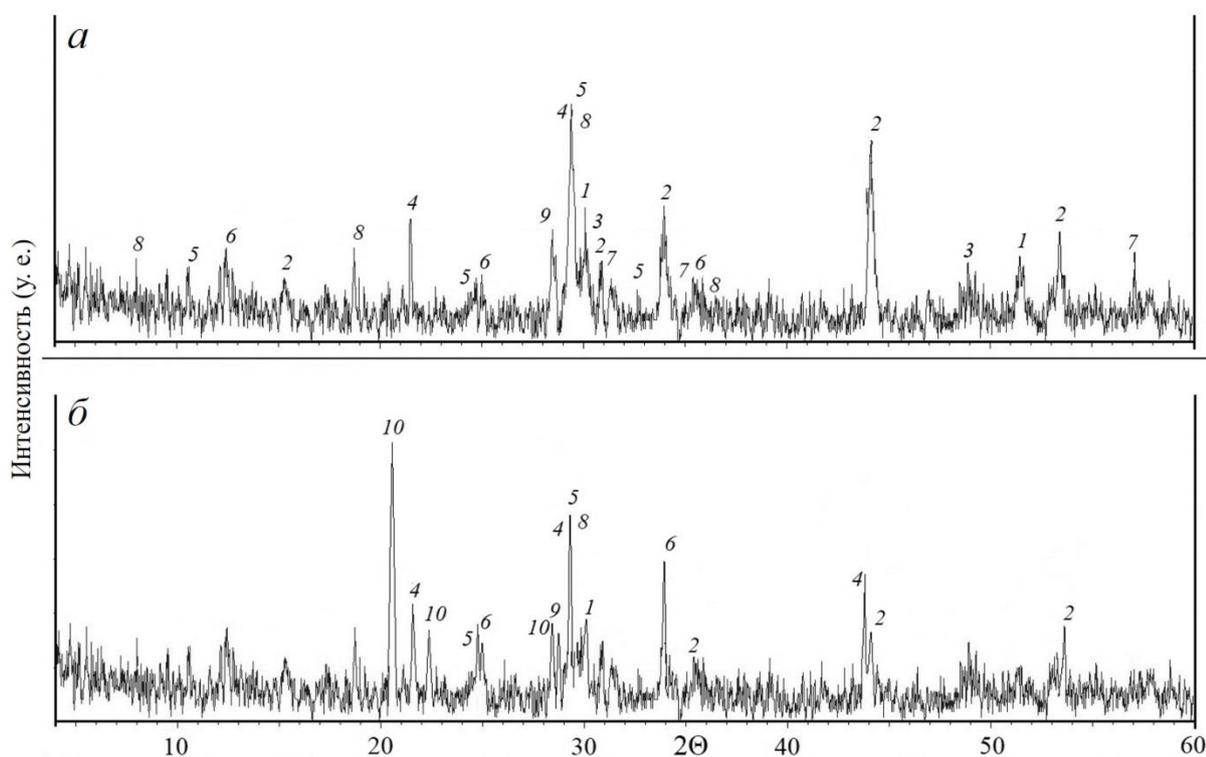


Рис. 2. Дифрактограммы руды месторождения Нюд II (а) и смеси руды с сульфатом аммония (б).

Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевой шпат; 5 – амфибол;  
6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – масканьит

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the Nud II deposit ore (a) and a mixture of ore with ammonium sulfate (b).

Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole;  
6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – mascagnite

Электронный снимок образца исходной вкрапленной руды месторождения Нюд II представлен на рис. 3, где отмечены зерна, представляющие собой сростки практически всех минералов, определенных методом рентгенофазового анализа исходного образца руды. Вкрапленники представляют собой сростки сульфидов, содержащих в небольшом количестве примеси магнетита, который развивается по трещинам. Доминирующим минералом вкрапленников является пирротин, внутри которого развивается пентландит, образуя крупные зерна неправильной или округлой формы. Самостоятельные вкрапления пентландита встречаются редко, в противоположность халькопириту, вкрапленность которого обычно мономинеральная. В сульфидных сростках халькопирит встречается редко в виде линзовидных и прожилковых зерен. Размер

<sup>1</sup> РФА – рентгенофазовый анализ.

вкрапленников варьирует от 0,15 до 1,5 мм, но могут встречаться и более мелкие эмульсионные вкрапления в виде каплевидных и мелкоточечных зерен.

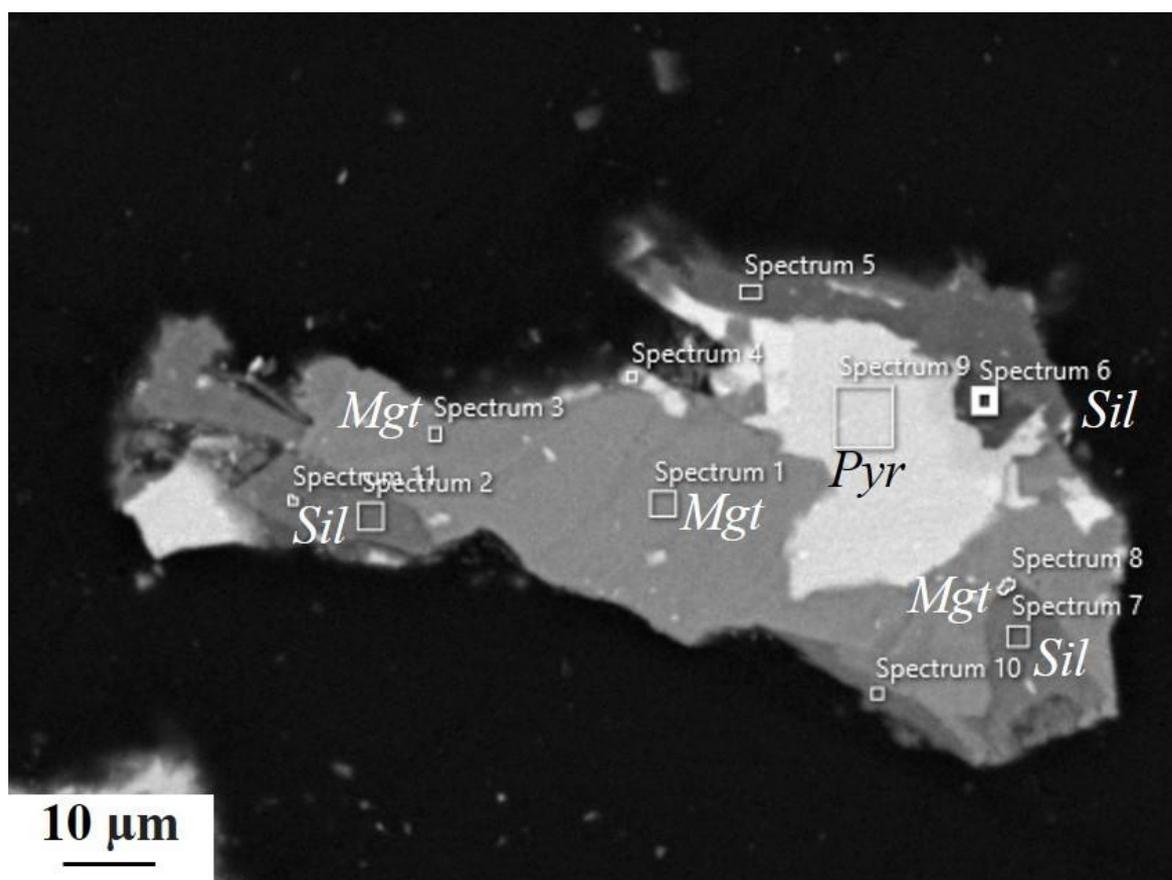
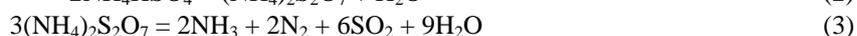


Рис. 3. СЭМ-изображение исходного образца руды месторождения Нюд II:  
*Mgt* – магнетит; *Pyr* – пирротин; *Sil* – силикаты  
 Fig. 3. SEM-image of the original ore sample from the Nud II deposit:  
*Mgt* – magnetite; *Pyr* – pyrrhotite; *Sil* – silicates

Для эффективного извлечения металлов из руды с высоким содержанием сростков требуется измельчение до тонких классов, что позволит обеспечить контакт сульфидных минералов с реагентом. Сульфиды вступают в реакцию как с расплавом сульфата аммония, так и с соединениями, образующимися при его разложении в процессе плавления [уравнения (1)–(3)]. В процессе нагрева сульфат аммония постепенно разлагается на смесь газов:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Стадии термического разложения выглядят следующим образом:



После обжига смеси руды с сульфатом аммония при соотношении 1 : 7 и температуре 300 °C на дифрактограмме фиксируются рефлексы масканьита, что указывает на его неполное разложение при данной температуре (рис. 4, а). В обожженной смеси также отмечены рефлексы всех исходных сульфидов. После обжига появляются фазы сульфата железа – сабиита  $(\text{NH}_4)\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ , зафиксированы гидроксид-железистые фазы – гетит  $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$  и аммониярозит  $(\text{NH}_4)(\text{Fe})_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ . В остатке после выщелачивания из исходных сульфидов остаются рефлексы пирротина (рис. 4, б). Остаток характеризуется преобладанием рефлексов талька.

После обжига при температуре 350 °C в смеси отмечены рефлексы сульфата никеля  $\text{NiSO}_4$  (рис. 5, а). Масканьит при данной температуре полностью расходуется. Из исходных сульфидов были зафиксированы рефлексы пирротина. Остаток после выщелачивания характеризуется значительным количеством рефлексов гетита (рис. 5, б). Пирротин также остается в остатке.

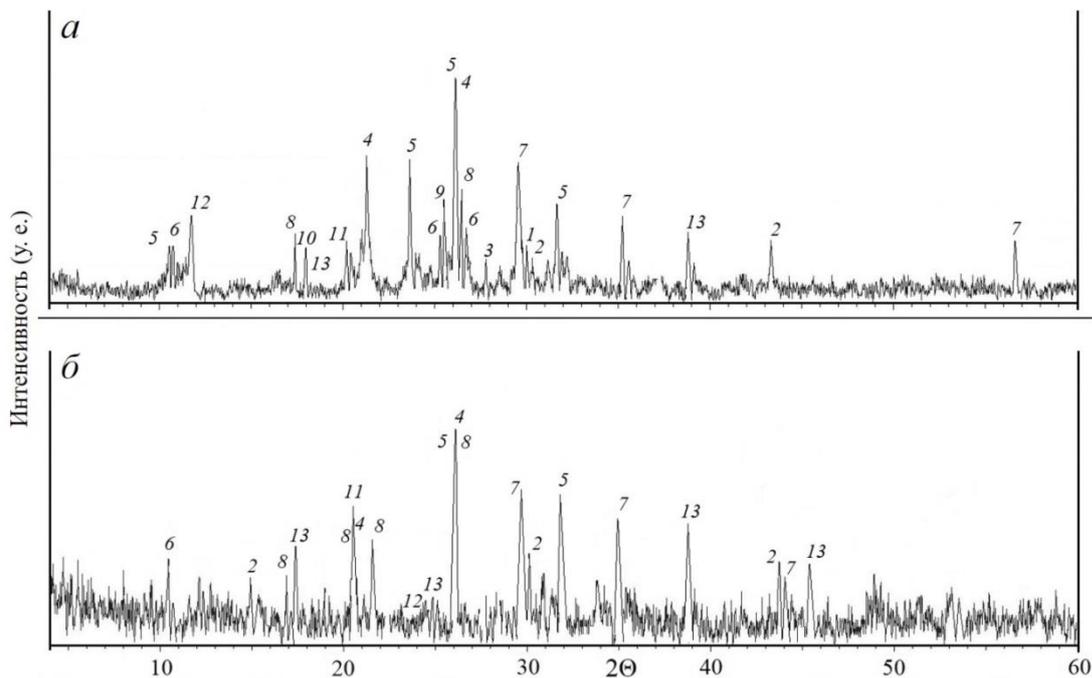


Рис. 4. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 300 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевои шпат; 5 – амфибол; 6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – масканьит; 11 – гетит; 12 – сабиит; 13 – аммонийорозит  
 Fig. 4. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 300 °С (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole; 6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – mascaignite; 11 – goethite; 12 – sabiite; 13 – ammoniojarosite

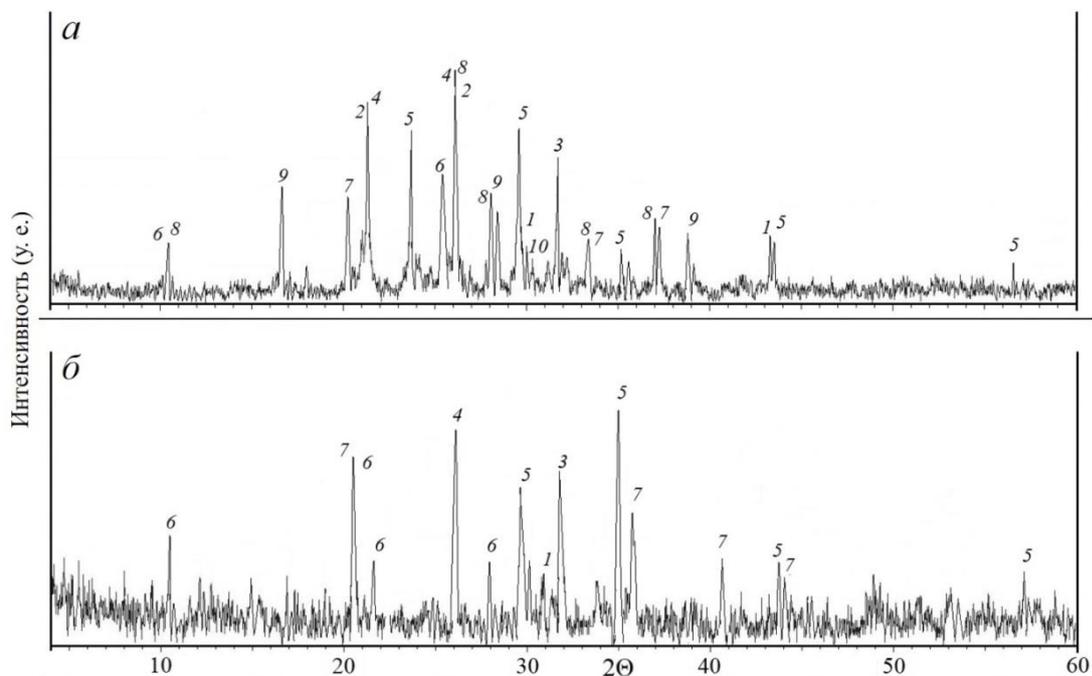


Рис. 5. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 350 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пирротин; 2 – полевои шпат; 3 – амфибол; 4 – серпентин; 5 – магнетит; 6 – тальк; 7 – гетит; 8 – сабиит; 9 – аммонийорозит; 10 – сульфат никеля  
 Fig. 5. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 350 °С (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pyrrhotite; 2 – feldspar; 3 – amphibole; 4 – serpentine; 5 – magnetite; 6 – talc; 7 – goethite; 8 – sabiite; 9 – ammoniojarosite; 10 – nickel sulfate

После обжига смеси руды с сульфатом аммония при 400 °С в обожженной смеси фиксируются рефлексы сульфатов никеля и меди CuSO<sub>4</sub> (рис. 6, а). Повышение температуры обжига до 400 °С приводит к увеличению интенсивности пиков сульфатных минералов. Остаток после выщелачивания характеризуется наличием силикатных минералов и магнетита, отмечена некоторая часть непрореагировавших сульфидов (рис. 6, б). Сульфаты, образованные в процессе обжига, полностью растворяются на стадии водного выщелачивания.

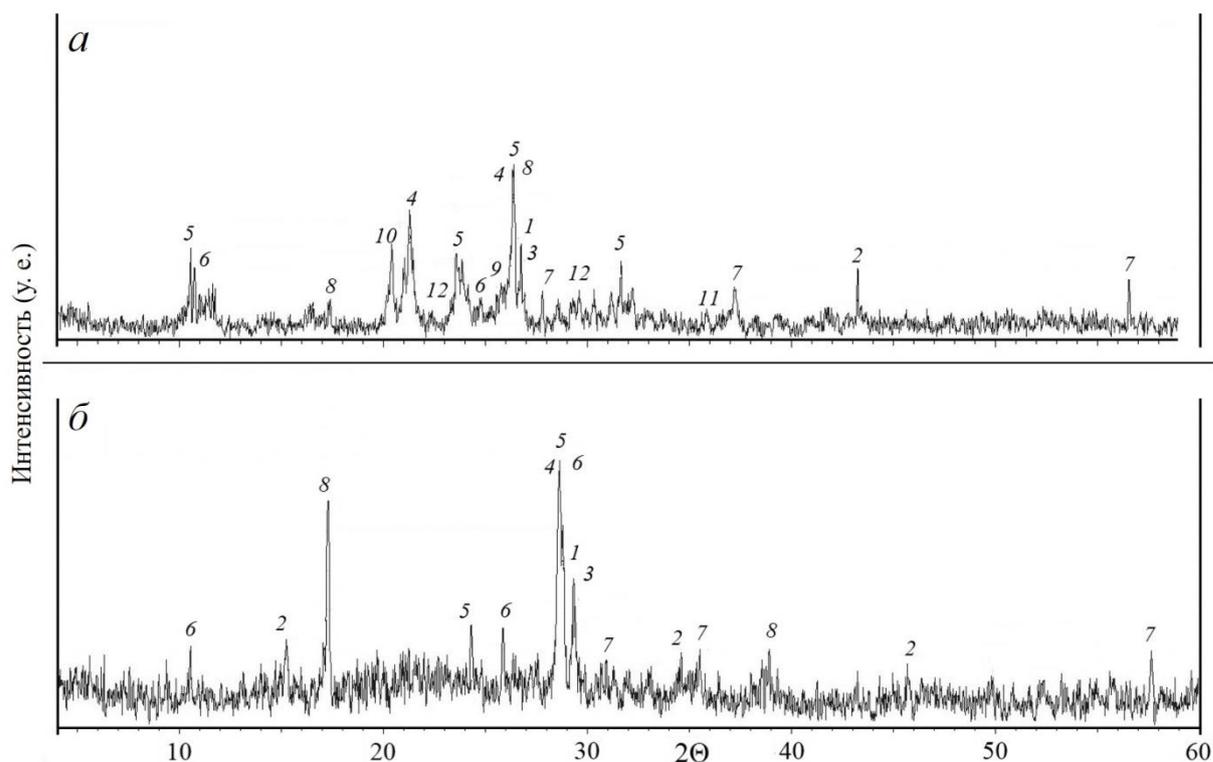
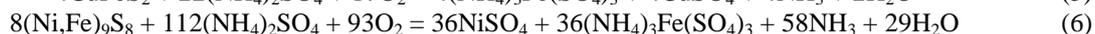


Рис. 6. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 400 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – пентландит; 2 – пирротин; 3 – халькопирит; 4 – полевоый шпат; 5 – амфибол; 6 – серпентин; 7 – магнетит; 8 – тальк; 9 – кварц; 10 – гетит; 11 – халькоцианит; 12 – сульфат никеля  
 Fig. 6. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 400 °С (а) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – pentlandite; 2 – pyrrhotite; 3 – chalcopyrite; 4 – feldspar; 5 – amphibole; 6 – serpentine; 7 – magnetite; 8 – talc; 9 – quartz; 10 – goethite; 11 – chalcocyanite; 12 – sulfate nickel

Исследования, направленные на определение механизма взаимодействия сульфидов с сульфатом аммония с применением метода синхронного термического анализа, были выполнены ранее (Горячев и др., 2022). В ходе изучения установлено, что взаимодействие сопровождается образованием аммонийсодержащих сульфатов железа, таких как пиракмонит (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и сабиит NH<sub>4</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, а также вторичных обогащенных цветными металлами сульфидов никеля и меди: краунингшилдит (Ni<sub>0.9</sub>Fe<sub>0.10</sub>)S, полимидит Ni<sub>3</sub>S<sub>4</sub>, борнит Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>, фукучилит Cu<sub>3</sub>FeS<sub>8</sub>, ковеллин CuS. Конечным продуктом взаимодействия являются сульфаты никеля и меди. Упрощенные схемы реакций можно представить следующими уравнениями:



После обжига при температуре 450 °С не отмечено рефлексов исходных сульфидных минералов. Обожженная смесь характеризуется преобладанием рефлексов серпентина, полевого шпата и амфибола; зафиксировано интенсивное формирование сульфатов цветных металлов (рис. 7, а). Образованные в процессе обжига сульфаты железа и цветных металлов полностью растворяются, и остаток характеризуется увеличением относительного содержания магнетита (рис. 7, б).

После обжига при температуре 500 °С отмечено более интенсивное формирование сульфата меди – халькоцианита (рис. 8, а); зафиксированы пики железосодержащих фаз: гетита, сабиита, аммонийрозита и магнетита. В остатке после выщелачивания в значительном количестве остаются инертные минералы (полевоый шпат, амфибол, серпентин), увеличивается доля магнетита (рис. 8, б).

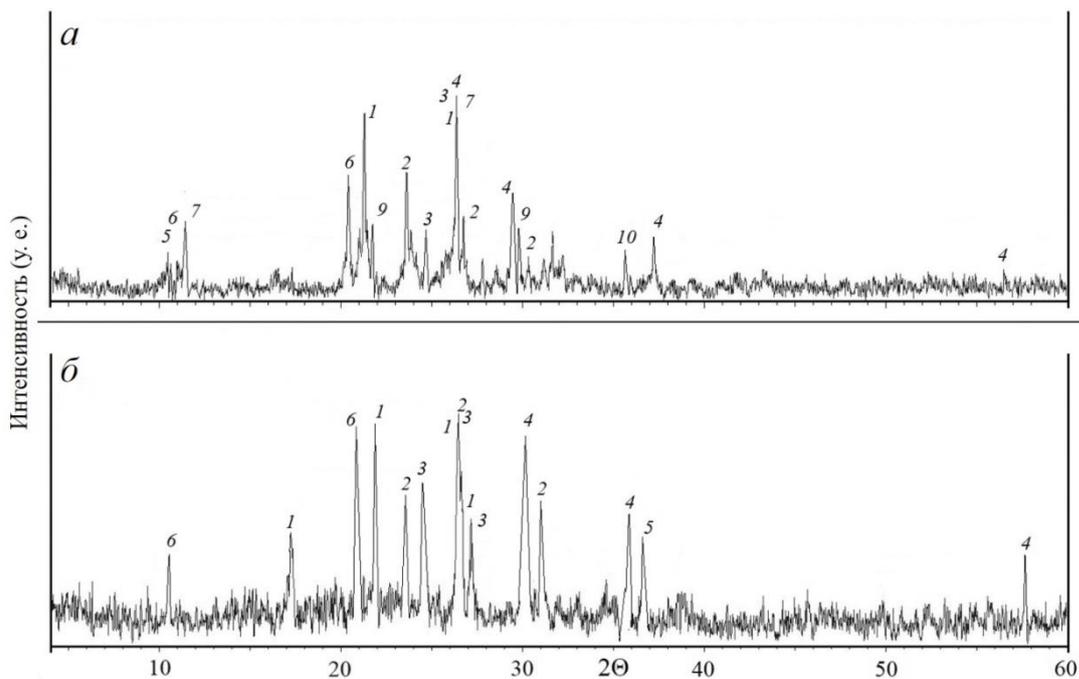


Рис. 7. Дифрактограммы смеси руды и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 450 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – полевошпат; 2 – амфибол; 3 – серпентин; 4 – магнетит; 5 – тальк; 6 – гетит; 7 – сабиит; 8 – аммонийорозит; 9 – сульфат никеля; 10 – халькоцианит  
 Fig. 7. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 450 °C (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – feldspar; 2 – amphibole; 3 – serpentine; 4 – magnetite; 5 – talc; 6 – goethite; 7 – sabiite; 8 – ammoniojarosite; 9 – nickel sulfate; 10 – chalcocyanite

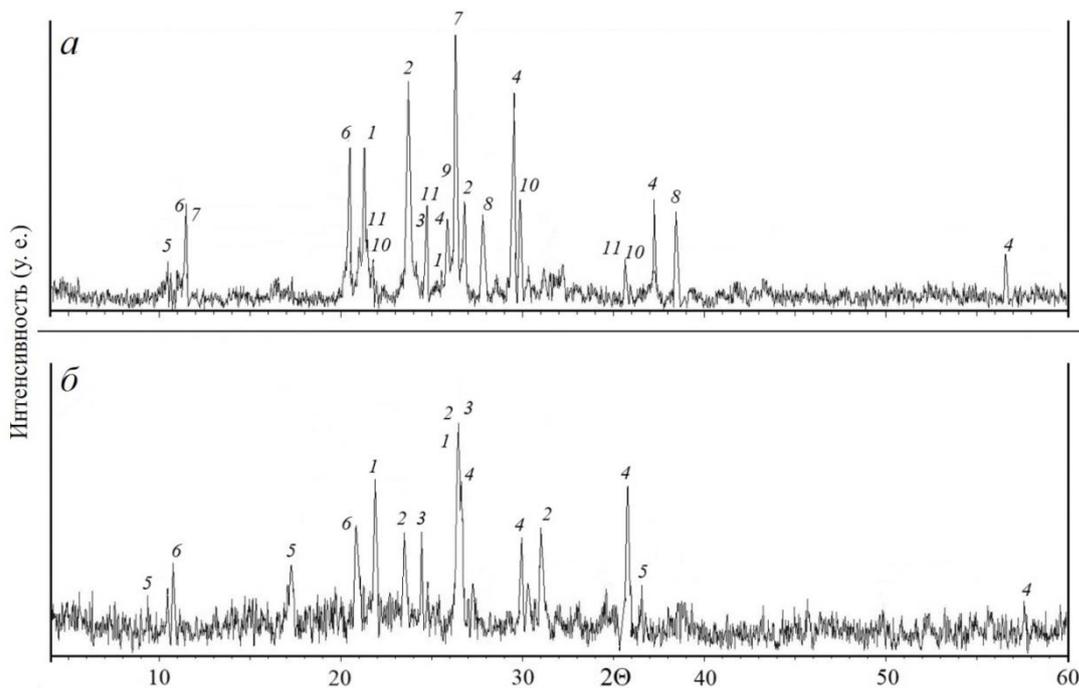


Рис. 8. Дифрактограммы смеси руды месторождения Ньюд II и сульфата аммония (1 : 7) после обжига при температуре 500 °С (а) и остатка после выщелачивания (б). Рефлексы: 1 – полевошпат; 2 – амфибол; 3 – серпентин; 4 – магнетит; 5 – тальк; 6 – гетит; 7 – сабиит; 8 – аммонийорозит; 9 – кварц; 10 – сульфат никеля; 11 – халькоцианит  
 Fig. 8. X-ray diffraction patterns of ore and ammonium sulfate mixture (1 : 7) after roasting at the temperature of 500 °C (a) and of the leaching residue (б). Reflexes: 1 – feldspar; 2 – amphibole; 3 – serpentine; 4 – magnetite; 5 – talc; 6 – goethite; 7 – sabiite; 8 – ammoniojarosite; 9 – quartz; 10 – nickel sulfate; 11 – chalcocyanite

Дальнейшее повышение температуры будет приводить к снижению количества реагента, участвующего в реакции, а также к образованию оксидов металлов. Это, вероятно, помимо увеличения энергозатрат, приведет к снижению извлечения при последующем водном выщелачивании.

Морфология частиц исходной руды месторождения Ньюд II, смеси руды с сульфатом аммония, обожженной смеси и остатка после выщелачивания показана на рис. 9. Частицы руды после измельчения характеризуются оскольчатой формой (рис. 9, а), что обеспечивает наилучший контакт с реагентом в процессе смешивания и последующего обжига. На рис. 9, б показаны изображения поверхности минеральных зерен в смеси с сульфатом аммония. Измельчение в шаровой мельнице позволяет раскрыть зерна и сростки минералов и, как следствие, обеспечить их контакт с реагентом. На рис. 9, в представлена поверхность частиц после обжига руды с сульфатом аммония при соотношении 1 : 7. Анализ микроснимков обожженной смеси позволяет говорить о высокой интенсивности взаимодействия частиц руды с сульфатом аммония, так как практически все исходные частицы покрыты сульфатной коркой после обжига. На частицах остатка после выщелачивания сульфатная корка отсутствует. Для поверхности частиц остатка после выщелачивания характерно появление трещиноватости (рис. 9, г).

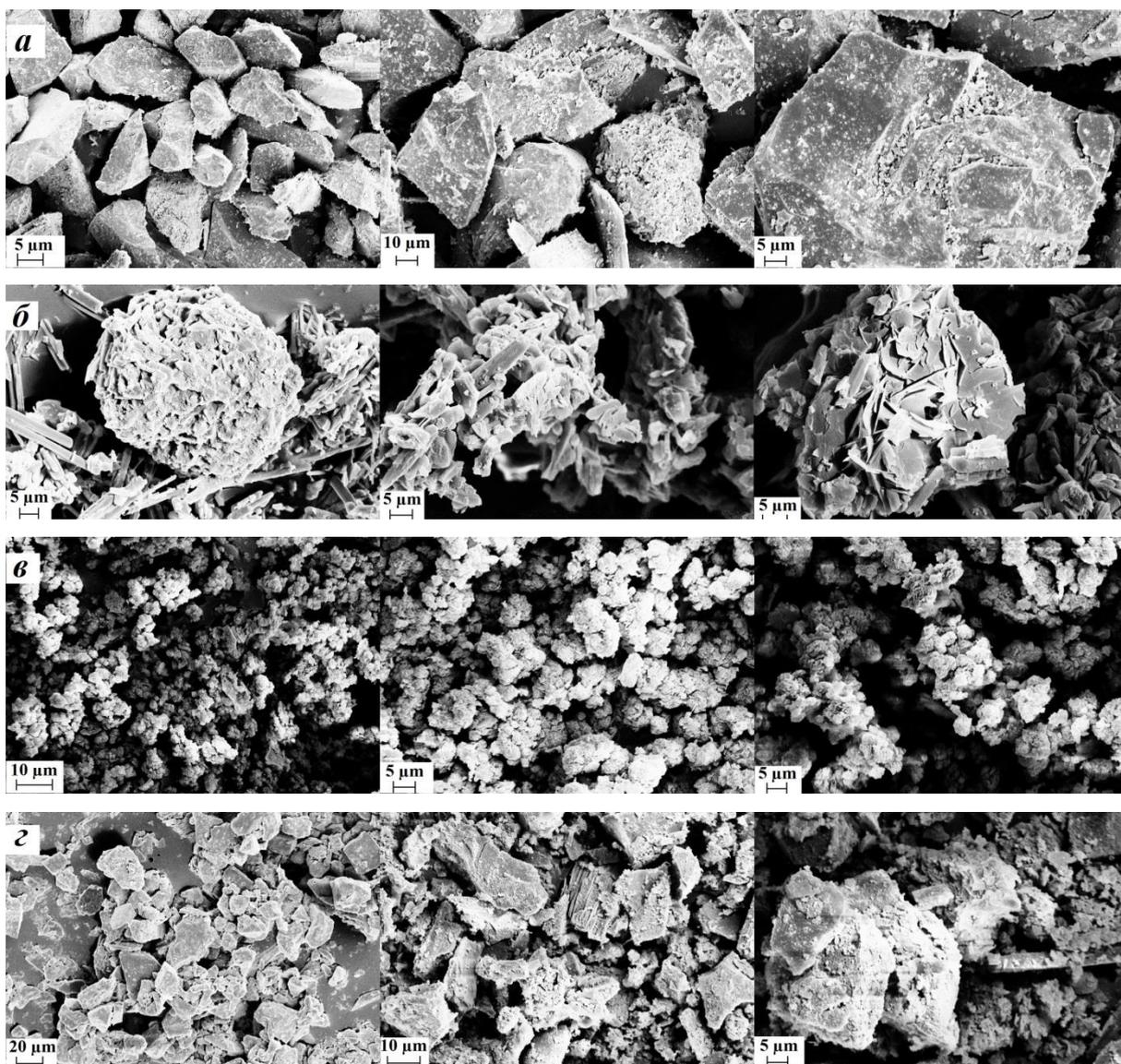


Рис. 9. СЭМ-изображения габитуса частиц руды Ньюд II (а), смеси руды с сульфатом аммония (б), обожженной при 400 °С смеси (в), остатка после выщелачивания обожженной смеси (г)

Fig. 9. SEM images of the particle surface of (a) Nud II ore, (б) mixture of ore with ammonium sulfate, (в) mixture roasted at 400 °C, (г) residue after roasted mixture leaching

В процессе обжига смеси руды (частицы крупностью –100 мкм) с сульфатом аммония при соотношении 1 : 2 установлено, что с увеличением температуры и продолжительности обжига извлечение металлов

при последующем выщелачивании возрастало (рис. 10, а и б). Наименьшее извлечение металлов отмечено при температуре обжига 300 °С и продолжительности 60 мин, никеля извлечено 3,6 %, меди – 3,5 %. Существенное увеличение извлечения никеля отмечено при температуре 400 °С и продолжительности 240 мин – 33,6 %. Максимальный уровень извлечения металлов отмечен при температуре 500 °С, однако отличия от извлечений при температуре 400 °С незначительны.

Учитывая резкий рост извлечений после обжига смеси при 400 °С, целесообразно рассмотреть способы интенсификации перехода металлов в водорастворимую форму при данной температуре и продолжительности 240 мин. Увеличение расхода сульфата аммония привело к более интенсивному извлечению металлов в раствор (рис. 10, в и г). При соотношении 1 : 7 к концу эксперимента извлечено 52,1 % меди и 56,7 % никеля. Для более значительного повышения извлечения металлов смесь перед обжигом измельчали до более тонких классов. Извлечения обоих металлов возрастали по мере увеличения степени измельчения сырья, подаваемого на обжиг. Из класса –40 мкм извлечено 73,5 % никеля и 72,1 % меди. Для повышения извлечения металлов увеличили продолжительность обжига. После обжига при температуре 400 °С в течение 300 мин в раствор удалось извлечь 79,1 % никеля и 75,8 % меди; дальнейшее увеличение времени обжига не приводило к увеличению извлечения металлов при данной крупности частиц и расходе реагента.

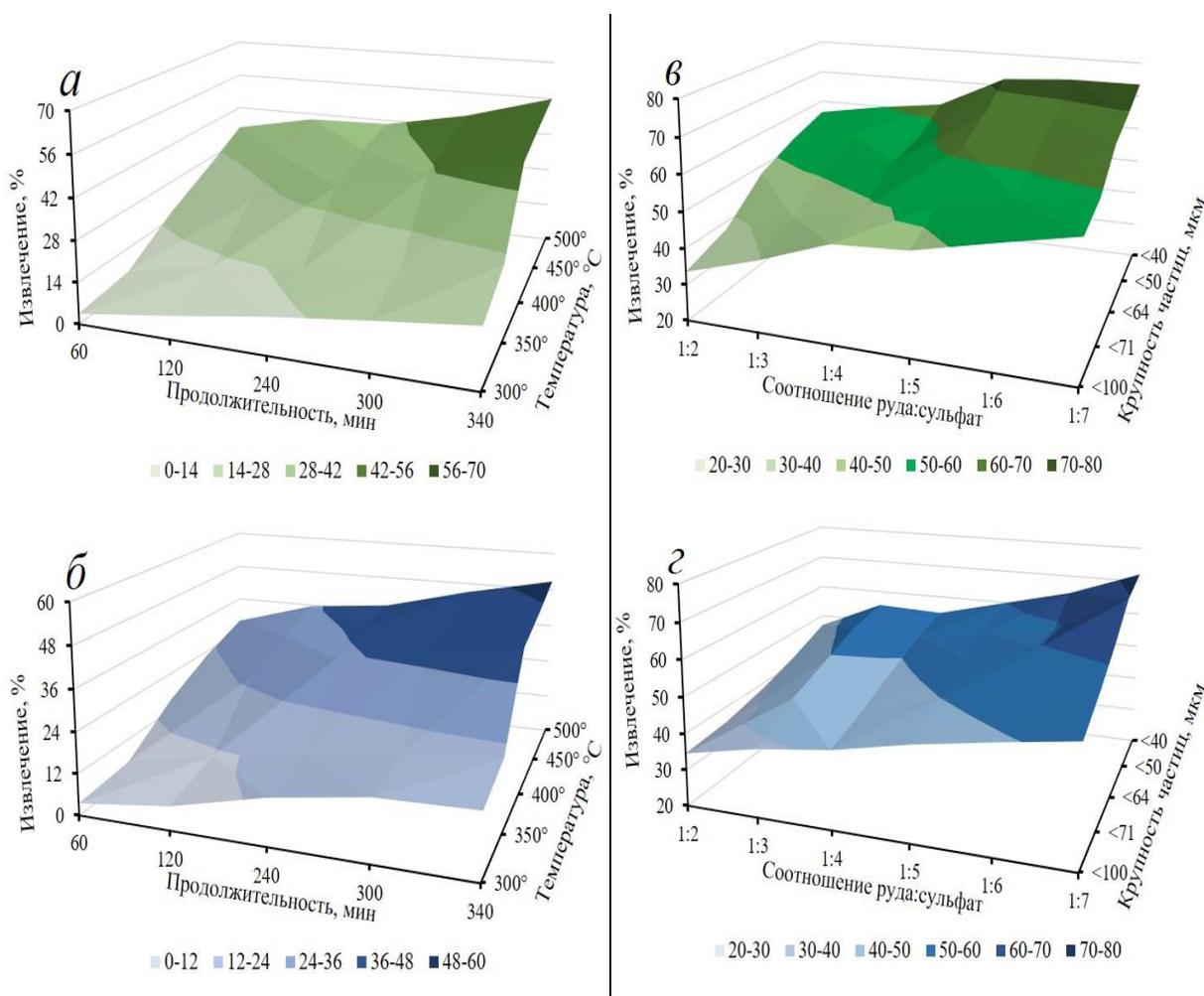


Рис. 10. Извлечение никеля (а) и меди (б) в раствор при различных продолжительности и температуре обжига; извлечение никеля (в) и меди (г) при различных расходе сульфата аммония и крупности частиц смеси  
 Fig. 10. Recovery of nickel (а) and copper (б) into the solution at different duration and roasting temperature, recovery of nickel (в) and copper (г) at different consumption of ammonium sulfate and particle size of the mixture

### **Заключение**

Проведенные лабораторные исследования позволили определить оптимальные параметры процесса низкотемпературного обжига руды месторождения Нюд II в смеси с сульфатом аммония: соотношение руды и сульфата аммония равно 1 : 7; крупность частиц обжигаемого сырья составляет –40 мкм; температура обжига 400 °С, время 300 мин. При данных параметрах извлечение цветных металлов в раствор в ходе последующего водного выщелачивания обожженной смеси в подогретой до ≈80 °С дистиллированной воде в течение 40 мин при постоянном перемешивании с интенсивностью 230 мин<sup>-1</sup> составляет 79,1 % никеля и 75,8 % меди. Для переработки продуктивных растворов предлагается схема последовательного выделения металлов, при которой на первой стадии методом цементации осаждается медь, на второй стадии производится повышение pH до значения, способствующего выпадению железа в осадок, на третьей стадии дальнейшим повышением значения pH из раствора извлекаются товарные гидроксиды никеля и кобальта.

Извлечения металлов, полученные при переработке руды месторождения Нюд II, ниже по сравнению с извлечениями из чернового медно-никелевого концентрата и руды Аллареченского техногенного месторождения, исследования по которым проводились ранее. Это связано как со значительным преобладанием инертных минералов в исходной руде, что затрудняет контакт сульфата аммония с сульфидными зёрнами в процессе обжига, так и с низким исходным содержанием цветных металлов. Таким образом, возникает необходимость продолжить исследования процесса низкотемпературного обжига руды месторождения Нюд II, направленные на поиск путей повышения извлечения из нее цветных металлов.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках тем НИР № 122022400093-9 и 1021051803684-1. Авторы благодарны Е. Д. Зенович и Н. В. Паршиной (Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс) за выполнение рентгенофазового анализа.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Горячев А. А., Беляевский А. Т., Макаров Д. В., Потапов С. С. [и др.]. Переработка медно-никелевых руд посредством низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022. Т. 58, № 3. С. 447–455. DOI: <https://doi.org/10.15372/ftprgi20220312>. EDN: TWKRSL.
- Горячев А. А., Макаров Д. В., Беляевский А. Т. Низкотемпературный обжиг медно-никелевых руд с сульфатом аммония как перспективный способ переработки такого сырья // *Минералогия техногенеза*. 2020. № 21. С. 144–151. EDN: YNPLSL.
- Игrevская Л. В. Россия на мировом рынке никеля // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2005. № 4. С. 67–71. EDN: PKAWIJ.
- Кондратьев В. Б., Попов В. В., Кедрова Г. В. Глобальный рынок меди (продолжение) // *Горная промышленность*. 2019. № 4(146). С. 100–101. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-4-100-101. EDN: WJXCXVV.
- Терновой В. В., Самойленко А. И., Царакон О. И. Обоснование минимального промышленного содержания полезного компонента для месторождений комплексного минерального сырья // *Записки Горного института*. 2009. Т. 184. С. 94–98. EDN: RENRMV.
- Фокина Н. В., Янишевская Е. С., Светлов А. В., Горячев А. А. Функциональная активность микроорганизмов в процессах добычи и переработки медно-никелевых руд Мурманской области // *Вестник МГТУ*. 2018. Т. 21, № 1. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>. EDN: YXHUWS.
- Cui F., Mu W., Zhai Y., Guo X. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 239. Article number 116577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116577>.
- Deng L., Qu B., Su S.-J., Ding S. L. [et al.]. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process // *Metals*. 2018. Vol. 8, Iss. 1. Article number 38. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010038>.
- Goryachev A. A., Chernousenko E. V., Potapov S. S., Tsvetov N. S. [et al.]. A study of the feasibility of using ammonium sulfate in copper-nickel ore processing // *Metals*. 2021. Vol. 11. Article number 422. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030422>.
- Henckens M. L. C. M., Worrell E. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 264. Article number 121460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>.
- Ju J., Feng Y., Li H., Xu C. [et al.]. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review // *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 457. Article number 141197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141197>.

- Li J., Li Y., Duan H., Guo X. [et al.]. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium sulfate // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2018. Vol. 59. P. 596–604. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821218060123>.
- Masloboev V. A., Seleznev S. G., Svetlov A. V., Makarov D. V. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges // *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 10. Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.
- Sun Y., Shen X.-y., Zhai Y.-c. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method // *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2015. Vol. 22. P. 467–475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1095-x>.
- Xu Y.-j., Xin H.-x., Duan H.-m., Li Y.-d. [et al.]. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting // *Journal of Central South University*. 2022. Vol. 29, Iss. 1. P. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4917-9>.

## References

- Goryachev, A. A., Belyaevsky, A. T., Makarov, D. V., Potapov, S. S. et al. 2022. Copper-nickel ore processing by low-temperature roasting in mixture with ammonium sulfate. *Journal of Mining Science*, 58(3), pp. 447–455. DOI: <https://doi.org/10.15372/ftprpi20220312>. EDN: TWKRSL. (In Russ.)
- Goryachev, A. A., Makarov, D. V., Belyaevskiy, A. T. 2020. Low-temperature roasting of copper-nickel ores with ammonium sulphate as a perspective method for processing such raw. *Mineralogiya tekhnogeneza*, 21, pp. 144–151. EDN: YNPLSL. (In Russ.)
- Igrevskaia, L. V. 2005. Russia on the global nickel market. *Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye*, 4, pp. 67–71. EDN: PKAWIJ. (In Russ.)
- Kondrat'ev, V. B., Popov, V. V., Kedrova, G. V. 2019. Global copper market (continued). *Russian Mining Industry*, 4(146), pp. 100–101. DOI: 10.30686/1609-9192-2019-4-100-101. EDN: WJCVV. (In Russ.)
- Ternovoy, V. V., Samoilenko, A. I., Tsarakov, O. I. 2009. The basis of minimal industrial maintenance of useful component for deposits of complex mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*, 184, pp. 94–98. EDN: RENRMV. (In Russ.)
- Fokina, N. V., Yanishevskaya, E. S., Svetlov, A. V., Goryachev, A. A. 2018. Functional activity of microorganisms in mining and processing of copper-nickel ores in the Murmansk region. *Vestnik of MSTU*, 21(1), pp. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>. EDN: YXHUWS. (In Russ.)
- Cui, F., Mu, W., Zhai, Y., Guo, X. 2020. The selective chlorination of nickel and copper from low-grade nickel-copper sulfide-oxide ore: Mechanism and kinetics. *Separation and Purification Technology*, 239. Article number 116577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116577>.
- Deng, L., Qu, B., Su, S.-J., Ding, S. L. et al. 2018. Extraction of iron and manganese from pyrolusite absorption residue by ammonium sulphate roasting-leaching process. *Metals*, 8(1). Article number 38. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8010038>.
- Goryachev, A. A., Chernousenko, E. V., Potapov, S. S., Tsvetov, N. S. et al. 2021. A study of the feasibility of using ammonium sulfate in copper-nickel ore processing. *Metals*, 11. Article number 422. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030422>.
- Henckens, M. L. C. M., Worrell, E. 2020. Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates. *Journal of Cleaner Production*, 264. Article number 121460. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121460>.
- Ju, J., Feng, Y., Li, H., Xu, C. et al. 2023. Extraction of valuable metals from minerals and industrial solid wastes via the ammonium sulfate roasting process: A systematic review. *Chemical Engineering Journal*, 457. Article number 141197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141197>.
- Li, J., Li, Y., Duan, H., Guo, X. et al. 2018. Experimental and kinetic study of magnesium extraction and leaching from laterite nickel ore by roasting with ammonium sulfate. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59, pp. 596–604. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1067821218060123>.
- Masloboev, V. A., Seleznev, S. G., Svetlov, A. V., Makarov, D. V. 2018. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges. *Minerals*, 8(10). Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.
- Sun, Y., Shen, X.-y., Zhai, Y.-c. 2015. Thermodynamics and kinetics of extracting zinc from zinc oxide ore by the ammonium sulfate roasting method. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 22, pp. 467–475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1095-x>.
- Xu, Y.-j., Xin, H.-x., Duan, H.-m., Li, Y.-d. et al. 2022. Reaction behavior of silicon-rich diasporic bauxite with ammonium sulfate during roasting. *Journal of Central South University*, 29(1), pp. 22–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-022-4917-9>.

### Сведения об авторах

**Горячев Андрей Александрович** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Andrey A. Goryachev** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic FRC KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Макаров Дмитрий Викторович** – ул. Ферсмана, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, д-р техн. наук; e-mail: [mdv\\_2008@mail.ru](mailto:mdv_2008@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

**Dmitriy V. Makarov** – 14a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Dr Sci. (Engineering); e-mail: [mdv\\_2008@mail.ru](mailto:mdv_2008@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

**Потапов Сергей Сергеевич** – территория Ильменский заповедник, 1, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, 456317; Институт минералогии Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [s\\_almazov@74.ru](mailto:s_almazov@74.ru)

**Sergey S. Potapov** – 1 Ilmensky State Reserve, Miass, Chelyabinsk region, Russia, 456317; South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geocology UB RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Senior Researcher; e-mail: [s\\_almazov@74.ru](mailto:s_almazov@74.ru)

**Беляевский Александр Трифионович** – ул. Ферсмана, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, ст. науч. сотрудник; e-mail: [a.belyaevskii@ksc.ru](mailto:a.belyaevskii@ksc.ru)

**Aleksandr T. Belyaevskiy** – 26a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209, I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Senior Researcher; e-mail: [a.belyaevskii@ksc.ru](mailto:a.belyaevskii@ksc.ru)

**Семущин Василий Владимирович** – ул. Ферсмана, 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, канд. хим. наук; e-mail: [v.semushin@ksc.ru](mailto:v.semushin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2456-3951>

**Vasily V. Semushin** – 26a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; I. V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials KSC RAS, Cand. Sci. (Chemistry); e-mail: [v.semushin@ksc.ru](mailto:v.semushin@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2456-3951>

**Компанченко Алена Аркадьевна** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

**Alena A. Kompanchenko** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Researcher; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

УДК 622.772:622.343'48 (470.21)

## Извлечение цветных металлов из сульфидных руд с помощью биовыщелачивания на примере Аллареченского техногенного месторождения

Е. С. Латюк\*, А. А. Горячев, А. А. Компанченко

\*Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: latyuk.es@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-1139>

### Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 06.04.2023; получена после доработки 10.05.2023; принята к публикации 11.05.2023

Возможность переработки сульфидного медно-никелевого сырья методом кучного биовыщелачивания вследствие экологической привлекательности данного подхода становится все более актуальной темой для горно-обогатительного производства. На примере руды Аллареченского техногенного месторождения рассмотрена эффективность метода биовыщелачивания для извлечения меди и никеля. Содержание металлов в исходном образце руды: никель – 2,42 % и медь – 0,75 %. Измельченную до крупности –5+3 мм руду орошали рабочим раствором, содержащим штамм *Acidithiobacillus ferrivorans*. Соотношение Т : Ж составило 4 : 1, расход – 0,1 мл/мин. У продуктивных растворов контролировали значения рН и окислительно-восстановительного потенциала, а также измеряли концентрации ионов двух- и трехвалентного железа, меди и никеля. Продолжительность эксперимента составила 11 месяцев, извлечено 8,9 % никеля и 6,1 % меди. Из продуктивных растворов извлекали медь методом цементации на железе, максимальное извлечение составило 97,3 %. Таким образом, предложенная схема извлечения металлов перспективна для переработки сульфидного сырья, в особенности – забалансовых руд и отходов обогащения.

### Ключевые слова:

медно-никелевые руды, биовыщелачивание, железозакисляющие бактерии, Аллареченское техногенное месторождение, цветные металлы, цементация меди

### Для цитирования

Латюк Е. С. и др. Извлечение цветных металлов из сульфидных руд с помощью биовыщелачивания на примере Аллареченского техногенного месторождения. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-150-159>.

## Recovery of non-ferrous metals from sulfide ores by bioleaching on the example of the Allarechensk technogenic deposit

Elena S. Latyuk\*, Andrey A. Goryachev, Alena A. Kompanchenko

\*Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: latyuk.es@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-1139>

### Article info

Received 06.04.2023;  
received in revised form 10.05.2023;  
accepted 11.05.2023

### Key words:

copper-nickel ores, bioleaching, iron-oxidizing bacteria, Allarechensk technogenic deposit, non-ferrous metals, copper cementation

### Abstract

The possibility of processing sulfide copper-nickel raw materials by heap bioleaching due to the environmental attractiveness of this approach is becoming an increasingly relevant topic for mining and processing. On the example of the Allarechensk technogenic deposit ore, the effectiveness of the bioleaching method for the copper and nickel recovery has been considered. The content of metals in the original ore sample: nickel – 2.42 % and copper – 0.75 %. The ore grinded to the size of –5+3 mm has been irrigated with a solution containing a strain of *Acidithiobacillus ferrivorans*. The S : L ratio is 4 : 1, the flow rate is equal to 0.1 mL/min. In pregnant solutions, the pH and redox potential values have been controlled, and the concentrations of ferrous and ferric iron, copper, and nickel ions have also been measured. The experiment duration is 11 months, 8.9 % nickel and 6.1 % copper have been recovered. Copper has been extracted from pregnant solutions by cementation on iron, the maximum recovery is 97.3 %. Thus, it has been shown that the proposed scheme for the recovery of metals is promising for the processing of sulfide raw materials, in particular, low-grade ores and enrichment waste.

### For citation

Latyuk, E. S. et al. 2023. Recovery of non-ferrous metals from sulfide ores by bioleaching on the example of the Allarechensk technogenic deposit. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 150–159. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-150-159>.

## Введение

Возможность переработки сульфидного медно-никелевого сырья методом кучного выщелачивания вследствие экологической привлекательности данного подхода становится все более актуальной темой для горно-обогатительного производства. Данный метод предлагает технологические подходы, удовлетворяющие требованиям концепции устойчивого развития за счет сокращения использования химически агрессивных реагентов, требующих в последующем безопасной утилизации, снижения объемов выбросов в атмосферный воздух и сравнительно низкого энергопотребления при обогатительном процессе. Кучное выщелачивание применяется, главным образом, для некондиционного и техногенного сырья. Повышенное внимание к данному виду сырья обусловлено снижением качества медно-никелевых руд, поступающих в настоящее время на обогащение традиционными методами. Тогда как при разработке отходов обогащения предприятие получает дополнительный экономический стимул вследствие сокращения затрат на добычу сырья (*Masloboev et al., 2018*).

Однако проведенные исследования минерального и фазового составов отходов обогащения медно-никелевых руд показывают, что при их хранении происходят необратимые изменения, связанные с окислением и естественным выщелачиванием, в результате чего происходит миграция ценных компонентов в прилегающие экосистемы. Поэтому потерю целевых металлов в техногенном образовании необходимо рассматривать как упущенную выгоду, а также как причину длительной негативной нагрузки на окружающую среду. Это обуславливает необходимость разработки технологического подхода, обеспечивающего максимально полное и оперативное извлечение меди и никеля из отходов обогащения руд (*Чантурия и др., 2022*).

Использование биогидрометаллургических технологий в промышленности нашло применение для получения цветных и благородных металлов из отходов обогащения сульфидных руд, бедных руд и концентратов (*Johnson, 2014; Anjum et al., 2012; Gentina et al., 2013; Kondrat'eva et al., 2012; Булаев и др., 2018*). В основе данной технологии лежат процессы окисления сульфидных минералов, содержащихся в рудах, микроорганизмами, использующими в качестве энергетического субстрата двухвалентное железо, серу и сульфидные минералы (*Кондратьева и др., 2015*). Ранее нами были проведены исследования, которые показали высокие и стабильные содержания металлов в фильтрах в ходе эксперимента с применением бактериального выщелачивания бедных руд и техногенных отходов, по сравнению с контрольным вариантом со слабокислым раствором серной кислоты (*Фокина и др., 2018*). Полученные результаты позволили утверждать, что поиск и подбор оптимальных условий экспериментов с применением микроорганизмов может дать более высокие показатели извлечения.

Целью работы является проведение лабораторных испытаний по извлечению меди и никеля из руды Аллареченского техногенного месторождения с помощью биовыщелачивания, с последующим извлечением меди из продуктивного раствора.

## Материалы и методы

Для проведения исследования использована руда Аллареченского техногенного месторождения (далее – ТМ). Отбор проб руды выполнен в 2021 г. Данный объект представляет собой отвал горных пород, образованный в результате разработки коренного Аллареченского месторождения. В процессе разработки месторождения вскрышные и вмещающие породы сгружались в отвал, объем пород в котором достиг 6 700 тыс. м<sup>3</sup> (рис. 1). Для отвала характерно, что среди руд представлены практически все основные группы и типы, характерные для коренного Аллареченского месторождения. Все типы руд характеризуются приблизительно одинаковым составом рудных минералов и отличаются лишь их количественным соотношением. Основными рудообразующими минералами являются: пирротин, пентландит, халькопирит и магнетит. Оцененные запасы руды составили 298 тыс. т со средним содержанием Ni – 1,57 %, Cu – 1,34 %, Co – 0,029 %. Запасы полезных компонентов: Ni – 4 695 т, Cu – 3 997 т, Co – 88 т (*Селезнев, 2013*). Содержание металлов в экспериментальном образце руды Аллареченского ТМ: никель – 2,42 % и медь – 0,75 %.

Руду Аллареченского техногенного месторождения измельчали до крупности –5+3 мм и помещали в стеклянные перколяторы (рис. 2). Эксперимент выполняли в двух повторностях. Масса загрузки каждого перколятора составила 4 кг. С использованием перистальтического насоса (Shenchen Precision Pump Co., Ltd, КНР) рудный слой орошали рабочим раствором, приготовленным с использованием минеральной питательной среды Сильвермана и Люндгрена 9К, содержащей соли азота и фосфора, инокулированным штаммом *Acidithiobacillus ferrivorans*, с исходной численностью микроорганизмов около  $3 \times 10^8$  кл/мл. Соотношение Т : Ж составило 4 : 1, расход – 0,1 мл/мин. Продуктивный раствор подкисляли 10%-м раствором серной кислоты, доводили до требуемого объема дистиллированной водой и вновь подавали на рудный слой. Эксперимент проводили при температуре  $+20 \pm 1$  °С, продолжительность составила 11 месяцев.

Исследована кинетика извлечения меди из продуктивного раствора методом цементации на железной стружке, при различном расходе железа (массовое соотношение железа и меди – 1 : 5 и 1 : 10),

продолжительностью 5–30 мин с шагом 2 мин, а также интенсивностью перемешивания раствора 250 и 500 об/мин. Опыты проведены с использованием верхнеприводной мешалки MV-6 (ООО "НВ-ЛАБ", Россия).



Рис. 1. Аллареченское техногенное месторождение  
Fig. 1. Allarechensk technogenic deposit



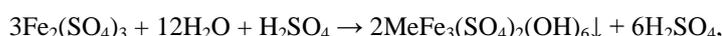
Рис. 2. Лабораторная установка для моделирования кучного выщелачивания  
Fig. 2. Laboratory equipment for heap leaching modeling

Определение значений pH и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) продуктивных растворов проводили на иономере И-160МИ (ООО "Измерительная техника", Москва, Россия). Концентрации ионов никеля, меди и железа в продуктивных растворах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (Shimadzu-AA7000G, ShimadzuCorp., Киото, Япония) с электротермической атомизацией

(ПНД Ф 14.1:2:4.140-98<sup>1</sup>). Степень извлечения меди и никеля рассчитывали по концентрации металлов в жидкой фазе. Анализ твердой фазы выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа ZEISS EVO 25, оборудованного энергодисперсионным спектрометром AztecUltimMax 170 (Oxford Instruments), ПО Aztec.

### Результаты и обсуждение

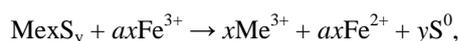
На протяжении всего эксперимента значения рН продуктивных растворов были выше по сравнению с исходным раствором, подаваемым на вершину колонки. Это связано с преимущественным растворением оксидных минералов, в значительном количестве присутствующих в составе руды. На рис. 3, а представлена динамика значений рН и ОВП продуктивных растворов. Для поддержания рН в комфортном для функционирования микроорганизмов диапазоне продуктивный раствор подкисляли 10%-м раствором серной кислоты, среднее значение рН по ходу эксперимента составило ~1,9. Расход серной кислоты – 33 кг/т. Значения ОВП изменялись в диапазоне 500–652 мВ, среднее значение – 564,8 мВ. Снижение концентрации железа в среде (рис. 3, б), вероятно, вызвано образованием ярозита, что приводит к вторичному осаждению железа из раствора и снижению его концентрации



где Me – ионы  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ .

Концентрации меди и никеля постепенно возрастали (рис. 3, в), никель извлекался в раствор интенсивнее меди. Это происходит благодаря вхождению меди в состав халькопирита, который более устойчив к биоокислению, чем минералы никеля.

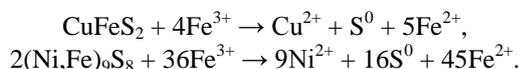
Разрушение кристаллической решетки сульфидных минералов обусловлено их взаимодействием с трехвалентным железом в кислой среде



где  $a$  – валентность металла,  $x$  и  $y$  – стехиометрические коэффициенты для металла и серы.

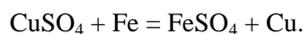
Так, в присутствии  $\text{Fe}^{3+}$  роль бактерий в процессе окисления сульфидных минералов, как правило, заключается в регенерации окислителя, т. е. в окислении  $\text{Fe}^{2+}$ .

Выщелачивание халькопирита и пентландита можно представить в виде следующих формул:



С учетом кинетики извлечения металлов в раствор после 150 суток выщелачивания было выполнено разбавление раствора, что способствовало резкому росту извлечения металлов, в особенности – меди. К концу эксперимента из руды было извлечено 8,9 % никеля и 6,1 % меди. Наиболее интенсивно процесс выщелачивания происходил в течение 210 суток с начала эксперимента, после чего извлечение металлов в раствор существенно замедлилось. Это указывает на необходимость перемешивания рудного слоя, что вероятно, будет способствовать контакту раствора с минералами в тех участках рудного штабеля, куда попадание раствора по тем или причинам было затруднено.

Из продуктивных растворов после биовыщелачивания выполнено извлечение меди методом цементации на железе, который заключается в восстановлении металла (окислителя), имеющего более положительный электродный потенциал, металлом с отрицательным потенциалом (*Скорчеллетти, 1973*). По данным Б. Д. Халезова, цементация на железе – самый распространенный способ извлечения меди при небольших масштабах производства из слабо концентрированных сульфатных растворов, что актуально при переработке отходов и руд маломощных месторождений (*Халезов и др., 2005*). Основной реакцией цементации меди является процесс



Согласно работе (*Скорчеллетти, 1973*) теоретический расход железа на цементацию меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ) составляет 0,867 весовых единицы на единицу меди. В действительности, расход железа становится выше, так как в процессе цементации площадь активной поверхности осадителя сокращается.

<sup>1</sup> ПНД Ф 14.1:2:4.140-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций бериллия, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, меди, молибдена, мышьяка, никеля, олова, свинца, селена, серебра, сурьмы, хрома в питьевых, природных и сточных водах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией. М., 2013.

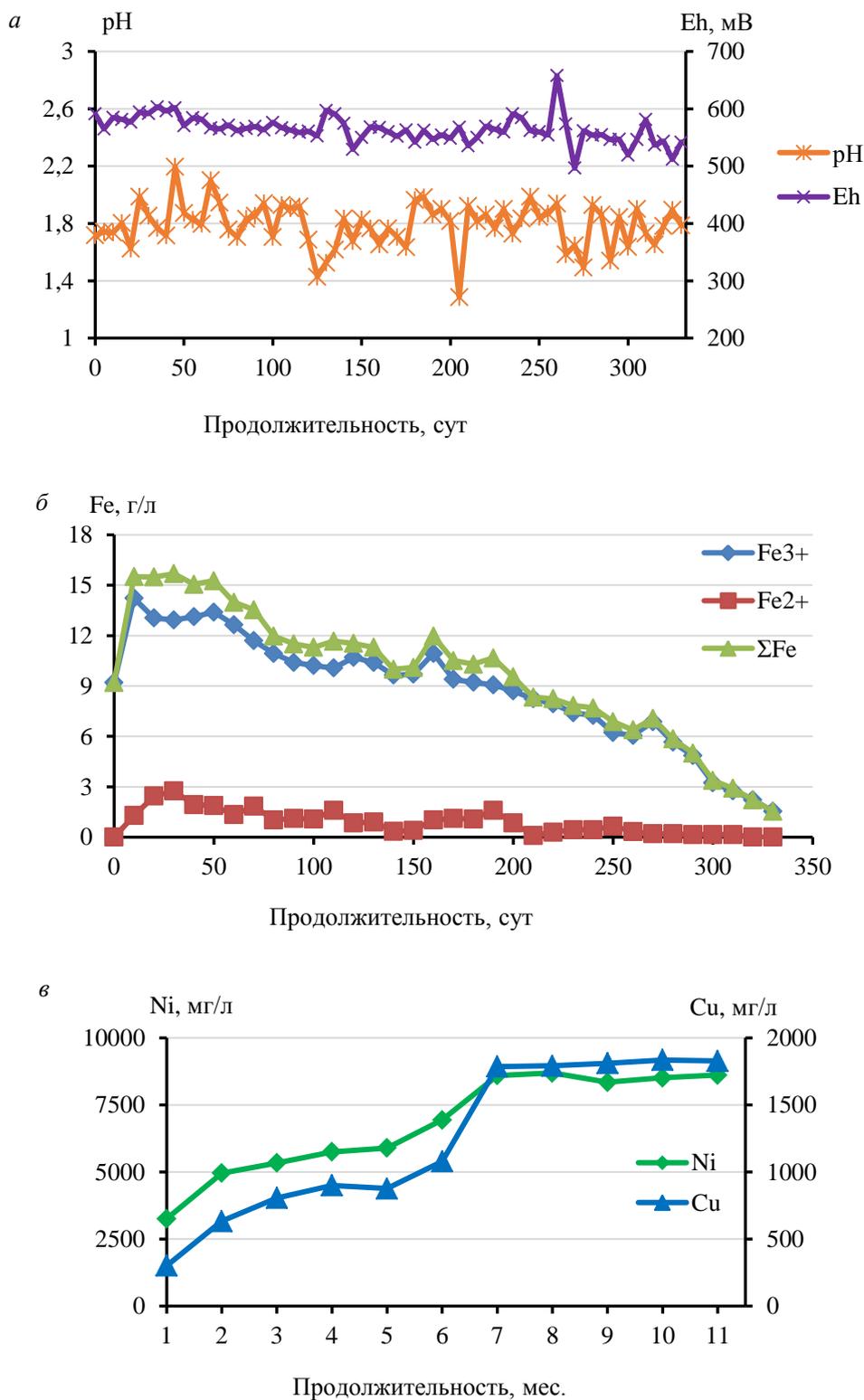


Рис. 3. Значения pH, ОВП продуктивных растворов (а), концентрация железа (б), концентрация металлов в растворе (в)  
 Fig. 3. pH values, oxidation-reduction potential of productive solutions (а), iron concentrations (б), metal concentrations in the solution (в)

На рис. 4 представлена динамика концентрации меди в растворе на протяжении эксперимента при различном расходе железной стружки. Концентрация меди в исходном растворе составляла 1 977 мг/л. При массовом соотношении железа и содержащейся в растворе меди, равным 1 : 5, без перемешивания

за 30 мин эксперимента концентрация меди снижается до 669 мг/л, извлечение при этом составляло 66,2 % (рис. 4, а). При перемешивании с интенсивностью 250 об/мин к концу эксперимента концентрация меди снижается до 312 мг/л, извлечение составляет 84,2 %. Перемешивание с интенсивностью 500 об/мин позволило уже за 6 мин эксперимента снизить концентрацию меди до 865 мг/л, к концу эксперимента концентрация меди в растворе составляла 262 мг/л, извлечено 86,8 %. Увеличение расхода железной стружки до соотношения железа и меди, равного 1 : 10, позволило повысить извлечение меди из раствора при перемешивании раствора. При интенсивности перемешивания 500 об/мин к концу эксперимента концентрация меди в растворе составляла 54 мг/л, извлечение достигло 97,3 %.

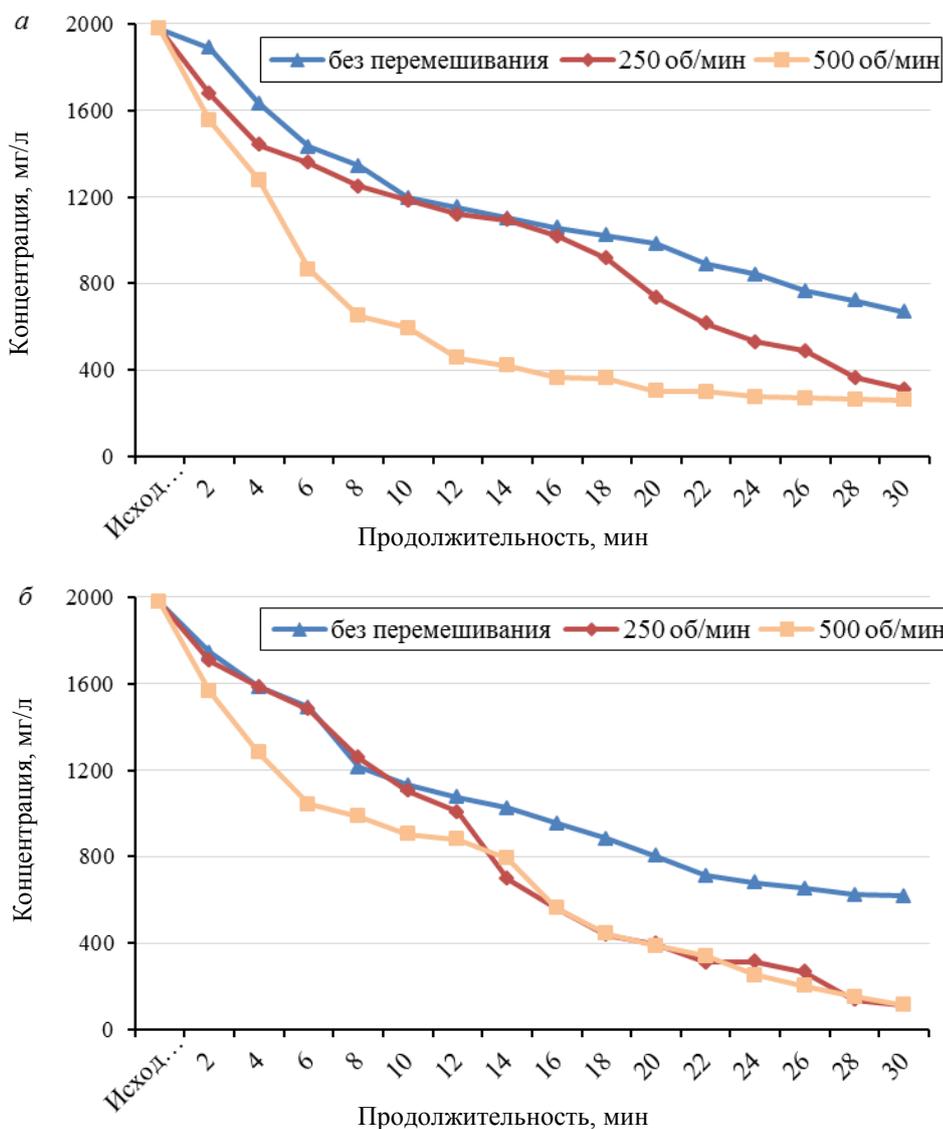
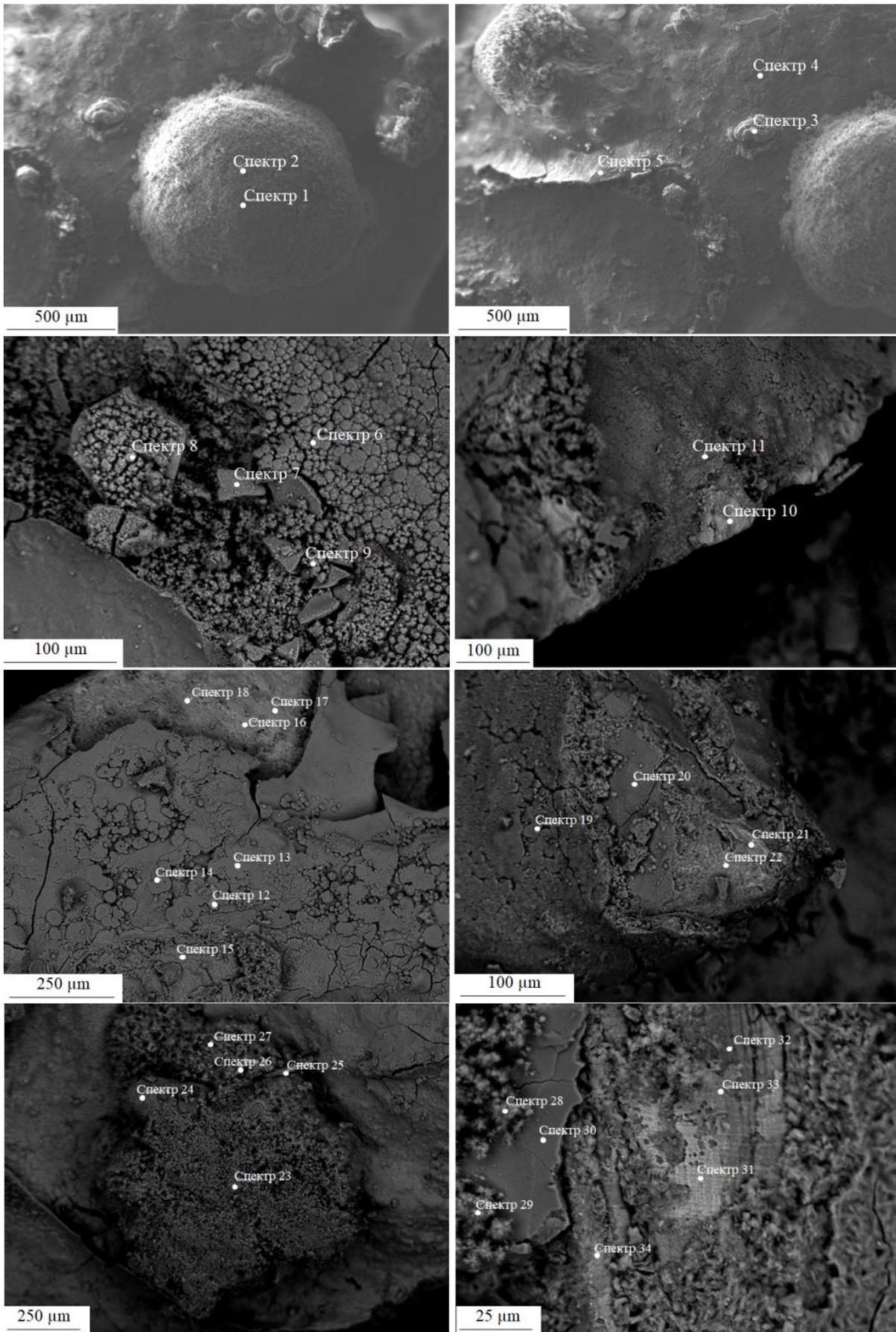


Рис. 4. Извлечение меди из продуктивного раствора при массовом соотношении железа и меди:  
а – 1 : 5; б – 1 : 10

Fig. 4. Extraction of copper from a productive solution at a mass ratio of iron and copper:  
а – 1 : 5; б – 1 : 10

На рис. 5 представлены снимки и ЭДС-спектры поверхности железной стружки после цементации меди (соотношение – 1 : 10). Отмечено формирование корок сульфата железа. Медь формировалась на поверхности сульфатов, где также обнаруживались примеси марганца и хрома. Для недопущения замедления процесса осаждения меди требуется ее удаление с поверхности осадителя механическим способом. Применение метода цементации особенно актуально при небольших масштабах производства (до 5 тыс. т/год), когда применение экстракционных способов концентрирования растворов экономически нецелесообразно. При полной механизации цементационной установки раствор отправляется на дальнейшую обработку, а цементную медь направляют на вакуум-фильтр или фильтр-пресс. В этом случае окончательная продукция получается в виде порошка цементной меди.



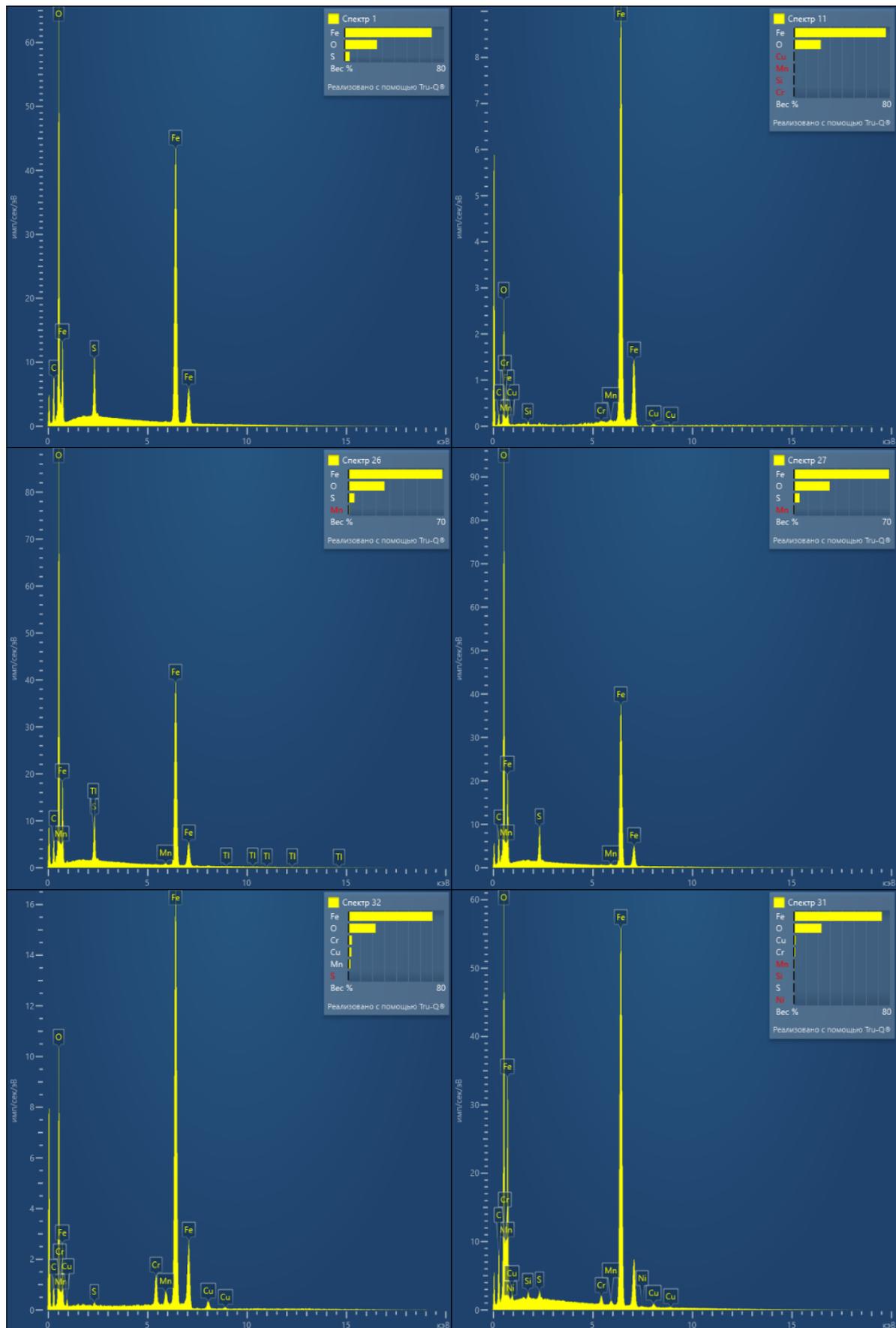


Рис. 5. СЭМ-изображения и ЭДС-спектры поверхности железной стружки после цементации меди  
Fig. 5. SEM images and EMF spectra of the iron shaving surface after copper cementation

Для последующего выделения металлов целесообразно произвести осаждение железа из раствора посредством повышения pH. Для повышения значения pH раствора предлагается использовать негашеную известь (CaO), в результате взаимодействия с раствором будет образовываться железо-гипсовый кек, содержащий следующие основные фазы – гипс, портландит и гидроксиды железа. Осадок может быть использован в качестве компонента при приготовлении строительных смесей. После осаждения железа извлечение никеля предлагается осуществлять с помощью брусита (Mg(OH)<sub>2</sub>) с получением товарных гидроксидов металлов.

#### **Заключение**

Полученные результаты показали перспективность технологии кучного биовыщелачивания для переработки руды Аллареченского техногенного месторождения с помощью штамма *Acidithiobacillus ferrivorans*. Выбранный температурный режим и использование оборотного раствора позволили извлечь за 11 месяцев эксперимента 8,9 % никеля и 6,1 % меди. Концентрации меди и никеля в продуктивных растворах достигали высоких значений за сравнительно небольшой промежуток времени, раствор становился кондиционным для извлечения из него цветных металлов. Поскольку извлечение меди из раствора методом цементации на железе составило 97,3 %, а общие запасы меди в Мурманской области составляют 1 298,7 тыс. т, то предложенная схема извлечения металлов перспективна для переработки местного сырья, в особенности – забалансовых руд и отходов обогащения. Для реализации результатов исследования в промышленном масштабе предполагается укладка штабеля на водонепроницаемое основание, орошение с помощью сети труб поверхности штабеля продуктивным раствором, содержащим бактериальную культуру, сбор раствора в резервуар у основания кучи и последующее извлечение металлов. Суровые климатические условия не являются преградой для успешного осуществления процесса, так как при биовыщелачивании происходит разогрев отвала вследствие окисления.

#### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках тем НИР 122022400109-7 и 122022400093-9.

Авторы благодарны сотрудникам Центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН за помощь в определении концентрации цветных металлов.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Библиографический список**

- Булаев А. Г., Меламуд В. С. Биовыщелачивание цветных металлов из отходов обогащения // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12–1(78). С. 63–71. DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.01. EDN: PLTGET.
- Кондратьева Т. Ф., Булаев А. Г., Муравьев М. И. Микроорганизмы в биоготехнологиях переработки сульфидных руд. М. : Наука, 2015. 212 с.
- Селезнев С. Г. Отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд – специфика и проблемы освоения : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2013. 147 с.
- Скорчеллетти В. В. Теоретические основы коррозии металлов. Л. : Химия, 1973. 264 с.
- Фокина Н. В., Янишевская Е. С., Светлов А. В., Горячев А. А. Функциональная активность микроорганизмов в процессах добычи и переработки медно-никелевых руд Мурманской области // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>.
- Халезов Б. Д., Ватолин Н. А., Макурин Ю. Н., Быков Н. А. Исследование извлечения меди в барабанном цементаторе // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. № 5. С. 302–311. EDN: ICJNVV.
- Чантурия В. А., Маслобоев В. А., Суворова О. В., Васильева Т. Н. [и др.]. Обоснование технологий переработки и снижения экологической опасности отходов горных предприятий: основные результаты и перспективы научного сотрудничества // Труды Кольского научного центра РАН. Сер. Естественные и гуманитарные науки. 2022. Т. 1, № 2. С. 9–19. DOI: <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2022.1.2.002>. EDN: PNTGAG.
- Anjum F., Shahid M., Akcil A. Biohydrometallurgy techniques of low grade ores: A review on black shale // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 117–118. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.01.007>.
- Gentina J. C., Acevedo F. Application of bioleaching to copper mining in Chile // Electronic Journal of Biotechnology. 2013. Vol. 16, Iss. 3. URL: [https://www.researchgate.net/publication/262708263\\_Application\\_of\\_bioleaching\\_to\\_copper\\_mining\\_in\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/262708263_Application_of_bioleaching_to_copper_mining_in_Chile).
- Johnson D. B. Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials // Current Opinion in Biotechnology. 2014. Vol. 30. P. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008>.
- Kondrat'eva T. F., Pivovarova T. A., Bulaev A. G., Melamud V. S. [et al.]. Percolation bioleaching of copper and zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia // Hydrometallurgy. 2012. Vol. 111–112. P. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.007>.

Masloboev V. A., Seleznev S. G., Svetlov A. V., Makarov D. V. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges // *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 10. Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.

## References

- Bulaev, A. G., Melamud, V. S. 2018. Bio-leaching of non-ferrous metals from enrichment wastes. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 12–1(78), pp. 63–71. DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.01. EDN: PLTGET. (In Russ.)
- Kondratieva, T. F., Bulaev, A. G., Muravyov, M. I. 2015. Microorganisms in biogeotechnologies for processing sulfide ores. Moscow. (In Russ.)
- Seleznev, S. G. 2013. Dumps of the Allarechensky deposit of sulfide copper-nickel ores – specificity and problems of development. Ph.D. Thesis. Ekaterinburg. (In Russ.)
- Scorcelletti, V. V. 1973. Theoretical bases of corrosion of metals. Leningrad. (In Russ.)
- Fokina, N. V., Yanishevskaya, E. S., Svetlov, A. V., Goryachev, A. A. 2018. Functional activity of microorganisms in the processes of mining and processing of copper-nickel ores in the Murmansk region. *Vestnik of MSTU*, 21(1), pp. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-109-116>. (In Russ.)
- Khalezov, B. D., Vatolin, N. A., Makurin, Yu. N., Bykov, N. A. 2005. Study of copper extraction in a drum cementer. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 5, pp. 302–311. EDN: ICJNVV. (In Russ.)
- Chanturia, V. A., Masloboev, V. A., Suvorova, O. V., Vasilyeva, T. N. et al. 2022. Substantiation of technologies for processing and reducing the environmental hazard of waste from mining enterprises: Main results and prospects scientific cooperation. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 1(2), pp. 9–19. DOI: <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2022.1.2.002>. EDN: PNTGAG. (In Russ.)
- Anjum, F., Shahid, M., Akcil, A. 2012. Biohydrometallurgy techniques of low grade ores: A review on black shale. *Hydrometallurgy*, 117–118, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.01.007>.
- Gentina, J. C., Acevedo, F. 2013. Application of bioleaching to copper mining in Chile. *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(3). URL: [https://www.researchgate.net/publication/262708263\\_Application\\_of\\_bioleaching\\_to\\_copper\\_mining\\_in\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/262708263_Application_of_bioleaching_to_copper_mining_in_Chile).
- Johnson, D. B. 2014. Biomining – biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 30, pp. 24–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008>.
- Kondrat'eva, T. F., Pivovarova, T. A., Bulaev, A. G., Melamud, V. S. et al. 2012. Percolation bioleaching of copper and zinc and gold recovery from flotation tailings of the sulfide complex ores of the Ural region, Russia. *Hydrometallurgy*, 111–112, pp. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.007>.
- Masloboev, V. A., Seleznev, S. G., Svetlov, A. V., Makarov, D. V. 2018. Hydrometallurgical processing of low-grade sulfide ore and mine waste in the Arctic regions: Perspectives and challenges. *Minerals*, 8(10). Article number 436. DOI: <https://doi.org/10.3390/min8100436>.

## Сведения об авторах

**Латюк Елена Сергеевна** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [latyuk.es@gmail.com](mailto:latyuk.es@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-1139>

**Elena S. Latyuk** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [latyuk.es@gmail.com](mailto:latyuk.es@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3461-1139>

**Горячев Андрей Александрович** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Andrey A. Goryachev** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [a.goryachev@ksc.ru](mailto:a.goryachev@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

**Компанченко Алёна Аркадьевна** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

**Alena A. Kompanchenko** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Researcher; e-mail: [komp-alena@yandex.ru](mailto:komp-alena@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1240-7898>

УДК 550.3

## Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств

З. Я. Кузина, Н. Н. Неведрова, А. М. Санчаа\*

\*Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия;  
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

### Информация о статье

### Реферат

Поступила  
в редакцию  
04.04.2023;

получена  
после доработки  
04.05.2023;

принята к публикации  
30.05.2023

### Ключевые слова:

Горный Алтай,  
Уймонская впадина,  
электротомография,  
геоэлектрические  
разрезы, 2D инверсия,  
3D инверсия

Определение строения межгорных впадин в сейсмоактивных районах на разных глубинах является важным для понимания этапов неотектонического формирования региона и оценки сейсмической опасности. На территории Уймонской впадины Горного Алтая в разные годы осуществлялись измерения глубинными методами электротомографии, такими как зондирования становлением поля и вертикальными электрическими зондированиями, однако для уточнения строения верхней части разреза, где наблюдаются выходы коренных пород на дневную поверхность, необходимо применение малоглубинных методов, например, электротомографии (ЭТ). Рассматриваются результаты интерпретации данных ЭТ с использованием 2D и 3D инверсии при изучении выходов пород фундамента в западной части впадины. С учетом априорной информации и полученных моделей было уточнено геологическое строение объекта исследования. По результатам интерпретации данных электротомографии с использованием программ двух-, трехмерной инверсии определено геоэлектрическое строение одного из выходов пород фундамента на дневную поверхность. Установлено погружение исследуемого объекта в западном направлении в сторону расположенного в непосредственной близости соседнего выхода пород баратальской свиты меньших размеров. Можно предположить, что эти два выхода соединяются на глубине 15–20 м и, видимо, являются одной структурой.

### Для цитирования

Кузина З. Я. и др. Особенности строения верхней части разреза Уймонской впадины Горного Алтая по данным электротомографии с использованием трехмерных программных средств. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 160–169. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169

## Structural features of the upper part of the section of the Gorniy Altai Uimon depression according to electrotomography data using 3D software

Zoia Ya. Kuzina, Nina N. Nevedrova, Aydisa M. Sanchaa\*

\*Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia;  
e-mail: SanchaaAM@ipgg.sbras.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

### Article info

### Abstract

Received  
04.04.2023;

received  
in revised  
04.05.2023;

accepted  
30.05.2023

### Key words:

Gorniy Altai,  
Uimon depression,  
electrical resistivity  
tomography,  
geoelectrical sections,  
2D inversion,  
3D inversion

Determining the structure of intermountain depressions in seismically active regions at different depths is important for understanding the stages of neotectonic formation of the region and seismic hazard assessment. On the territory of the Uimon depression of the Altai Mountains in different years, measurements were carried out by deep methods of electrical exploration, such as sounding by the formation of the field and vertical electrical soundings. However, to clarify the structure of the upper part of the section, where bedrock outcrops are observed on the day surface, it is necessary to use shallow methods, for example, electrical tomography (ET). The paper discusses the results of ET data interpretation using 2D and 3D inversion when studying basement outcrops in the western part of the basin. Taking into account a priori information and the obtained models, the geological structure of the object of study has been refined. Based on the results of the interpretation of the data of electrotomography using programs of two- and three-dimensional inversion, the geoelectric structure of one of the outcrops of the basement rocks on the day surface has been determined. The immersion of the studied object in the western direction towards the adjacent outcrop of rocks of the Baratal Formation of smaller sizes located in the immediate vicinity has been established. It can be assumed that these two exits are connected at a depth of 15–20 m and, most likely, are one structure.

### For citation

Kuzina, Z. Ya. et al. 2023. Structural features of the upper part of the section of the Gorniy Altai Uimon depression according to electrotomography data using 3D software. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 160–169. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-160-169

## Введение

Уймонская впадина, наряду с Чуйской и Курайской, относится к самым крупным отрицательным элементам неотектонической структуры Горного Алтая и при этом до последнего времени была недостаточно изучена геофизическими методами. Она расположена в центральной части Горного Алтая, с протяженностью вдоль субширотной оси около 35 км при средней ширине 15 км. Впадина ограничена на севере Теректинским хребтом, с юга – высочайшим в Сибири Катунским хребтом, в подножье которого протекает р. Катунь. В горном обрамлении впадины регулярно происходят землетрясения с магнитудами 4 и более, также выявлены палеоземлетрясения еще больших магнитуд непосредственно на ее территории, т. е. заселенная впадина находится в зоне повышенной сейсмической опасности (Деев, 2019).

В результате надвигания северного горного обрамления на впадину ее форму можно охарактеризовать как ассиметричную отрицательную структуру – полурампы (Деев и др., 2018). Глубинное строение осадочного чехла и кровли фундамента впервые было получено методами электромагнитных зондирований становлением поля в зоне (ЗСБ) и вертикальными электрическими зондированиями (ВЭЗ) (Деев и др., 2012; Санчаа и др., 2020). Работы выполнялись в два этапа. В 2011–2012 гг. по результатам интерпретации электромагнитных зондирований был выбран участок, на котором пробурена первая глубокая скважина. Литолого-стратиграфические данные этой скважины были использованы в качестве априорных при дальнейшей интерпретации данных геоэлектрики. После некоторого перерыва в 2018–2019 гг. работы методами ЗСБ и ВЭЗ были продолжены. По всему объему данных ЗСБ и ВЭЗ, полученных в разные годы, построены разрезы по профилям, карта глубин до опорного высокоомного горизонта. Из-за большого шага между пунктами глубинных измерений осталось неясным строение верхней части разреза, местами осложненное выходами коренных пород баратальской свиты ( $S_nbr$ ) на дневную поверхность в западной и центральной частях впадины. Для уточнения приповерхностного строения был привлечен метод электротомографии (ЭТ).

В качестве объекта исследования выбран участок с одними из выходов отложений синийского комплекса, расположенный в западной части впадины (рис. 1). На выбранном участке в полевой сезон 2022 г. методом ЭТ с использованием аппаратуры "Скала-48" были получены данные по трем параллельным профилям. Обработка и интерпретация полевых данных квазиплощадной съемки электротомографии выполнялись с использованием программного комплекса моделирования и инверсии DiInSo, разработанного в Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (ИНГТ СО РАН)<sup>1</sup> (Мариненко, 2020; DiInSo, 2021). Комплекс позволяет осуществлять двух- и трехмерное моделирование и инверсию.

Цель работы – построение геоэлектрических моделей выбранного участка с использованием трехмерных программ.

## Материалы и методы

### Геологические данные

Кайнозойские депрессии Горного Алтая – Чуйская, Курайская и Уймонская – формировались практически одновременно и имеют схожую историю осадконакопления и неотектоническое развитие. Вместе с тем у этих впадин наблюдается ряд различий, например, по общей мощности осадочного заполнения, строению краевых частей и по отдельным характеристикам литолого-стратиграфических комплексов.

В северной и центральной части Уймонской впадины существуют значительные конусы выноса рек Курунда, Кастахта, Теректа, Маргала и Чендек. В разрезе впадины присутствуют отложения протерозоя, синия, нижнего и среднего палеозоя и кайнозоя. Фундамент Уймонской впадины представлен теректинской свитой, включающей метаморфические сланцы, песчаники, мраморы. Выше залегают отложения баратальской свиты, предположительно синийского возраста (метаморфизованные диабазы, порфириды и их туфы), которые выходят на дневную поверхность в центральной и западной частях впадины. Предположительно выходами на дневную поверхность геологи считают фрагменты анти- и синклиналей баратальской свиты.

В 2013 г. на основе анализа геоэлектрических данных был выбран участок с относительно неглубоким залеганием фундамента – практически в центре котловины. Специалистами ОАО "Горно-Алтайская Экспедиция" была пробурена первая глубокая скважина, впервые вскрывшая разрез неоген-четвертичных отложений до 400 м, и определены следующие типы отложений: деллювиальные, аллювиальные, пролювиальные, озерные, ледниково-озерные и лессовидные, обладающие неоплейстоцен-голоценовым возрастом (см. табл.) (Русанов и др., 2017). По данным исследований скважины и электромагнитных методов осадочные отложения Уймонской впадины разделяют на два литологических комплекса, которые существенно отличаются по значениям удельного электрического сопротивления. Комплекс отложений туерьской свиты, характеризующийся низкими удельными сопротивлениями, выполнен преимущественно тонкозернистыми озерными отложениями неогенового возраста, которые накапливались в обстановках небольшого вертикального расчленения рельефа. Комплекс, перекрывающий туерьскую свиту, обладает достаточно высокими значениями сопротивлений. Он в существенной степени сложен грубозернистыми фациями четвертичного возраста. Зафиксированные резкий скачок сопротивлений и смена фаций свидетельствуют о возобновлении неотектонических орогенных процессов в Горном Алтае. Во время активизации горнообразовательных

<sup>1</sup> Программный комплекс Direct-Inverse-Solver (DiInSo). URL: <https://diinso.sourceforge.net>.

процессов морфологическая структура впадины видоизменяется: происходит преобразование от структуры пулл-апарт в рампы и полурампы (Деев и др., 2013; 2018).

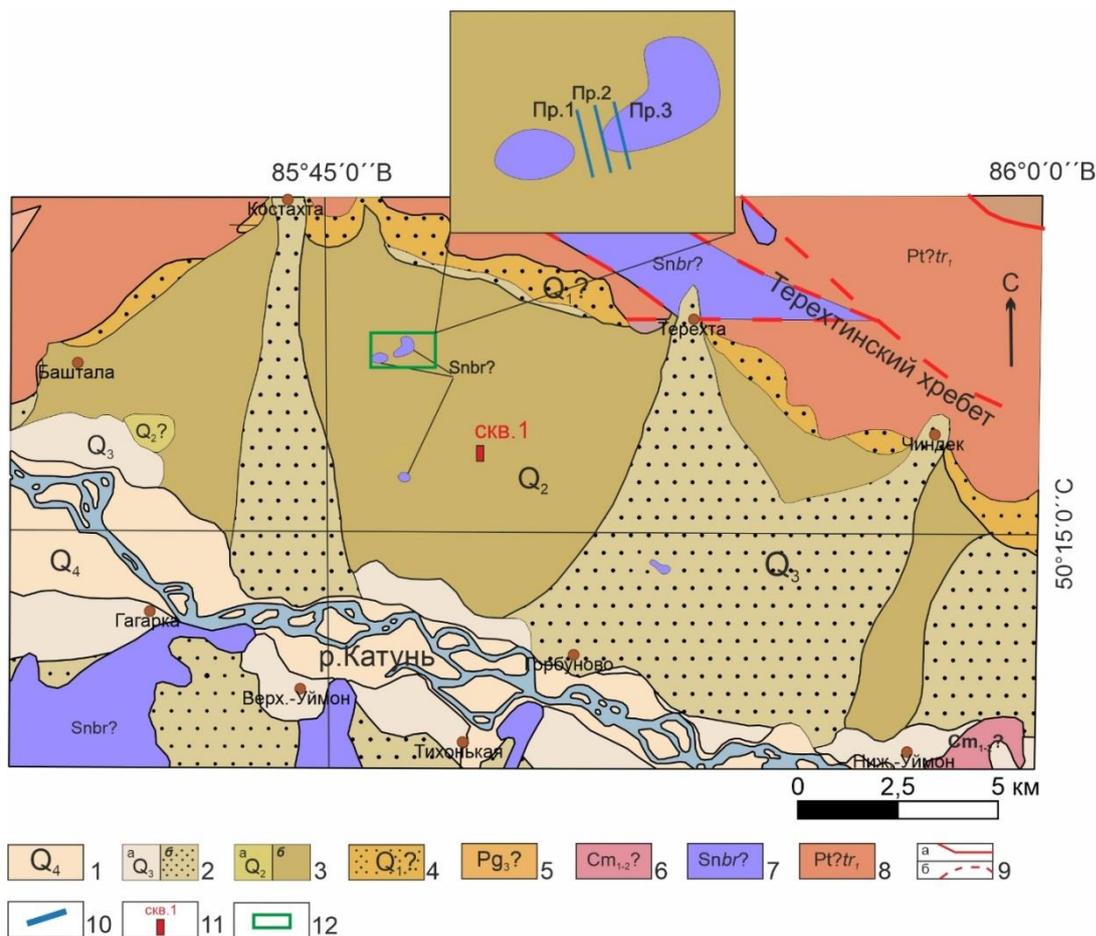


Рис. 1. Карта фактического материала исследуемого района. Карта построена с помощью программ QGIS и CorelDRAW<sup>2</sup>: 1 – современный отдел – аллювиальные галечники и пески; 2 – верхний отдел – ледниковые валунники и суглинки, водно-ледниковые галечники, аллювиальные галечники и пески, пролювиальные галечники, озерные галечники и гравийные суглинки (а – речные; б – делювиально-пролювиальные); 3 – средний отдел – ледниковые валунники, водно-ледниковые галечники и глины, аллювиальные галечники, пески и глины, озерные галечники, суглинки, пески (а – речные; б – озерно-болотные); 4 – нижний отдел (?) – делювиально-пролювиальные суглинки, глины, пески; 5 – палеогеновая система – Олигоцен (?), глины; 6 – кембрийская система – нижний-средний отделы (?), метаморфизованные порфириды, диабазовые порфириды, вариолиты и их туфы, филлиты, алевролиты, песчаники, кремнисто-глинистые сланцы; 7 – синий комплекс – баратальская (?) свита, метаморфизованные диабазы, порфириды и их туфы, кварц-полевошпатовые породы, метаморфизованные песчаники, метаморфические сланцы, мраморы, кварциты; 8 – протерозойская группа (?), теректинская свита, нижняя подсвита, метаморфические сланцы, сильно метаморфизованные песчаники, мраморы;

9 – тектонические контакты: а – достоверные; б – предполагаемые;

10 – профили электротомографии; 11 – скважина № 1; 12 – контур участка работ

Fig. 1. Map of the actual material of the study area. The map was built using the QGIS and CorelDRAW programs: 1 – modern department – alluvial pebbles and sands; 2 – upper section – glacial boulders and loams, water-glacial pebbles, alluvial pebbles and sands, proluvial pebbles, lake pebbles and gravel loams (a – river; b – deluvial-proluvial); 3 – middle section – glacial boulders, water-glacial pebbles and clays, alluvial pebbles, sands and clays, lake pebbles, loams, sands (a – river; b – lake-marsh); 4 – lower division (?) – deluvial-proluvial loams, clays, sands; 5 – Paleogene system – Oligocene (?), clays; 6 – Cambrian system – lower-middle sections (?), metamorphosed porphyrites, diabase porphyrites, variolites and their tuffs, phyllites, siltstones, sandstones, siliceous-clay shales; 7 – Blue complex – Baratalskaya (?) entourage, metamorphosed diabases, porphyrites and their tuffs, quartz-feldspar rocks, metamorphosed sandstones, metamorphic shales, marbles, quartzites; 8 – Proterozoic group (?) – Terehta formation, lower sub-formation. Metamorphic shales, highly metamorphosed sandstones, marbles; 9 – tectonic contacts: a – reliable; b – assumed; 10 – electrotomography profiles; 11 – well No. 1; 12 – outline of the work site

<sup>2</sup> Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200000. Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-ХIV. Горно-Алтайск: объяснительная записка / сост. Е. С. Левицкий, С. Н. Баженова, А. В. Борцова и др. М. : Недра, 1964. 79 с. ; Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200000 // Серия Горно-Алтайская. Лист М-45-ХIV (Усть-Кокса): Объяснительная записка / сост. О. М. Попова и др. М. : Московский филиал ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2019.

Таблица. Геологический разрез скважины № 1 [по данным из (Русанов и др., 2017)]  
Table. Geological section of well N 1 [based on (Rusanov et al., 2017)]

№ п/п	Описание пород	Индекс	Глубина подошвы слоя, м	Мощность слоя, м
1	Озерно-ледниковые (?) отложения: переслаивание глин, галечников, песков	lgQ <sub>III</sub>	23	23
2	Ледниковые, флювиогляциальные и аллювиальные (?) отложения нерасчлененные: переслаивание валунного галечника, гравия, валунника, песка	g, f, aQ <sub>II</sub>	207	184
3	Аллювиальные и пролювиальные (?) отложения башкауской свиты: переслаивание гравия, валунника, валунного галечника, песка, галечника	a, pQ <sub>II</sub> bs	297	90
4	Озерно-аллювиальные (?) отложения бекенской свиты: переслаивание глины, галечника, песка галечно-гравийного	laQ <sub>I</sub> bk	339	42
5	Озерные отложения туерькской свиты: алевроит, глина	N <sub>1-2</sub> tr	400	61

#### Методика, аппаратура и интерпретация данных электротомографии

С целью уточнения строения в зоне одного из выходов баратальской свиты в западной части впадины была выполнена съемка по трем профилям методом электротомографии (рис. 1). Электротомография – это современный метод электроразведки, который относится к методам сопротивлений. Для него разработана методика полевых наблюдений, а также технология обработки и интерпретации данных. Особенностью данного метода является использование многоэлектродной аппаратуры, в которой электрод может быть как питающим, так и приемным при многократных измерениях. Такая методика значительно увеличивает производительность и разрешающую способность исследований методом сопротивлений (Бобачев и др., 1995).

Полевые данные ЭТ в Уймонской впадине получены с использованием аппаратуры "Скала-48", корпус которой включает в себя генератор, измеритель (избирательный милливольтметр) и коммутатор на электромеханических реле<sup>3</sup> (Балков и др., 2012). В ходе измерений использовалась установка Шлюмберже, шаг между электродами составлял 5 м. Ориентация и расположение профилей выбрано таким образом, чтобы они проходили через выходы баратальской свиты и зону перехода от них к осадочному выполнению впадины. Квазитрехмерные измерения по системе профилей позволяют осуществить 3D инверсию. Длина каждого из профилей составляет 355 м, расстояние между ними выбрано в 100 м.

Многоэлектродный электроразведочный кабель (коса) разделяется на 2 сегмента. Для последовательного увеличения протяженности профиля используется нагоняющая расстановка сегментов этого кабеля. На рис. 2 приведен пример использования двух сегментов 24-электродного кабеля и "стрелочкой" обозначается перенос первого сегмента далее по профилю для продолжения измерений (Балков и др., 2012).

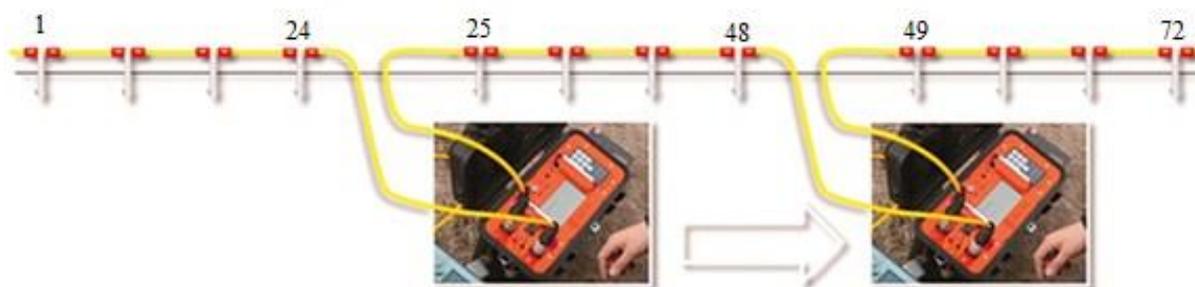


Рис. 2. Схема расположения двух сегментов 24-электродного электроразведочного кабеля и его подключение к станции (Балков и др., 2012)

Fig. 2. Layout of two segments of a 24-electrode electrical exploration cable and its connection to the station (Balkov et al., 2012)

<sup>3</sup> Техническое описание и инструкция по эксплуатации "Скала-48" – аппаратура электроразведочная многоэлектродная. 2013–2019.

Первичная обработка полевых данных производилась с помощью программы RiPPP. Данная программа позволяет отфильтровать данные, просмотреть таблицу с параметрами установки и соответствующее распределение кажущихся сопротивлений, проанализировать профильные диаграммы и псевдоразрез. Пример распределения кажущегося сопротивления для профиля № 3 представлен на рис. 3. Уровень значений разности потенциалов составляет более 40 мВ, сила тока в питающих линиях от 40 до 400 мА. Точность измерения напряжения – 1 %.

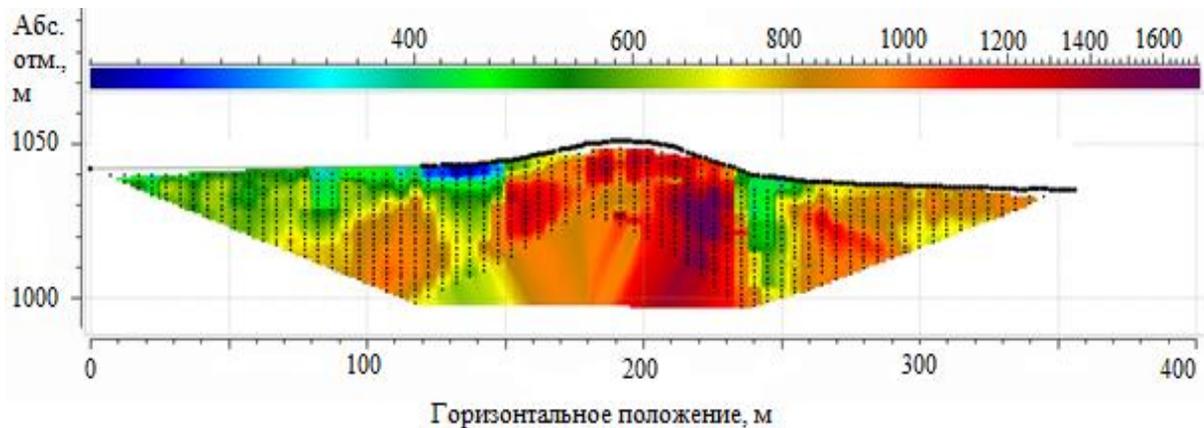


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления по профилю № 3  
Fig. 3. Section of apparent resistances according to profile N 3

Для двумерной и трехмерной инверсии использовался программный комплекс DiInSo, предназначенный для решения прямых 3D и обратных 2D/3D задач электротомографии (Версия 2.5 от 25.03.2022) (DiInSo, 2021). В процессе решения обратных задач (используется схема Гаусса – Ньютона) требуется построение сетки – треугольной в случае 2D и тетраэдральной – в случае 3D. Большинство функций и настроек в данной программе заданы и выполняются автоматически (в том числе генерация сетки), но есть удобная возможность их изменять в зависимости от поставленной задачи с целью получения наиболее приемлемого результата. Так, в нашем случае мы меняли параметр регуляризации, скорость роста ячеек с глубиной и ограничивали максимальный размер ячеек генерируемой сетки.

В работе подбирались следующие значения параметра регуляризации: 1, 20, 100, 500 и 1 000. При больших значениях параметра, таких как 500 и 1 000, геоэлектрические разрезы недостаточно контрастны и контуры аномалий излишне сглажены. Наиболее контрастный разрез наблюдается при использовании параметра регуляризации, равного 1, при этом контуры высокоомной аномалии сильно "изломаны". Оптимальные результаты были получены при использовании параметров регуляризации, равных 20 и 100 с невязками 7,76 и 10,43 % соответственно. Таким образом, в качестве компромиссного значения был выбран параметр регуляризации, равный 20. Также методом подбора выбрано максимальное значение роста ячеек, равное 100, которое позволяет сгенерировать достаточно густую сетку без больших затрат на объем оперативной памяти компьютера. Следует учитывать, что при измерениях по профилям наблюдаются существенные изменения рельефа, поэтому необходимо учитывать влияние топографии при расчете инверсии, что также можно указать в настройках данного ПО DiInso.

## Результаты и обсуждение

### Интерпретация полевых данных электротомографии

Геоэлектрические разрезы по профилям электротомографии № 1–3 получены по результатам 2D инверсии с помощью программы DiInSo (рис. 4).

По геологическим данным баратальская свита сложена метаморфическими породами, которые характеризуются повышенными значениями удельного электрического сопротивления (УЭС). В частности, по результатам интерпретации данных электротомографии УЭС свиты получено в интервале от 1 000 до 2 200 Ом·м и более (зелено-красная цветовая гамма). На всех трех геоэлектрических разрезах штриховой линией были выделены контуры высокоомных аномалий, которые характеризуют вертикальные срезы блока коренных пород. Вмещающие породы со значениями УЭС до 700 Ом·м (синяя цветовая гамма) до глубин 40 м, учитывая данные скважин и исходя из значений УЭС, можно отнести к озерно-ледниковым и ледниковым отложениям, представленным галечниками, переслаиванием валунного галечника, гравия, валунника и песка.

Следует отметить, что на выбранной площади наблюдается два выхода баратальской свиты на поверхность. На расстоянии примерно 230 м от начала профиля № 1 прослеживается аномалия высоких значений сопротивлений шириной около 50 м, ее верхняя кромка находится на глубине ~5 м. Расположение профиля № 1 и локализация высокоомной аномалии в совокупности с данными геологической карты позволяют сделать предположение о возможном наличии "перемычки" между двумя выходами блоков коренных пород, т. е. их можно рассматривать как единый объект. На геоэлектрическом разрезе по профилю № 2 также наблюдается область повышенных значений сопротивлений, расположенная на расстоянии 180 м от начала профиля, шириной ~100 м и с верхней кромкой на глубине в 6–7 м. На дневную поверхность исследуемый блок выходит только в области профиля № 3, что выражено и в рельефе. Ширина высокоомной аномалии быстро увеличивается с глубиной и составляет 110 м на отметке ~40 м.

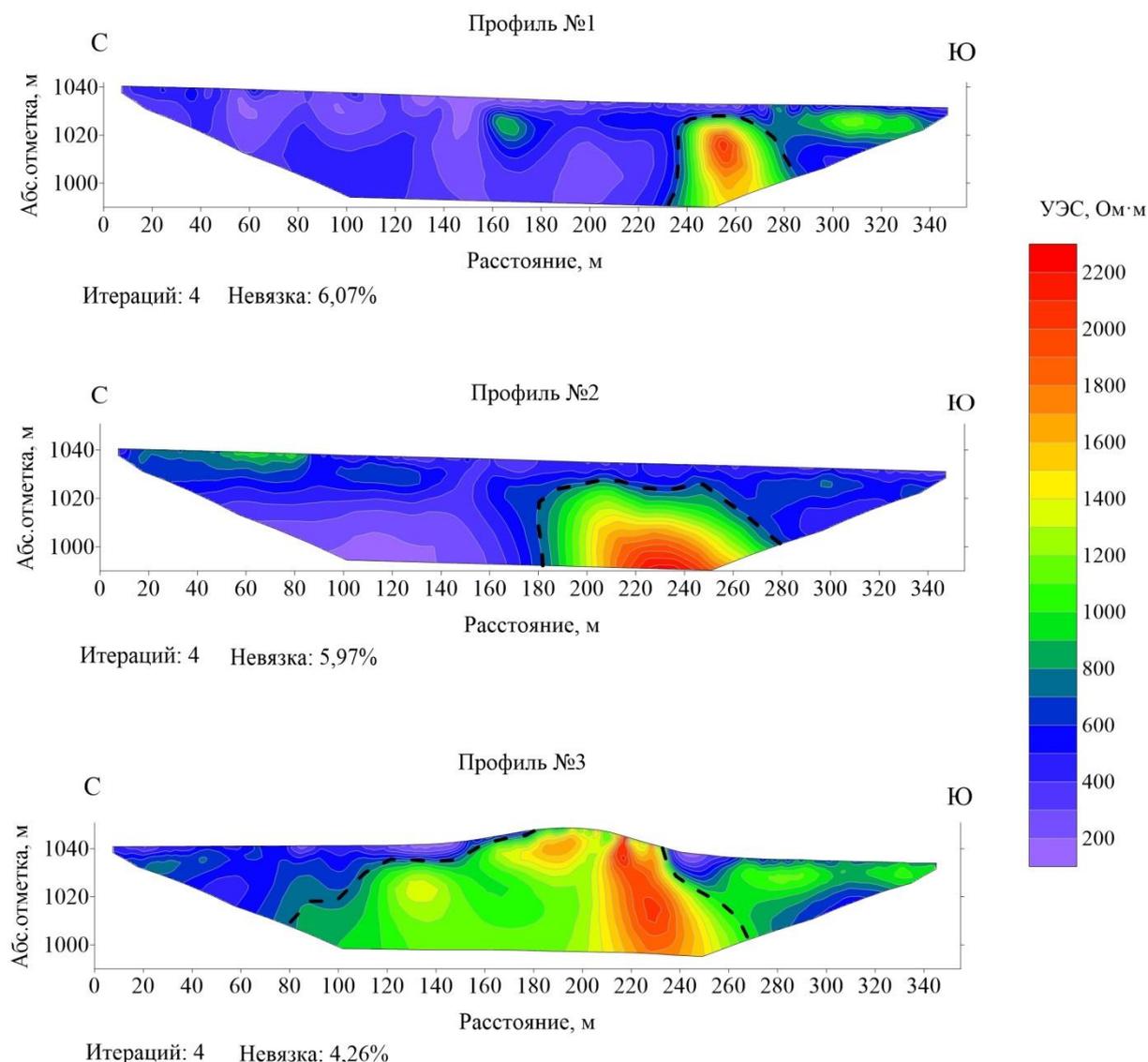


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы по профилям № 1–3 по результатам двумерной инверсии (предполагаемые контуры выходов пород баратальской свиты отмечены черной штриховой линией)

Fig. 4. Geoelectric sections along profiles N 1–3 based on the results of a two-dimensional inversion (the estimated contours of outcrops of rocks of the Baratal Formation are marked with a black dashed line)

Далее была произведена 3D инверсия квази-площадных данных ЭТ. На рис. 5 представлены вертикальные срезы по линиям трех профилей трехмерной модели.

Сравнивая разрезы 2D инверсии и вертикальные срезы, полученные по результатам 3D инверсии (рис. 4, 5), можно отметить, что высокоомные аномалии совпадают по форме, но отличаются по значениям УЭС. По результатам 3D инверсии УЭС ниже, чем на разрезах 2D инверсии. Данная закономерность встречается в различных ПО, вероятнее всего, это не связано с алгоритмом инверсии в той или иной

программе, а объясняется различной геометрией задач. Объем изучаемой среды в 3D случае больше, чем в 2D, поэтому результаты получаются более сглаженными. Таким образом, значения сопротивлений, характеризующие метаморфические породы баратальской свиты, будут находиться в диапазоне примерно от 800–850 Ом·м до >2 000 Ом·м. Глубины залегания кровли высокоомных аномалий на вертикальных срезах по профилям № 1, 2 больше (достигают 10–15 м), чем на геоэлектрических разрезах 2D инверсии, горизонтальные размеры аномалий практически идентичны. Разрезы, приведенные на рис. 4 и 5, представлены в одной цветовой шкале с целью более достоверного сопоставления результатов.

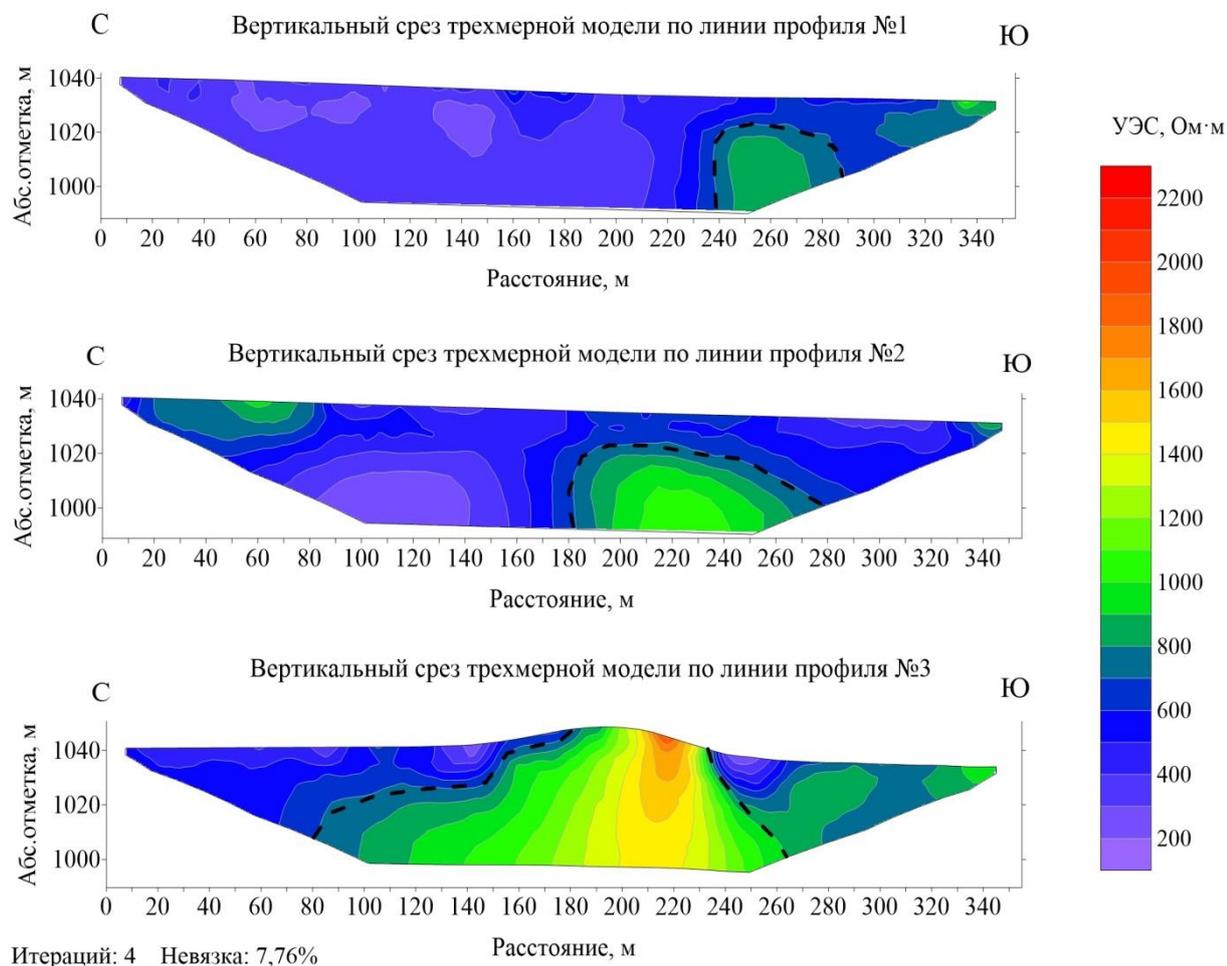


Рис. 5. Вертикальные срезы трехмерной модели по линиям профилей № 1–3

(предполагаемые контуры выходов пород баратальской свиты отмечены черной штриховой линией)

Fig. 5. Vertical sections of the 3D model along the lines of profiles N 1–3 (the estimated contours of the rock outcrops of the Baratal Formation are marked with a black dashed line)

Также по результатам 3D инверсии были построены горизонтальные срезы распределения УЭС на разных глубинах (рис. 6).

Анализируя горизонтальные срезы распределения УЭС на разных глубинах, можно сделать вывод, что на глубине 10 м в районе профилей № 1 и 2 не наблюдаются высокоомные аномалии (рис. 6). Продолжение блока коренных пород на глубину от непосредственного выхода на поверхность наблюдается на отметках глубин от 20 м и глубже. При интерпретации площадных данных стоит учитывать, что достаточно большое расстояние между профилями в 100 м может привести к проявлению ложных аномалий и к существенному сглаживанию результата. К наиболее информативным относятся срезы, полученные на глубинах 10, 20 и 30 м, так как на предельной глубине в 40 м для всех установок электротомографии объем данных существенно ограничен.

Трехмерная модель участка по результатам 3D инверсии представлена на рис. 7.

Основываясь на анализе представленных выше результатов, для выделения исследуемого объекта был выбран диапазон сопротивлений от 850 Ом·м до 2 000 Ом·м. Предположение о наличии "перемычки" между двумя соседними блоками выходов коренных пород подтверждается результатами трехмерной инверсии.

Достаточно массивный объем пород баратальской свиты выходит на поверхность вблизи профиля № 3, его кровля погружается в западном направлении, где в непосредственной близости от профиля № 1 наблюдается еще один выход этих пород. Для более точных выводов необходимо уменьшить шаг между профилями примерно в 2 раза. Также в южной части рис. 7 наблюдаются менее достоверные аномалии, связанные с большим шагом между профилями и, соответственно, недостатком полевых данных.

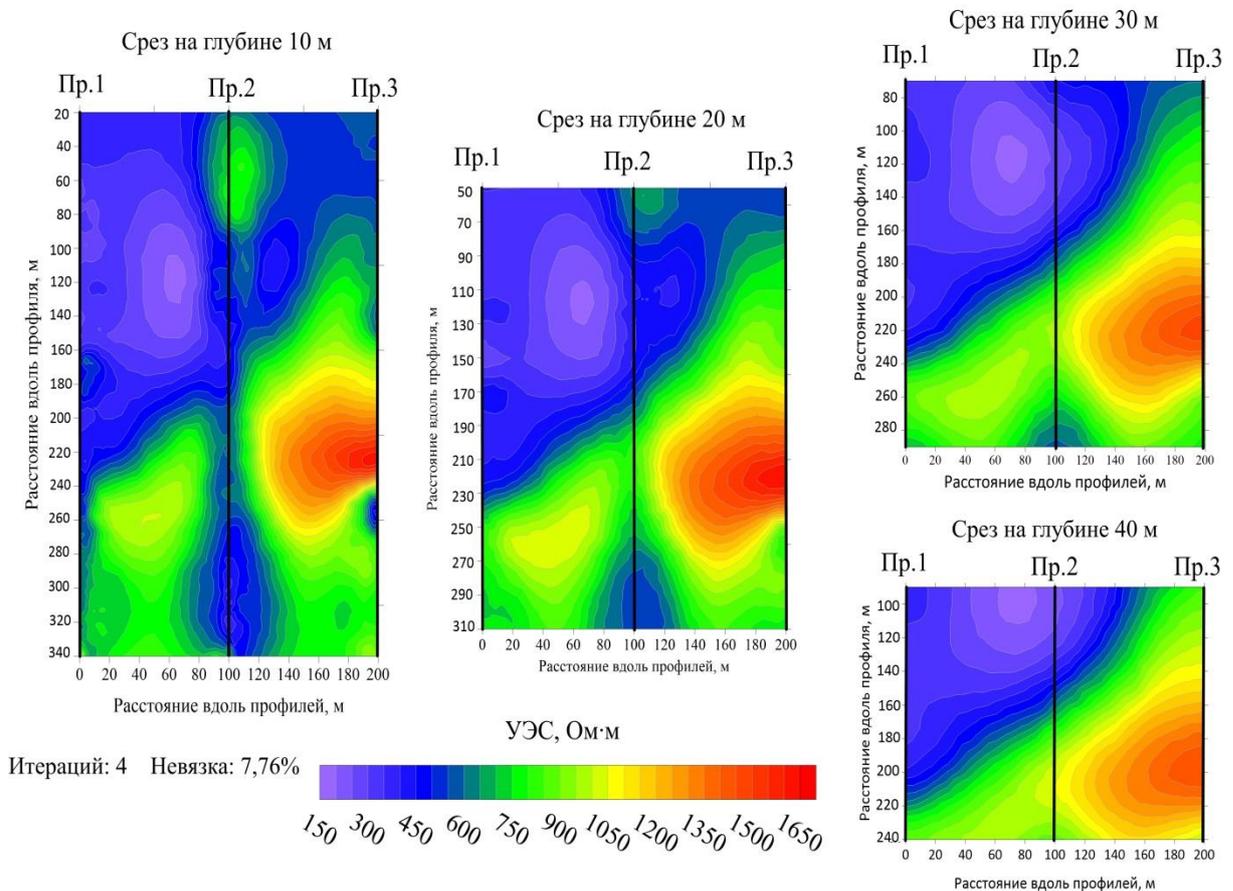


Рис. 6. УЭС на глубинах 10, 20, 30 и 40 м, построенные по результатам 3D инверсии  
 Fig. 6. Resistivity at depths of 10, 20, 30 and 40 m plotted based on the results of 3D inversion

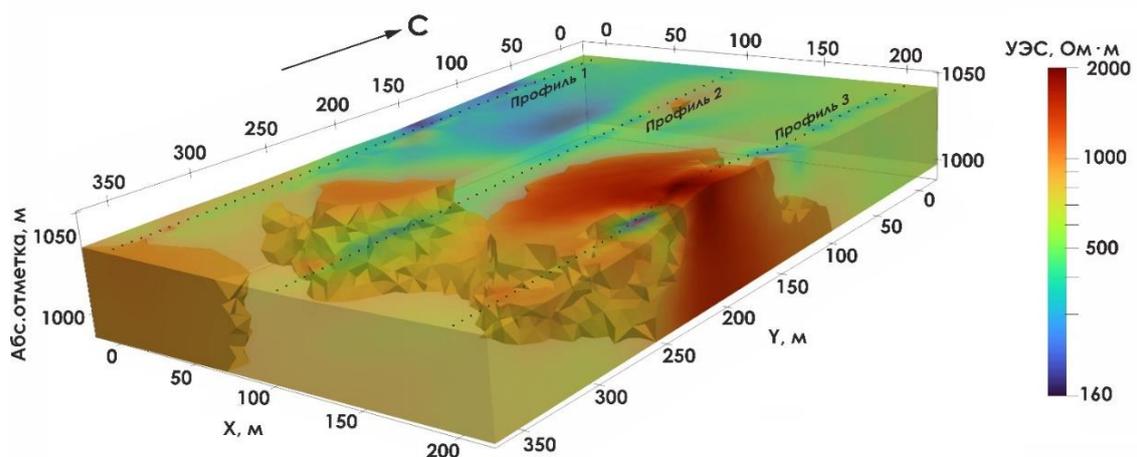


Рис. 7. Результат 3D инверсии площадных данных с выделенными структурами, предположительно приуроченными к породам баратальской свиты  
 Fig. 7. The result of 3D inversion of areal data with identified structures presumably confined to the rocks of the Baratal Formation

### Заключение

В полевой сезон 2022 г. в районе выходов на поверхность пород фундамента в Уймонской впадине были выполнены измерения методом электротомографии с целью определения их геоэлектрического строения.

По результатам интерпретации данных электротомографии с использованием программ двух-, трехмерной инверсии определено геоэлектрическое строение одного из выходов пород фундамента на дневную поверхность. Было установлено погружение исследуемого объекта в западном направлении в сторону расположенного в непосредственной близости соседнего выхода пород баратальской свиты меньших размеров. Таким образом, можно обоснованно предполагать, что эти два выхода соединяются на глубине 15–20 м и, скорее всего, являются одной структурой.

В полевом сезоне 2023 г. планируется продолжение исследований. Предполагается сгущение сети наблюдений путем уменьшения шага между профилями до 50 м; увеличение площади съемки в западном направлении. С целью верификации полученных моделей по результатам инверсии будет проведено численное трехмерное моделирование для сопоставления с полевыми данными. Кроме того, для уточнения строения зоны сочленения соседних выходов баратальской свиты будут выполнены вертикальные электрические зондирования в районе профиля № 1, с разносами установки, существенно превышающими максимальный разнос метода электротомографии для повышения глубинности исследования.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках темы НИР FWZZ-2022-0025 Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А., Манштейн А. К. [и др.]. Опыт применения электротомографии в геофизике // *Геофизика*. 2012. № 6. С. 54–63.
- Бобачев А. А., Марченко М. Н., Модин И. Н., Перваго Е. В. [и др.]. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // *Физика Земли*. 1995. № 12. С. 79–90.
- Деев Е. В. Зоны концентрации древних и исторических землетрясений Горного Алтая // *Физика Земли*. 2019. № 3. С. 71–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>. EDN: UBZWZT.
- Деев Е. В., Зольников И. Д., Гольцова С. В., Русанов Г. Г. [и др.]. Следы древних землетрясений в четвертичных отложениях межгорных впадин Центральной части Горного Алтая // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54, № 3. С. 410–423. EDN: PXLQVX.
- Деев Е. В., Зольников И. Д., Турова И. В. [и др.]. Палеоземлетрясения в Уймонской внутригорной впадине (Горный Алтай) // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59, № 4. С. 437–452. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20180402>. EDN: YWRNAO.
- Деев Е. В., Неведрова Н. Н., Русанов Г. Г., Санчаа А. М. [и др.]. Новые данные о строении Уймонской впадины (Горный Алтай) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2012. N 1. С. 15–23. EDN: OWCSOJ.
- Мариненко А. В. Программный комплекс DiInSo для решения прямых и обратных задач электротомографии в нестандартных постановках // *Инженерная и рудная геофизика 2020* : сб. тез. докладов 16 науч.-практ. конф., Пермь, 14–18 сентября 2020 г. Москва : ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ, 2020. С. 100. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>.
- Русанов Г. Г., Деев Е. В., Зольников И. Д., Хазин Л. Б. [и др.]. Опорный разрез неоген-четвертичных отложений в Уймонской впадине (Горный Алтай) // *Геология и геофизика*. 2017. Т. 58, № 8. С. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV.
- Санчаа А. М., Неведрова Н. Н., Бабушкин С. М. Строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным нестационарных электромагнитных зондирований // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2020. Т. 43, № 3. С. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: QJIRBG.
- DiInSo : программа для ЭВМ / А. В. Мариненко № 2021662035 ; заявл. 13.07.2021 ; опубл. 21.07.2021.

### References

- Balkov, E. V., Panin, G. L., Manstein, Yu. A., Manstein, A. K. et al. 2012. Electrotomography in Geophysics: Experience of application. *Geofizika*, 6, pp. 54–63. (In Russ.)
- Bobachev, A. A., Marchenko, M. N., Modin, I. N., Pervago, E. V. et al. 1995. New approaches to electrical sounding of horizontally inhomogeneous media. *Fizika zemli*, 12, pp. 79–90. (In Russ.)
- Deev, E. V. 2019. Zones of concentration of ancient and historical earthquakes of the Altai Mountains. *Fizika zemli*, 3, pp. 71–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019371-96>. EDN: UBZWZT. (In Russ.)

- Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Goltsova, S. V., Rusanov, G. G. et al. 2013. Traces of ancient earthquakes in quaternary deposits of intermountain depressions of the Central part of the Altai Mountains. *Russian Geology and Geophysics*, 54(3), pp. 410–423. EDN: PXLQVX. (In Russ.)
- Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Turova, I. V. et al. 2018. Paleozoic earthquakes in the Uymon intragonal depression (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 59(4), pp. 437–452. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20180402>. EDN: YWRNAO. (In Russ.)
- Deev, E. V., Nevedrova, N. N., Rusanov, G. G., Sanchaa, A. M. et al. 2012. New data on the structure of the Uymon depression (Gorny Altai). *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 1, pp. 15–23. EDN: OWCSOJ. (In Russ.)
- Marinenko, A. V. 2020. DiInSo software package for solving direct and inverse problems of electrotomography in non-standard formulations. Coll. of articles *Engineering and Ore Geophysics 2020*. Perm, September 14–18, 2020, pp. 100. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051125>. (In Russ.)
- Rusanov, G. G., Deev, E. V., Zolnikov, I. D., Khazin, L. B. et al. 2017. Reference section of Neogene-quaternary deposits in the Uimon depression (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics*, 58(8), pp. 1220–1233. DOI: <https://doi.org/10.15372/gig20170809>. EDN: ZFHWTV. (In Russ.)
- Sanchaa, A. M., Nevedrova, N. N., Babushkin, S. M. 2020. The structure of the Uymon depression according to nonstationary electromagnetic sounding data. *Geology and mineral resources of Siberia*, 43(3), pp. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-3-66-76>. EDN: JQJRBG. (In Russ.)
- DiInSo: Certificate of state registration of a computer program. Marinenko A. V. N 2021662035; application 13.07.2021; publ. 21.07.2021.

### Сведения об авторах

**Кузина Зоя Ярославовна** – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, инженер; e-mail: [z.kuzina@g.nsu.ru](mailto:z.kuzina@g.nsu.ru)

**Zoia Ya. Kuzina** – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Engineer; e-mail: [z.kuzina@g.nsu.ru](mailto:z.kuzina@g.nsu.ru)

**Неведрова Нина Николаевна** – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, д-р геол.-минерал. наук, гл. науч. сотрудник; e-mail: [NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru](mailto:NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

**Nina N. Nevedrova** – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Dr Sci. (Geology & Miner.), Chief Researcher; e-mail: [NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru](mailto:NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3210-5248>

**Санчаа Айдиса Михайловна** – пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [SanchaaAM@ipgg.sbras.ru](mailto:SanchaaAM@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

**Aydisa M. Sanchaa** – 3 Academician Koptyuga Ave., Novosibirsk, Russia, 630090; The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Leading Researcher; e-mail: [SanchaaAM@ipgg.sbras.ru](mailto:SanchaaAM@ipgg.sbras.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4523-6661>

УДК 622.02

## Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера

Н. Н. Кузнецов\*, Л. Ю. Кондрашов

\*Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: n.kuznecov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 05.04.2023;

получена после доработки 02.05.2023;

принята к публикации 10.05.2023

Ключевые слова:

удароопасность, горные породы, критерий Кайзера, хрупкость, одноосное сжатие, одноосное растяжение

При переходе горных работ на большие глубины ухудшаются горно-геологические условия на рудниках за счет изменения напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и их структурной нарушенности. В таких условиях необходимо проводить оценку удароопасности руд и пород, слагающих отработываемые месторождения. Для оперативного выполнения подобной оценки предложено использовать критерий Кайзера, заключающийся в анализе экспериментальных данных, полученных на образцах пород. В работе представлены результаты лабораторных испытаний образцов горных пород месторождений Хибинского массива при одноосном сжатии и растяжении. Определены значения их коэффициентов хрупкости. Показана возможность применения критерия Кайзера для предварительной оценки потенциала удароопасности пород. Установлено, что высоким потенциалом удароопасности обладают мельтейгит пятнисто-трахитоидный и ийолит-мельтейгит трахитоидный, у пятнистой апатит-нефелиновой руды такой потенциал отсутствует. Выполнено сравнение полученных результатов оценки удароопасности скальных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера, а также критерию Горного института КНЦ РАН и критерию А. Н. Ставрогина. Можно отметить, что критерий Кайзера позволяет достаточно просто выполнять предварительную оценку удароопасности пород с учетом результатов испытаний образцов на стандартных прессах. Однако для увеличения степени достоверности полученных данных их необходимо заверять по критерию Горного института КНЦ РАН или критерию А. Н. Ставрогина.

Для цитирования

Кузнецов Н. Н. и др. Оценка потенциала удароопасности горных пород месторождений Хибинского массива по критерию Кайзера. *Вестник МГТУ*. 2023. Т. 26, № 2. С. 170–179. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179>.

## Rockburst hazard potential assessment of rocks of the Khibiny massif deposits according to the Kaiser criterion

Nikolai N. Kuznetsov\*, Leonid Yu. Kondrashov

\*Mining Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: n.kuznecov@ksc.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>

Article info

Received 05.04.2023;

received in revised form 02.05.2023;

accepted 10.05.2023

Key words:

rockburst hazard, rocks, Kaiser criterion, brittleness, uniaxial compression, uniaxial tension

Abstract

The mining and geological conditions in the mines worsen due to changes in the stress-strain state of rock masses and their structural disturbance when mining goes to great depths. Under such conditions, it is necessary to assess the impact hazard of ores and rocks that make up the mined deposits. For the prompt implementation of such an assessment, it is proposed to use the Kaiser criterion consisting in the analysis of experimental data obtained on rock samples. The paper presents the results of laboratory testing of rock samples from the deposits of the Khibiny massif under uniaxial compression and tension. The values of their brittleness coefficients have been determined. The possibility of using the Kaiser criterion for a preliminary assessment of rock burst hazard potential has been shown. It has been established that spotty-trachytoid melteigite and trachytoid ijolite-melteigite have a high potential for impact hazard, while spotted apatite-nepheline ore does not have such a potential. A comparison has been made of the obtained results of rockburst hazard assessment of hard rocks from the Khibiny massif deposits according to the Kaiser criterion, as well as the criterion of the Mining Institute of the KSC RAS and the criterion of A. N. Stavrogin. It can be noted that the Kaiser criterion makes it quite easy to carry out a preliminary assessment of rock burst hazard based on the results of testing samples on standard presses. However, to increase the degree of reliability of the data obtained, they must be certified according to the criterion of the Mining Institute of the KSC RAS or the criterion of A. N. Stavrogin.

For citation

Kuznetsov, N. N. et al. 2023. Rockburst hazard potential assessment of rocks of the Khibiny massif deposits according to the Kaiser criterion. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 170–179. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-170-179>.

## Введение

Современные тенденции ведения подземных горных работ обуславливают их переход на большие глубины (Мельников и др., 2013; Каплунов и др., 2015; Айнбиндер и др., 2020). В таких условиях характерно увеличение гравитационной составляющей поля действующих в массиве горных пород напряжений, а также изменение структурной нарушенности пород (Ставрогин и др., 1992; Неверов, 2012; Закалинский и др., 2022; Козырев и др., 2022). В результате горно-геологические условия на рудниках резко ухудшаются.

Подобная ситуация наблюдается и для условий апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива (Мурманская область, Россия), отработка которых осуществляется подземным способом (Козырев и др., 2005; Лукичев и др., 2019). При этом дополнительным фактором, усложняющим процесс отработки месторождений, является действие высоких тектонических напряжений. По своей величине такие напряжения превышают гравитационные в несколько раз, что, в свою очередь, создает опасность возникновения динамических разрушений в массиве пород.

На данный момент существуют методические рекомендации, в соответствии с которыми необходимо выделять потенциально опасные участки массива, где динамические разрушения наиболее вероятны<sup>1</sup>. Для этого следует выполнять оценку удароопасности (склонности к динамическому разрушению) руд и вмещающих пород, слагающих отработываемое месторождение.

Существует достаточно много подходов, позволяющих выполнять оценку удароопасности пород (Ставрогин и др., 1985; Singh, 1988; Tarasov, 2010; Cai et al., 2018; Кузнецов и др., 2021). Но очень часто исследователи ограничены возможностями испытательных установок, сроками на проведение исследований и количеством каменного материала. В связи с этим назревает необходимость применять подход, позволяющий оперативно выполнять оценку удароопасности пород.

В качестве одного из таких подходов предложен критерий, разработанный канадским ученым Кайзером (Cai et al., 2018). Сущность этого критерия заключается в определении потенциала удароопасности пород с учетом значений их прочности при сжатии и коэффициента хрупкости. Для его реализации достаточно выполнения испытаний образцов пород на стандартных прессах и по стандартным методикам, что обуславливает его простоту и оперативность.

Критерий Кайзера был успешно применен исследователями (Бирючев и др., 2020) для оценки потенциала удароопасности андезитов Новоширокинского полиметаллического месторождения (Забайкальский край, Россия). В результате образцы этой породы были разделены на две группы: имеющие и не имеющие потенциал удароопасности, что может быть использовано при районировании шахтных полей рудников по склонности к горным ударам. Основываясь на положительном опыте применения критерия Кайзера, поставлена задача оценки потенциала удароопасности горных пород апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива на основании данного критерия.

## Материалы и методы

Для проведения исследований отобран керн четырнадцати разновидностей скальных горных пород месторождений Хибинского массива: ийолитов, уртитов, хибинитов, лявочорритов, мельтейгитов, ювитов и апатит-нефелиновой руды. Диаметр отобранного керна в среднем составил 61 мм. Для испытаний при одноосном сжатии образцы горных пород изготавливали с соотношением размеров высоты к диаметру 2 : 1, а для одноосного растяжения такое соотношение составило 1 : 1. Количество изготовленных образцов для каждой разновидности породы было не менее 6 шт.

Нагружение образцов в условиях одноосного сжатия выполняли на сервогидравлической установке MTS 816 (рис. 1) с постоянной скоростью 2,5 МПа/с. По результатам испытаний регистрировали значения разрушающей нагрузки и рассчитывали значения пределов прочности при сжатии образцов по ГОСТ 21153.2-84<sup>2</sup>.

Испытания образцов при одноосном растяжении также выполняли на сервогидравлической установке MTS 816, используя специальное приспособление (рис. 2) для разрушения образцов диаметральным сжатием (сжатием по образующим). Скорость постоянного нагружения задана равной 1,5 МПа/с. На основании полученных в ходе экспериментальных исследований данных рассчитывали значения пределов прочности при растяжении образцов горных пород по ГОСТ 21153.3-85<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216. 2016. 52 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии: межгосударственный стандарт. М., 1984. 8 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении: государственный стандарт Союза ССР. М., 1985. 18 с.



Рис. 1. Испытание образца горной породы при одноосном сжатии  
Fig. 1. Rock sample testing under uniaxial compression



Рис. 2. Испытание образца горной породы при одноосном растяжении  
Fig. 2. Rock sample testing under uniaxial tension

Оценку потенциала удароопасности горных пород выполняли с использованием критерия Кайзера (Cai et al., 2018). Он заключается в анализе данных, полученных в результате испытаний образцов горных пород при одноосном сжатии и растяжении (Cai et al., 2018). Так, значение предела прочности при сжатии горных пород может характеризовать их потенциальную энергию деформирования, накопленную к моменту разрушения. Коэффициент хрупкости, выражаемый как отношение прочности при сжатии к прочности при растяжении образцов, является показателем потенциала скалывания пород в результате отрыва (Бирючев и др., 2020).

В итоге Кайзером была представлена взаимосвязь между значениями прочности пород и их коэффициентом хрупкости в виде диаграммы на рис. 3.

Согласно представленной диаграмме (рис. 3) в случае, если значение функциональной зависимости предела прочности при сжатии пород от коэффициента хрупкости будет расположено в области, выделенной зеленым цветом, то у породы будет низкий потенциал удароопасности. Если значение попадает в желтую область, то у породы будет средний потенциал удароопасности. Оранжевая область – высокий потенциал, а красная – очень высокий потенциал удароопасности.

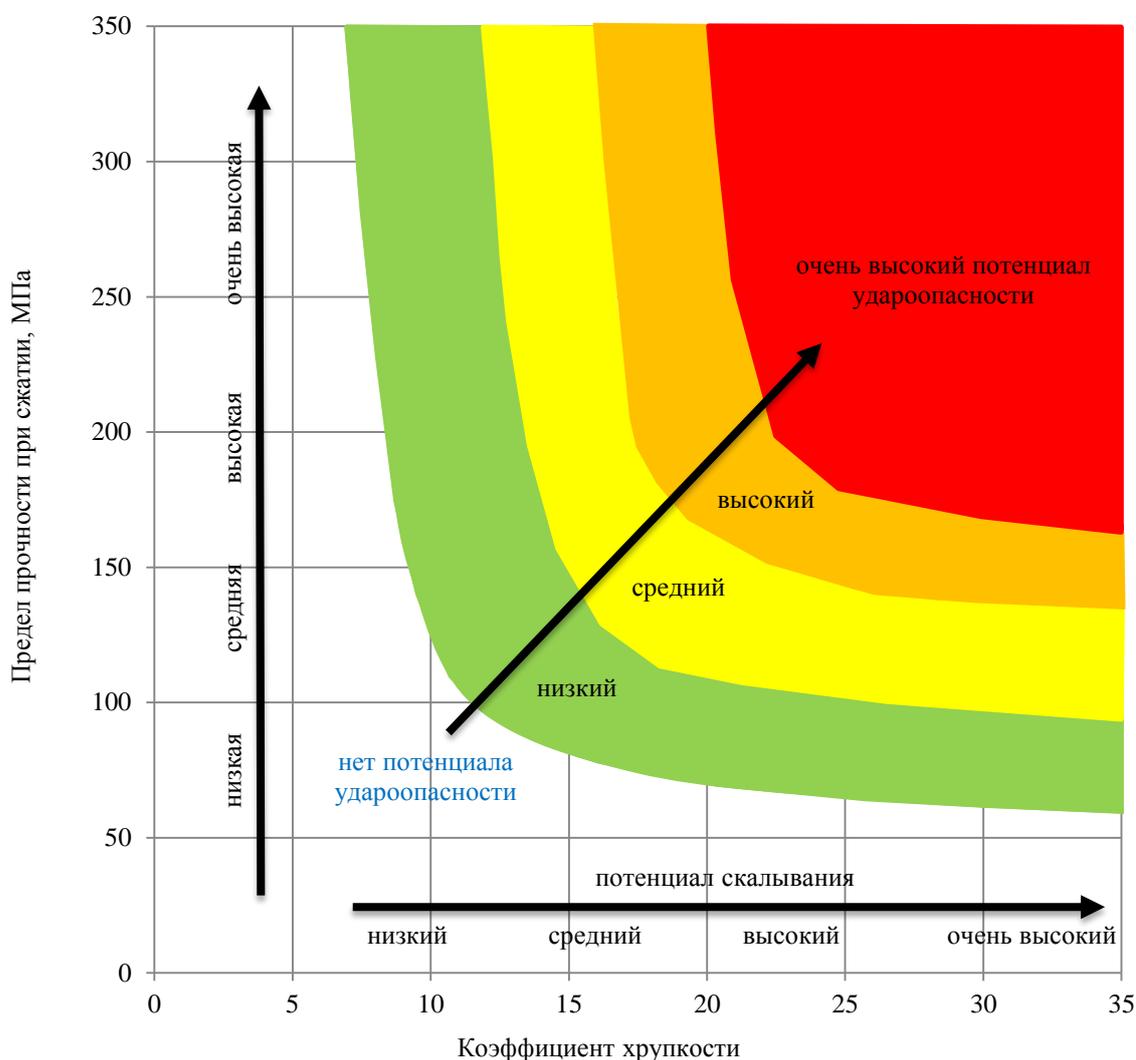


Рис. 3. Диаграмма для оценки потенциала удароопасности пород по критерию Кайзера (Cai et al., 2018)

Fig. 3. Diagram for assessing the rockburst potential of rocks according to the Kaiser criterion (Cai et al., 2018)

При ведении горных работ на месторождениях, сложенных породами с высоким и очень высоким потенциалом удароопасности, а также при наличии высоких напряжений, возможны динамические проявления горного давления в виде горных ударов и техногенных землетрясений.

При отсутствии потенциала удароопасности у пород (значения расположены ниже уровня "низкий потенциал удароопасности" на диаграмме) возможность динамических разрушений маловероятна.

### Результаты и обсуждение

На основании выполненных экспериментальных исследований определены прочностные свойства скальных горных пород месторождений Хибинского массива. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Установлено, что наибольшие значения пределов прочности при сжатии (свыше 200 МПа) соответствуют мельтейгиту пятнисто-трахитоидному и ийолит-мельтейгиту трахитоидному. Разрушение образцов этих пород происходило в ярко выраженной динамической форме с разлетом осколков и взрывоподобным звуком. Наименьшее значение предела прочности при сжатии определено для пятнистой апатит-нефелиновой руды. Образцы этой породы разрушались без динамических проявлений с образованием трещин вдоль действия приложенной нагрузки. Все остальные породы разрушались в динамической форме.

Наибольшие значения пределов прочности при растяжении (свыше 10 МПа) выявлены для ийолита трахитоидного и хибинита, а наименьшие (ниже 3 МПа) – для пятнистой апатит-нефелиновой руды, рудной брекчия и ийолит-уртит нечетко-трахитоидного.

Таблица 1. Усредненные значения физико-механических свойств исследуемых скальных горных пород месторождений Хибинского массива  
Table 1. Averaged values of physical and mechanical properties of the studied hard rocks of the Khibiny massif deposits

Номер	Наименование горной породы	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Коэффициент хрупкости
1	Уртит массивный	138	7,7	19
2	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	99	3,5	29
3	Уртит нечетко-трахитоидный	120	4,6	31
4	Мельтейгит пятнисто-трахитоидный	231	8,1	29
5	Ийолит-мельтейгит трахитоидный	202	6,6	31
6	Ийолит трахитоидный	179	10,3	18
7	Ийолит линзовидный	160	4,4	36
8	Пятнистая апатит-нефелиновая руда	53	2,6	24
9	Хибинит	117	11,1	12
10	Лявочоррит	112	6,2	19
11	Рудная брекчия	120	2,7	45
12	Ювит	136	4,2	37
13	Ийолит-уртит нечетко-трахитоидный	69	2,8	26
14	Ийолит слюдяной	111	8,4	14

Согласно полученным данным (табл. 1) интересным является тот факт, что наиболее прочные породы, такие как мельтейгит и ийолит-мельтейгит, имеют не самые высокие значения коэффициента хрупкости. Хотя именно для этих пород характерно интенсивное динамическое разрушение. Тем не менее наибольшее значение коэффициента хрупкости соответствует рудной брекчии, разрушение которой происходило также в динамической форме, но менее бурно в сравнении с прочным мельтейгитом. В связи с этим можно предположить, что не всегда высокие значения коэффициента хрупкости однозначно характеризуют степень (потенциал) удароопасности пород. Отсюда и возникает дополнительный учет значений пределов прочности при сжатии горных пород, что отражено в критерии Кайзера.

Для оценки потенциала удароопасности исследуемых скальных горных пород полученные на образцах данные представлены в виде зависимости на диаграмме (рис. 4).

Из рис. 4 следует, что потенциал удароопасности исследуемых горных пород изменяется от полного его отсутствия до очень высокого. Разброс полученных значений для пород в пределах одной геологической разности объясняется их высокой природной изменчивостью, в связи с чем коэффициенты вариации значений пределов прочности при сжатии и коэффициентов хрупкости могут достигать 30 %. Чтобы полученные результаты имели более четкое представление, выполнен анализ процентного соотношения образцов на каждом из участков диаграммы (рис. 4). В итоге получена следующая гистограмма (рис. 5).

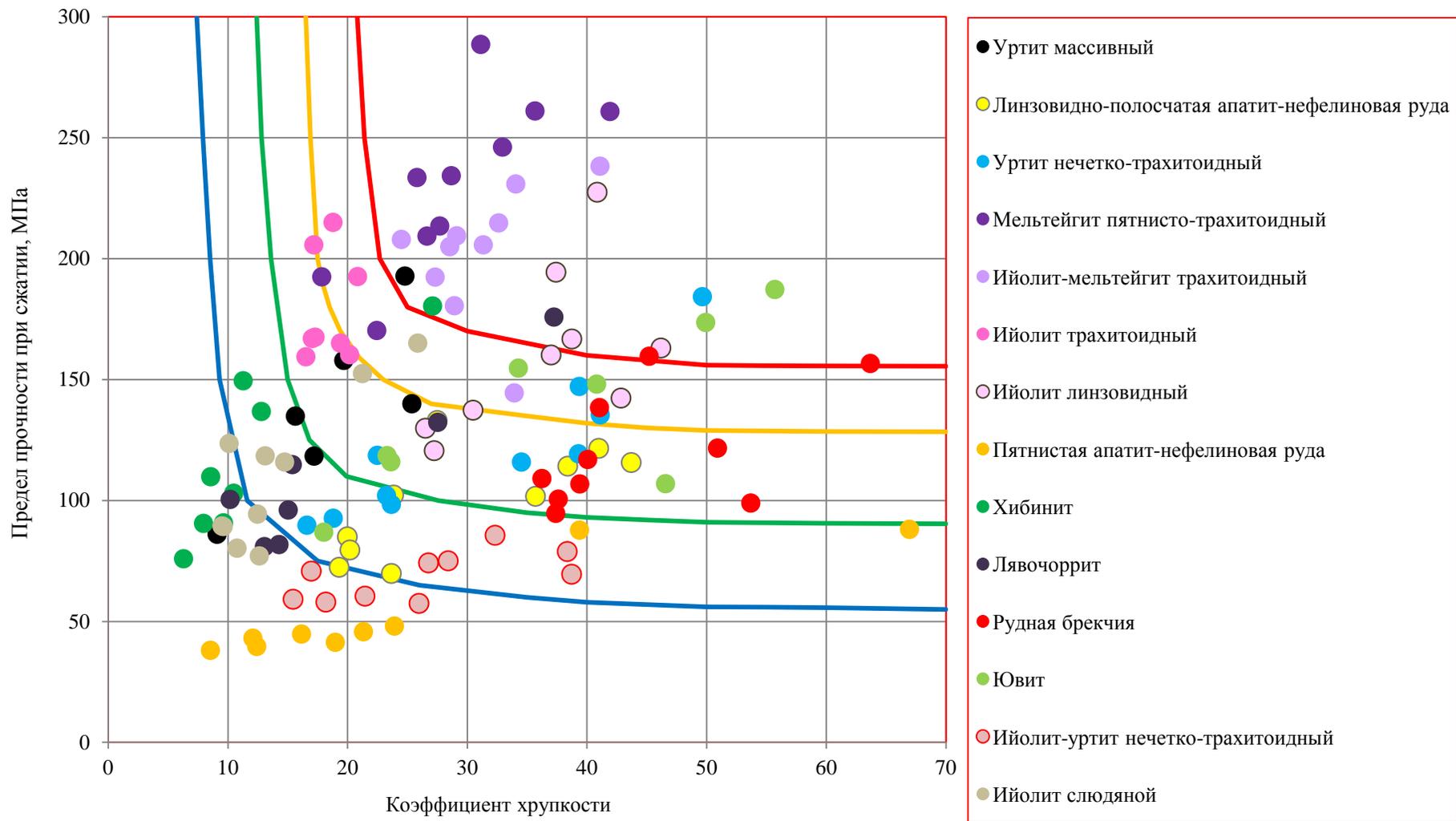


Рис. 4. Диаграмма для оценки потенциала удароопасности исследуемых скальных горных пород в зависимости от значений их пределов прочности при сжатии и коэффициентов хрупкости  
 Fig. 4. Diagram for assessing the rockburst hazard potential of the studied hard rock depending on the values of their compressive strength and brittleness coefficients

Согласно представленной гистограмме (рис. 5) видно, что у 22 % исследованных образцов отсутствует потенциал удароопасности, а у 23 % потенциал удароопасности очень высокий. Суммарно получаем, что 78 % образцов являются потенциально удароопасными. Эти данные отражают специфику апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива, где большая часть пород склонна к разрушению в динамической форме.

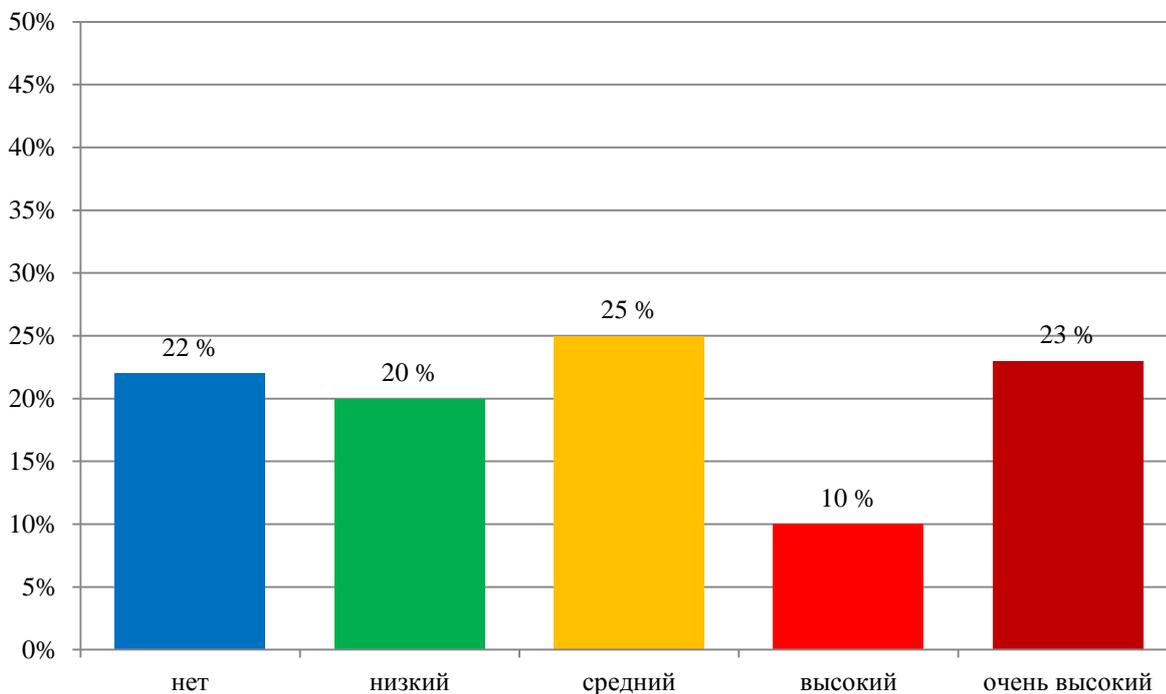


Рис. 5. Потенциал удароопасности образцов исследуемых скальных горных пород месторождений Хибинского массива

Fig. 5. Rockburst hazard potential of the studied hard rocks of the Khibiny massif deposits

С целью более детального изучения, какие породы будут представлять наибольшую опасность, выполнен дополнительный анализ полученных данных. Для этого значения пределов прочности и коэффициентов хрупкости усредняли по породам и наносили на диаграмму Кайзера. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты оценки потенциала удароопасности исследуемых скальных горных пород месторождений Хибинского массива

Table 2. The results of assessing the rockburst hazard potential of the studied hard rocks of the Khibiny massif deposits

Номер	Наименование горной породы	Потенциал удароопасности
1	Уртит массивный	средний
2	Линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда	средний
3	Уртит нечетко-трахитоидный	средний
4	Мельтейгит пятнисто-трахитоидный	очень высокий
5	Ийолит-мельтейгит трахитоидный	очень высокий
6	Ийолит трахитоидный	средний
7	Ийолит линзовидный	высокий
8	Пятнистая апатит-нефелиновая руда	нет
9	Хибинит	низкий
10	Лявочоррит	низкий
11	Рудная брекчия	средний
12	Ювит	высокий
13	Ийолит-уртит нечетко-трахитоидный	низкий
14	Ийолит слюдяной	низкий

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что очень высоким потенциалом удароопасности обладают самые прочные породы – мельтейгит пятнисто-трахитоидный и ийолит-мельтейгит трахитоидный. Именно эти породы могут быть наиболее опасными по динамическим проявлениям горного давления. Для пятнистой апатит-нефелиновой руды установлено, что у нее отсутствует потенциал удароопасности. Эта руда является богатой – содержание апатита достигает 70 %, ее структура является преимущественно средне-крупнозернистой. Разрушение образцов пятнистой руды при одноосном сжатии происходило без динамических проявлений, что может быть напрямую связано с ее структурой. При ведении горных работ в участках массива с такой породой динамические разрушения маловероятны. Для остальных исследуемых пород преобладающими являются низкий (хибиниты, лывочорриты, слабые ийолиты) и средний (уртиты, прочная апатит-нефелиновая руда) потенциалы удароопасности.

Проведенными ранее исследованиями (*Козырев и др., 2019*) с использованием критерия Горного института КНЦ РАН (*Кузнецов и др., 2021*) и критерия А. Н. Ставрогина (*Ставрогин и др., 1985*) установлено, что уртиты и апатит-нефелиновая руда являются удароопасными породами. По критерию Кайзера этим породам соответствует средний потенциал удароопасности. Таким образом, полученные результаты во всех трех случаях совпали, что подтверждает возможность применения критерия Кайзера для оценки потенциала удароопасности.

### **Заключение**

В результате экспериментальных исследований образцов четырнадцати разновидностей скальных горных пород месторождений Хибинского массива определены их основные физико-механические свойства – пределы прочности при сжатии и растяжении, а также рассчитаны значения их коэффициентов хрупкости.

С использованием критерия Кайзера установлено, что у 22 % изученных образцов скальных пород отсутствует потенциал удароопасности, а остальные 78 % являются потенциально удароопасными, что подтверждает склонность к динамическому разрушению большей части пород месторождений Хибинского массива.

Выявлено, что очень высоким потенциалом удароопасности обладают мельтейгит пятнисто-трахитоидный и ийолит-мельтейгит трахитоидный. При ведении горных работ необходимо выделять участки с такими породами и выполнять комплекс мер для предупреждения динамических проявлений горного давления, в частности горных ударов. Также установлено, что у пятнистой апатит-нефелиновой руды отсутствует потенциал удароопасности.

Выполнен сравнительный анализ результатов оценки удароопасности пород по критерию Кайзера, а также критериям Горного института КНЦ РАН и А. Н. Ставрогина. Установлено, что уртиты и линзовидно-полосчатая апатит-нефелиновая руда являются удароопасными во всех случаях.

Принимая во внимание полученные данные, следует отметить, что породы с потенциалом удароопасности от низкого до очень высокого по критерию Кайзера будут являться удароопасными по терминологии, представленной в "Методических рекомендациях по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам"<sup>4</sup>.

В целом, критерий Кайзера позволяет достаточно просто выполнять предварительную оценку удароопасности пород с учетом результатов испытаний образцов на стандартных прессах. В этом, безусловно, заключается его преимущество. Однако для увеличения степени достоверности полученных результатов их необходимо заверять по критерию Горного института КНЦ РАН или критерию А. Н. Ставрогина.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Айнбиндер И. И., Овчаренко О. В. Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников "Интернациональный" и "Мир" // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 11. С. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69>. EDN: DZEGXI.
- Бирючев И. В., Макаров А. Б., Усов А. А. Геомеханическая модель рудника. Часть 2. Использование // Горный журнал. 2020. № 2. С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04>.
- Закалинский В. М., Мингазов Р. Я., Шиповский И. Е. Влияние горно-технологических факторов на буровзрывные работы при разработке месторождений на большой глубине // Проблемы недропользования. 2022. № 2(33). С. 46–54. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.046. EDN: DFORLC.

<sup>4</sup> Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 года № 216. 2016. 52 с.

- Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Геотехнологические и геомеханические особенности перехода от открытых к подземным работам на больших глубинах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S56. С. 67–79. EDN: VGHNMF.
- Козырев А. А., Кузнецов Н. Н., Федотова Ю. В., Шоков А. Н. Определение степени удароопасности скальных горных пород по результатам испытаний при одноосном сжатии // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>. EDN: IEYJRS.
- Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н. Геомеханические исследования и обоснования при ведении горных работ на Кольском полуострове // Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе: сб. ст. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. С. 122–131.
- Козырев А. А., Семенова И. Э., Жукова С. А., Журавлева О. Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии // Горная промышленность. 2022. № 6. С. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>. EDN: FRJSKU.
- Кузнецов Н. Н., Козырев А. А., Каспарьян Э. В., Земцовский А. В. [и др.]. Методика определения склонности скальных горных пород к разрушениям в динамической форме (хрупкому разрушению) по результатам лабораторных испытаний образцов. Апатиты: КНЦ РАН, 2021. 20 с.
- Лукичев С. В., Козырев А. А., Семенова И. Э., Белгородцев О. В. [и др.]. Научное обоснование перспективной отработки апатит-нефелиновых руд на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 11, № 2. С. 5–12. DOI: [10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.5-12](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.5-12). EDN: MNVPZM.
- Мельников Н. Н., Козырев А. А., Лукичев С. В. Большие глубины – новые технологии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 4(15). С. 58–66. EDN: SATWHD.
- Неверов С. А. Напряженное состояние массива горных пород с ростом глубины залегания месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 2(90). С. 3–7. EDN: OXWNGV.
- Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.
- Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. М.: Недра, 1985. 271 с.
- Cai M., Kaiser P. K. Rockburst support. Reference book. MIRARCO – Laurentian University, 2018. Vol. I: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
- Singh S. P. Burst energy release index // Rock Mechanics and Rock Engineering. 1988. Vol. 21. P. 149–155. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01043119>.
- Tarasov B. G. Superbrittleness of rocks at high confining pressure // Deep Mining: Proceedings of the Fifth International Seminar on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 2010. P. 119–134. DOI: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/1074\\_08](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/1074_08).

## References

- Ajnbinder, I. I., Ovcharenko, O. V. 2020. Features of the geomechanical state of the rock mass at the deep horizons of the mines "Internatsionalny" and "Mir". *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 11, pp. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69>. EDN: DZEGXI. (In Russ.)
- Biryuchev, I. V., Makarov, A. B., Usov, A. A. 2020. Geomechanical model of the mine. Part 2. Use. *Gornyi Zhurnal*, 2, pp. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.02.04>. (In Russ.)
- Zakalinskij, V. M., Mingazov, R. Ya., Shipovskij, I. E. 2022. Influence of mining and technological factors on drilling and blasting in the development of deposits at great depth. *Problems of Subsoil Use*, 2(33), pp. 46–54. DOI: [10.25635/2313-1586.2022.02.046](https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.02.046). EDN: DFORLC. (In Russ.)
- Kaplunov, D. R., Ryl'nikova, M. V. 2015. Geotechnological and geomechanical features of the transition from open to underground work at great depths. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, S56, pp. 67–79. EDN: VGHNMF. (In Russ.)
- Kozyrev, A. A., Kuznetcov, N. N., Fedotova, Yu. V., Shokov, A. N. 2019. Determination of the degree of rockburst hazard of hard rocks based on the results of tests under uniaxial compression. *Minerals and Mining Engineering*, 6, pp. 41–50. DOI: <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-6-41-50>. EDN: IEYJRS. (In Russ.)
- Kozyrev, A. A., Panin, V. I., Savchenko, S. N. 2005. Geomechanical studies and justifications for mining operations on the Kola Peninsula. In coll. articles *Formation of the foundations of a modern strategy for nature management in the Euro-Arctic region*. Apatity, pp. 122–131. (In Russ.)
- Kozyrev, A. A., Semenova, I. E., Zhukova, S. A., Zhuravleva, O. G. 2022. Factors of changes in the seismic regime and localization of hazardous zones under large-scale technogenic impact. *Russian Mining Industry*, 6, pp. 95–102. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>. EDN: FRJSKU. (In Russ.)
- Kuznetcov, N. N., Kozyrev, A. A., Kaspar'jan, E. V., Zemcovskij, A. V. et al. 2021. Method for determining the propensity of hard rocks to fracture in a dynamic form (brittle fracture) based on the results of laboratory testing of samples. Apatity. (In Russ.)

- Lukichev, S. V., Kozyrev, A. A., Semenova, I. E., Belogorodtcev, O. V. et al. 2019. Scientific justification for the prospective mining of apatite-nepheline ores at great depths in difficult mining and geological conditions. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 11(2), pp. 5–12. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.2.5-12. EDN: MNVPZM. (In Russ.)
- Mel'nikov, N. N., Kozyrev, A. A., Lukichev, S. V. 2013. Great depths – new technologies. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 4(15), pp. 58–66. EDN: SATWHD. (In Russ.)
- Neverov, S. A. 2012. Stress state of a rock mass with increasing depth of deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2(90), pp. 3–7. EDN: OXWNGV. (In Russ.)
- Stavrogin, A. N., Protosenya, A. G. 1992. Mechanics of deformation and destruction of rocks. Moscow. (In Russ.)
- Stavrogin, A. N., Protosenya, A. G. 1985. Strength of rocks and stability of mine workings at great depths. Moscow. (In Russ.)
- Cai, M., Kaiser, P. K. 2018. Rockburst support. Reference book. MIRARCO – Laurentian University, Vol. I: Rockburst Phenomenon and Support Characteristics. 284 p.
- Singh, S. P. 1988. Burst energy release index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21, pp. 149–155. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf01043119>.
- Tarasov, B. G. 2010. Superbrittleness of rocks at high confining pressure. *Deep Mining: Proceedings of the Fifth Intern. Seminar on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 119–134. DOI: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/1074\\_08](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/1074_08).

#### Сведения об авторах

**Кузнецов Николай Николаевич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник;  
e-mail: [n.kuznecov@ksc.ru](mailto:n.kuznecov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>

**Nikolai N. Kuznetsov** – 24 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher;  
e-mail: [n.kuznecov@ksc.ru](mailto:n.kuznecov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0624-4351>

**Кондрашов Леонид Юрьевич** – ул. Лесная, 29, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Апатитский филиал Мурманского арктического государственного университета, студент;  
e-mail: [19lion97@mail.ru](mailto:19lion97@mail.ru)

**Leonid Yu. Kondrashov** – 29 Lesnaya Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Apatity Branch of Murmansk Arctic State University, Student; e-mail: [19lion97@mail.ru](mailto:19lion97@mail.ru)

УДК 5536433(470.21)

## Реконструкция условий формирования красноцветных песчаников Терского берега на основе сравнительного анализа структуры древних и современных отложений (Кольский полуостров)

Ю. Н. Нерадовский

Геологический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: [iu.neradovskij@yandex.ru](mailto:iu.neradovskij@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2400-0403>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 30.03.2023;  
получена после доработки 10.05.2023;  
принята к публикации 11.05.2023

Ключевые слова:

Побережье Белого моря, красноцветные песчаники, условия образования, рифей

Для цитирования

В статье приведены результаты изучения рифейских красноцветных песчаников Терского берега Белого моря. Рассмотрен 21 структурный элемент, характеризующий условия образования пород, в том числе 15 древних и 6 современных отложений. Наблюдения проводились в течение 10 лет на двух участках побережья Белого моря. Цель исследований состояла в установлении причин отсутствия органики, происхождения примеси гематита в песчаниках рифея и оценке климатических условий при их образовании. Эти вопросы являются ключевыми для выделения протерозойской красноцветной формации. Данные показали, что некоторые структуры пород аналогичны в древних и современных отложениях. К таким структурам относятся, например, волновая рябь, которая в деталях повторяет размерность, форму и ориентацию в обеих эпохах, поэтому может быть использована для оценки древних морских условий осадконакопления. Однако большая часть структур свидетельствует о принципиальных различиях условий образования пород. Установлено, что в древних породах систематически образовывались такыры и осаждался гематит, что свидетельствует о засушливом климате в рифее и специфическом составе морской воды. Наиболее важным отличием древних отложений является отсутствие в них фауны и флоры.

Нерадовский Ю. Н. Реконструкция условий формирования красноцветных песчаников Терского берега на основе сравнительного анализа структуры древних и современных отложений (Кольский полуостров). Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 180–190. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190>.

## Reconstruction of the conditions for the formation of red-colored sandstones of the Tersky coast based on a comparative analysis of the structure of ancient and modern deposits (Kola Peninsula)

Yury N. Neradovsky

Geological Institute KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: [iu.neradovskij@yandex.ru](mailto:iu.neradovskij@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2400-0403>

Article info

Abstract

Received 30.03.2023;  
received in revised form 10.05.2023;  
accepted 11.05.2023

Key words:

coast of the White Sea, red sandstones, formation conditions, Riphean

The paper presents the results of studying the Riphean red-colored sandstones of the Tersky coast of the White Sea. 21 structural elements characterizing the conditions of rock formation have been considered, including 15 ancient and 6 modern deposits. Observations were carried out for 10 years in two areas of the White Sea coast. The purpose of the research is to establish the reasons for the absence of organic matter, the origin of the hematite admixture in the Riphean sandstones, and to assess the climatic conditions during their formation. These issues are key to identifying the Proterozoic red formation. The data have shown that some rock structures are similar in ancient and modern deposits. Such structures include, for example, wave ripples repeating in detail the dimension, shape, and orientation in both epochs, and therefore can be used to assess ancient marine sedimentation conditions. However, most of the structures testify to fundamental differences in the conditions of rock formation. It has been established that takyr were systematically formed in ancient rocks and hematite was deposited, which indicates the arid climate in the Riphean and the specific composition of sea water. The most important difference between ancient deposits is the absence of fauna and flora in them.

For citation

Neradovsky, Yu. N. 2023. Reconstruction of the conditions for the formation of red-colored sandstones of the Tersky coast based on a comparative analysis of the structure of ancient and modern deposits (Kola Peninsula). *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 180–190. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-180-190>.

## Введение

На южном берегу Кольского полуострова, на площади около 600 км<sup>2</sup>, распространены древние осадочные породы – красноцветные песчаники терской свиты<sup>1</sup>. Они тянутся непрерывно от Турьего мыса до р. Варзуга 150 км, полосой около 20 км. В минеральном составе песчаников преобладают: кварц, полевые шпаты, мусковит; примеси: гранат, биотит, гематит и др.<sup>2</sup> Размеры зерен варьируют от 0,05 до 5 мм, но резко преобладает фракция 0,05–0,25 мм, составляющая 80–95 % (Сафьянов и др., 2012). В верхних частях разрезов песчаников присутствуют прослои глинистых пород аргиллитов и алевролитов (Зозуля и др., 2021). Песчаники длительное время подвергаются морской абразии и в рельефе побережья образуют несколько террас высотой от 4–5 м до 45–55 м (Романенко и др., 2021). Продукты их разрушения являются источником формирования донных отложений Белого моря и представляют интерес в отношении поисков кварца, алмазов и других минералов. На большей части территории распространения отложения терской свиты трансгрессивно перекрывают различные породы архея, имеют в основании базальные конгломераты и характеризуются сходными структурами и условиями образования, соответствующими докембрийской красноцветной формации верхнего протерозоя (Анатолева, 1978; Балуев, 2013). Точный возраст пород терской свиты не установлен и по разным данным колеблется от 1 300 до 670 млн лет (Балуев и др., 2018). В связи с этим не точно определено время формирования и крупных геологических структур Беломорья (Романенко и др., 2021; Асминг и др., 2022). Все это обуславливает необходимость продолжения исследований условий образования рифейских пород, а также палеоклиматических и физических факторов, способствовавших вымиранию органической жизни.

## Объекты и методы

В качестве объектов исследований нами выбраны два участка литорали на побережье Белого моря. Первый располагается в нескольких километрах западнее устья р. Варзуги (локация 66.28326; 36.48634). Здесь представлена каменная литораль, коренные обнажения красноцветных песчаников выходят на поверхность размыва на большой площади в широком мелководном заливе, который с двух сторон ограничен мысами, не имеет притока пресных вод, а породы регулярно подвергаются морскому приливно-отливному процессу абразии. Горизонтальное залегание пород способствует равномерному размыву песчаников морскими волнами. При этом процесс выноса продуктов разрушения превалирует, и накопления современных отложений не наблюдается.

Второй участок находится между селами Оленица и Кашкаранцы (локация 66.393404; 35.500960). В отличие от первого здесь нет коренных выходов пород, мелководная литораль сложена широкими песчаными косами, заливаемыми в прилив морем. На песчаных отмелях создаются условия для формирования обширных полей современной ряби. Предположительно на данном участке происходит замедленный снос и накопление осадочного материала. Оба участка изобилуют многочисленной, типичной для литорали Белого моря флорой и фауной.

Исследования проводились периодически в летне-осеннее время в течение 10 лет (2012–2022 гг.). Они заключались в изучении и фотодокументации обнажений древних и современных песчаников, минерального состава, структур и текстур, условий их образования, интерпретации наблюдаемых находок, относящихся непосредственно к песчаникам и заселяющим их представителям флоры и фауны. Работа носила преимущественно накопительный фактурный характер, поскольку спектр интересных неизученных вопросов был достаточно широким. Особенно следует подчеркнуть необходимость продолжения углубленного изучения минерального состава песчаников, в частности, формы и распределения в них гематита.

## Результаты исследований

Результаты исследований рассмотрены по двум направлениям, отражающим разновозрастные события: 1) структуры и текстуры красноцветных песчаников и особенности их формирования в рифейское время и 2) структуры и текстуры песчаников и условия их формирования в настоящее время.

### *Структуры и текстуры красноцветных песчаников и особенности их формирования в рифейское время*

В красноцветных песчаниках, образованных в рифейское время, нам удалось выделить 15 структур и текстур и три генетических группы процессов. Первая группа включает формирование: слоистости, ряби волнения, такыров, косой слоистости, внутриформационной слоистости и оползневой складчатости. Эти процессы несут информацию непосредственно о генетических условиях седиментации пород. Вторая группа

---

<sup>1</sup> Геологическая карта Кольского региона. 2001. Ред. Ф. П. Митрофанов.

<sup>2</sup> Геология СССР. Том XXVII. Мурманская область. Гос. науч.-техн. изд-во литературы по геологии и охране недр, Москва, 1958. 714 с.

включает формирование трещиноватости, "сухих" брекчий, волноприбойных котлов и ниш. Они отражают наложение тектонических и абразионных процессов, изменяющее структуру песчаников без привноса новых минеральных растворов и изменения минерального состава отложений. Третья группа процессов включает: оглеение, формирование трубок взрыва, штокверков с кварцевой, аметистовой, флюоритовой, баритовой минерализацией и жилы с гематитом. Этот комплекс минеральных ассоциаций сопровождается магматической и гидротермальной деятельностью с привносом нового вещества и изменением структуры и состава песчаников.

*Слоистость* является основным свойством песчаников. Она выражена в полосчатой текстуре, видимой в поперечном срезе, и характеризуется изменением размеров частиц зерен, мощности и цвета прослоев (рис. 1, *а*). Слоистость определяет способность песчаников раскалываться на пластины. По нашим данным обычно мощности раскалывания пластов варьируют в пределах 10–40 мм, реже до 0,5 м. Поверхность скола часто совпадает с плоскостью, по которой развиты знаки ряби (рис. 1, *б*) или трещины усыхания (рис. 1, *в*). В грубозернистых песчаниках наблюдается косая слоистость, резкое изменение мощности слоев, их выклинивание. Такие явления типичны для речных долин и конусов выноса.

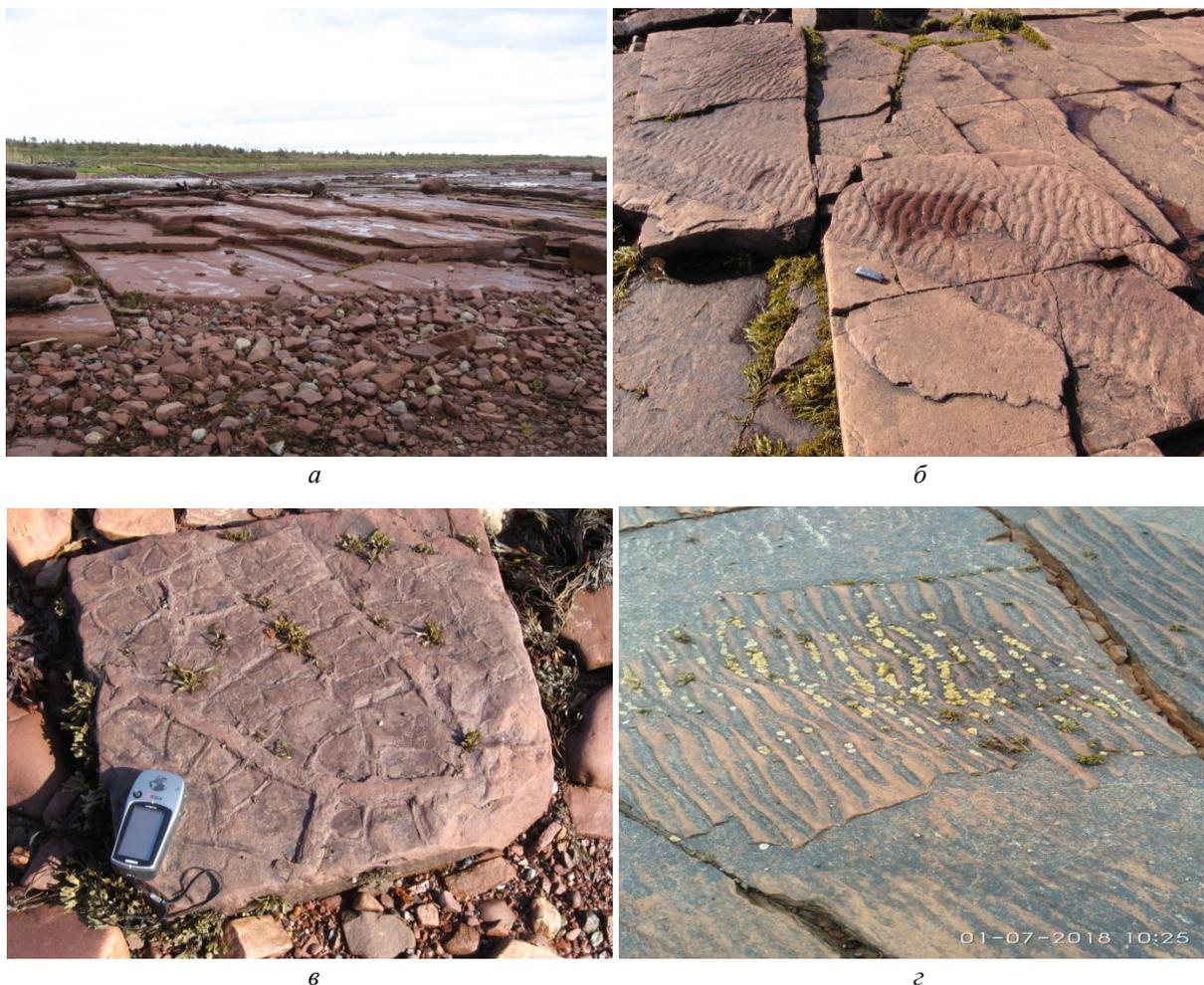


Рис. 1. Особенности строения рифейских песчаников: *а* – слоистость; *б* – рябь волнения; *в* – пленка гематита (черное) покрывает рябь волнения; *г* – трещины усыхания. Фото автора  
 Fig. 1. Features of the structure of the Riphean sandstones: *a* – layering; *b* – ripples of excitement; *v* – a film of hematite (black) covers the wave ripples; *z* – shrinkage cracks. Photo by the author

*Рябь волнения* – фундаментальный генетический факт, запечатленный в песчаниках, бесспорно доказывающий, что процесс отложения происходил в водной среде. Рябь распространена широко и видна на поверхности скола песчаников по слоистости (рис. 1, *б*). Свежие плоскости скола с рябью обычно покрыты тонкой пленкой гематита (рис. 1, *в*). Эта пленка, во-первых, является признаком осаждения гематита на поверхности ряби, а во-вторых, одним из факторов ослабления сцепления между слоями, поэтому сколы по слоям происходят часто по волновой ряби. Рябь разнообразна по формам и размерам, характеризуется

субпараллельными симметричными, сложно ветвящимися валиками затвердевшего песка, разделенными ложбинками. Ориентировка гребней ряби в основном параллельна береговой линии. Размеры валиков ряби составляют от 2–3 до 5 см. Размеры ложбинок близки ширине валиков, но нередко ложбинки отсутствуют. Осадочный материал между гребнями ряби тонкозернистый, обогащен гематитом, имеет темный цвет (рис. 1, в). Он отлагался позднее гребней. При выветривании межгребневый материал легче разрушается, чем гребни, поэтому в обнажениях обычно сохраняются гребни ряби (рис. 1, б).

*Трещины усыхания*, подобно ряби, систематически обнажаются в изломах песчаников по слоистости. Они чередуются со знаками ряби в разных слоях (рис. 1, з), встречаются реже, но количественно соотношение не изучено. По структуре трещины усыхания имеют много общего с современными такырами. Это типичные структуры для жаркого климата, образующиеся при высыхании отложений глин, солей и др. в мелководных озерах и заболоченных низинах во многих южных районах мира. В процессе высыхания водоемов происходит сжатие (контракция) и растрескивание глинистых пород. Ширина и глубина трещин зависит от состава и мощности субстрата. В образцах изученного участка ширина трещин усыхания в основном около 5 мм, но достигает 2–3 см, т. е. мощность илистого слоя могла составлять от 5 мм до 3 см. В современных условиях структуры усыхания образуются в засуху, а трещины "заполняются" после окончания засухи. Этот период характеризуется обычно ливневыми дождями и переносом грубозернистых частиц, которые и заполняют такыры. В современных климатических условиях такыры на беломорском берегу не образуются.

*Трещиноватость* в песчаниках проявляется повсеместно с разной интенсивностью. На участке с коренными выходами в песчаниках развиты сколы трех направлений: два вертикальных и одно горизонтальное, секущих песчаники в виде кирпичной кладки. Эти три системы трещин – "сухие", никакой минерализации и сдвигов по этим трещинам не отмечается (рис. 1, а, б).

Кроме трещин скола в песчаниках наблюдаются *зоны брекчирования* (рис. 2, а). Они имеют субгоризонтальную ориентировку, но не совпадают с трещинами скола. Вдоль зон брекчирования наблюдается интенсивное дробление пород. Результатом дробления является образование различных псевдоконгломератов, брекчий и оригинальных частиц из обломков ряби и трещин усыхания, в зависимости от того какой слой песчаника пересекает зона брекчии. Наиболее распространены брекчии из межгребневого материала ряби, хорошо видимые по черному гематитовому цвету (рис. 2, б). Частицы конгломерата похожи на органические остатки – "створки" (рис. 2, в) и обломки "раковин", "коконы" и т. п. Интересны брекчии по трещинам усыхания (рис. 2, з). Они похожи на червей, у которых "кожа" – оболочка из гематита, а внутри песок. В условиях деформации "черви" дробятся на мелкие кусочки. Такие образования вызывают серьезные дискуссии (Балуев, 2013), однако они не имеют ничего общего с живыми организмами.

В целом о брекчировании следует отметить, что оно также, как и трещины, происходило в "сухих" условиях, без привноса какой-либо новой минерализации. Это указывает на то, что гидротермальные растворы в этот период отсутствовали.

*Внутриформационная слоистость и складки оползания*. Горизонтальная слоистость в песчаниках местами срезается внутриформационной слоистостью и складками оползания (рис. 3). В отличие от косой слоистости внутриформационная слоистость образовалась в результате тектонического сдвига и изменения наклона части слоев песчаников. Новые слои практически без размыва ложились на новую наклонную поверхность (рис. 3, а). Строение таких косых слоев свидетельствует о резком изменении залегания подстилающих песчаников, по которым происходило напластование и частичное смещение мелкозернистого неконсолидированного песка. Новые слои характеризуются менее четкой слоистостью, уменьшением размеров частиц и смятием в сложные складки (турбулентностью) (рис. 3, б). Такие формы имеют небольшое распространение и относятся к подводно-оползневым деформациям, например, в прирусловых каналах рек и ручьев.

*Выветривание* песчаников под воздействием атмосферных факторов – естественный процесс – происходит постоянно с различной скоростью в соответствии с прочностью их составных частей. Разрушение однородных слоев вначале происходит по трещинам на мелкие обломки, которые затем истираются в прибойной полосе (рис. 1, а). Неоднородные слои выветриваются в зависимости от состава: слабые – мелкозернистые – породы разрушаются быстрее, с образованием пор выветривания, более прочные – крупнозернистые – разрушаются медленнее и образуют рельефные поверхности.

*Волноприбойная абразия* песчаников на исследованном участке проявлена слабо, в виде небольших площадок отшлифованных волнами коренных пород (рис. 4). Типичное воздействие волноприбойного механизма на песчаники наблюдается на небольшом участке побережья, где характерны максимальные прибойные волны. Здесь встречаются небольшие котлы и ниши.

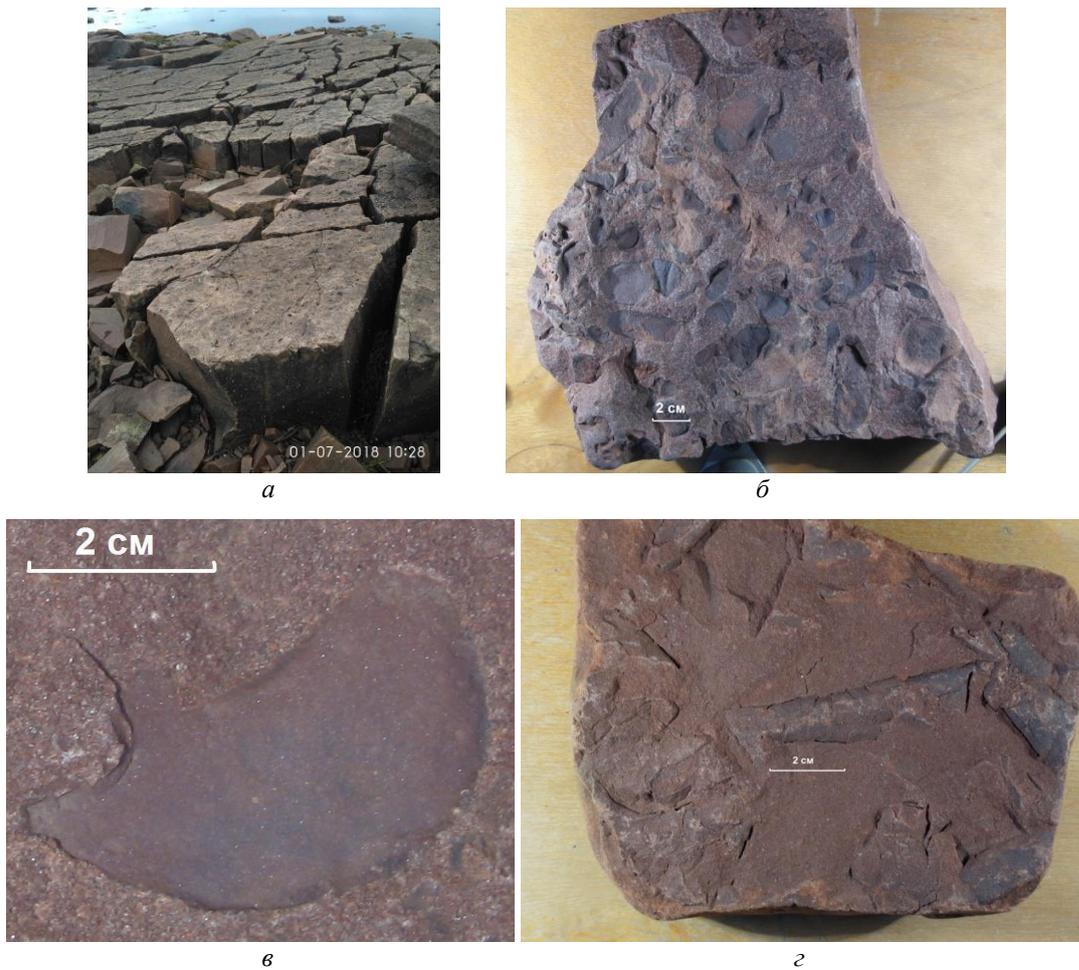


Рис. 2. Вид зоны брекчирования и некоторые формы дробления в ней: *а* – сложная система трещиноватости вдоль зоны брекчирования; *б* – брекчия обломков из межгребневого обогащенного гематитом компонента (черное) ряби; *в* – пластинка гематита в виде створки раковины; *г* – брекчия из раздробленных фрагментов трещин усыхания в виде "червей" в гематитовых оболочках. Фото автора

Fig. 2. View of the brecciation zone and some forms of crushing in it:  
*a* – a complex system of fracturing along the brecciation zone; *б* – breccia of fragments from the inter-ridge hematite-enriched component (black) of the ripple; *в* – a plate of hematite in the form of a shell leaf; *г* – breccia from crushed fragments of drying cracks in the form of "worms" in hematite shells. Photo by the author



Рис. 3. Красноцветные песчаники: *а* – внутриформационная слоистость; *б* – складки оползания. Фото автора

Fig. 3. Red sandstones: *a* – intraformational bedding; *б* – folds. Photo by the author

Третья группа процессов характеризуется привнесом магматического и гидротермального вещества, которое воздействует на песчаники и изменяет их состав. К таким процессам относятся: метасоматическое осветление – "оглеение" (Заринов, 2017), гидротермальное образование жил с кварцем, аметистом, флюоритом, баритом (Фришман, 2015) и гематитом (Зозуля и др., 2021), щелочной магматизм с алмазонасными трубками взрыва (Ветрин и др., 1992). Мы остановимся только на первом процессе, остальные проявлены на других участках Терского берега и подробно охарактеризованы в отмеченных выше работах.



Рис. 4. Паркетная текстура с мелкими котлами на отпрепарированных волнами песчаниках. Фото автора  
Fig. 4. Parquet texture with small cauldrons on sandstones cut by waves. Photo by the author

*Оглеение* относится к специфическим изменениям красноцветных песчаников в области развития щелочного магматизма. По данным детальных исследований процесс характеризуется привнесом гидротермальных растворов и метасоматическим изменением песчаников в результате перехода окисной формы железа в закисную, его растворением и выносом. Этот процесс в красноцветных толщах имеет важное поисковое значение в связи с алмазонасными кимберлитоконтролирующими структурами (Заринов, 2017). В терских песчаниках оглеение отмечено в породах мыса Корабль (Терский район..., 2006), но не изучено. На изучаемой нами территории оглеение развито слабо в виде секущих жил, пятен, отдельных прослоев и т. д. (рис. 5).



Рис. 5. Оглеение красноцветных песчаников по трещинам. Фото автора  
Fig. 5. Gleying of red-colored sandstones along cracks. Photo by the author

*Структуры и текстуры песчаников и условия их формирования в настоящее время*

Наблюдения показали, что формирование осадочных структур в современных песчаниках имеет сходство с рифейскими. К типичным компонентам литорали, которые могут составить захоронения, относятся: знаки ряби, морской пены, торфа, древесины, ламинарии, фукуса, а также различных червей и их ихнологических остатков. Сходство структур современных песчаников на литорали по сравнению с рифейскими можно лишь частично использовать для расшифровки, поскольку при этом принципиально изменились минеральный состав пород и биоценоз. Установлено, что в современных отложениях из процесса исчез гематит, а все современное латеральное пространство заселено биоорганизмами. В настоящее время органика участвует во всех процессах литогенеза. Рассмотрим некоторые примеры современных структур седиментации.

*Рябь волнения* формируется в настоящее время в отложениях песчаников на каменных и песчаных литоралиях. Наиболее обширные, протяженные поля устойчивой по форме и размерам ряби образуются при условии направления и силы ветра параллельно берегу, на мелководной песчаной литорали, глубиной до 20 см (рис. 6). Изменение направления ветра и его затухание приводят к изменению формы волн и размеров гряд (рис. 6, б, в). Увеличение глубины также сопровождается увеличением размеров гребней ряби.

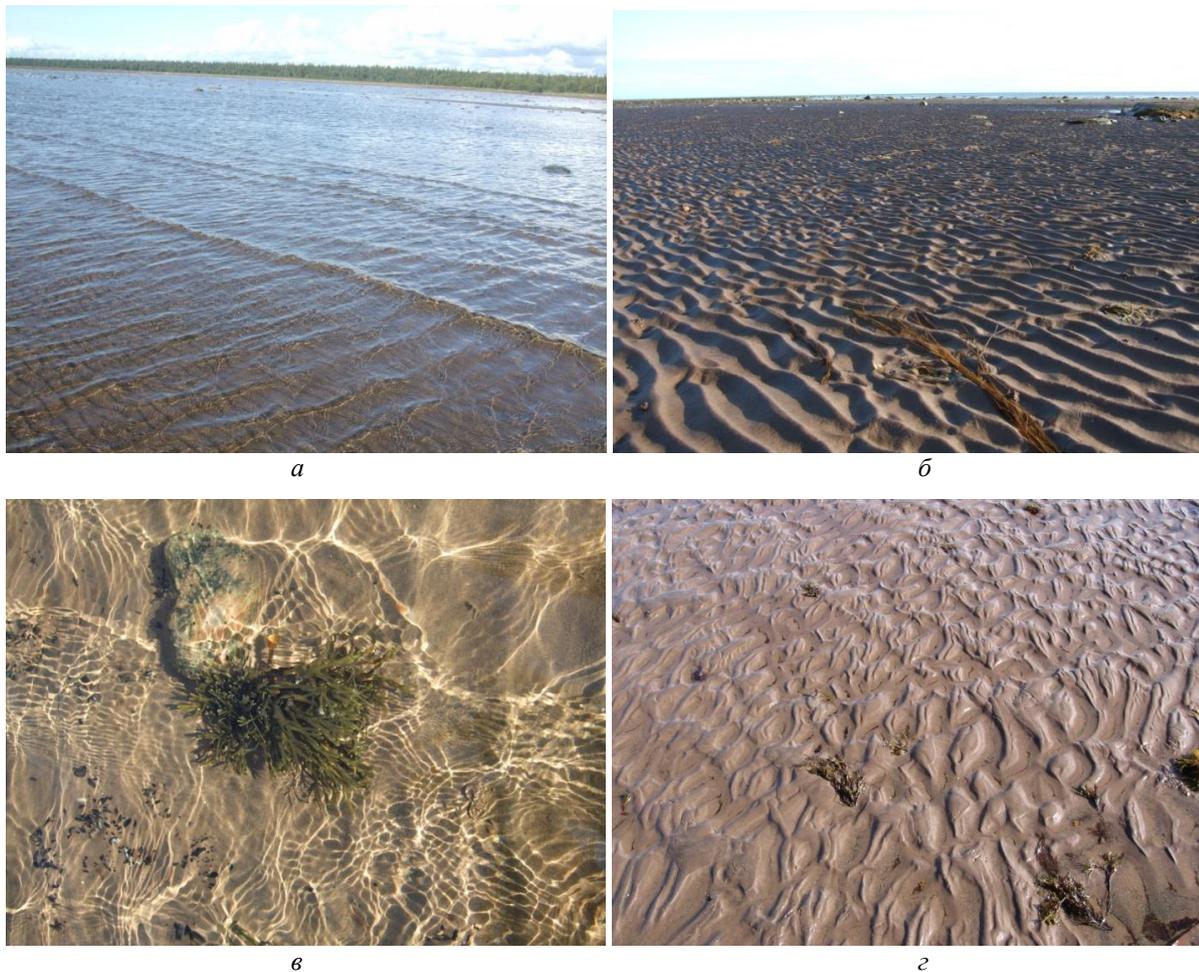


Рис. 6. Условия и формы ряби на песчаной литорали в зависимости от характера волн:  
 а – стандартный тип волнения на песчаной литорали, в результате которого образуется типичная рябь;  
 б – форма типичной ряби; в – волнение, тип "мертвая зыбь"; г – губчатая рябь как результат разнонаправленного волнения. Фото О. Придановой

Fig. 6. Conditions and forms of ripples on the sandy littoral depending on the nature of the waves:  
 а – the standard type of waves on the sandy littoral resulting in the formation of typical ripples;  
 б – the shape of a typical ripple; в – "dead swell" excitement type; г – spongy ripples as a result of multidirectional waves. Photo by O. Pridanova

Так, углубление слоя воды до 40 см сопровождалось увеличением гребней песчаной ряби и расстояния между ними до 10 см.

На каменистой литорали рябь образуется фрагментами на плоских участках в виде тонкого слоя, который частично или полностью размывается в прилив. Форма гребней ряби здесь также согласуется с размерами и формой морских волн, но знаки ряби более мелкие в сравнении с песчаными литоралиями.

Гребни разновозрастной песчаной ряби нередко накладываются друг на друга, совпадая по направлению, форме и размерам.

*Захоронения морской пены.* Нами впервые было обнаружено образование сухой морской пены, готовой к захоронению. В штормовую погоду на каменистой литорали образуются валы морской пены, которая в основном исчезает, коагулируя или испаряясь, но некоторое количество ее остается, превращаясь в твердое губчатое вещество. Эти остатки пены наряду с ракушками могут быть захоронены в песчаниках и содержать информацию о составе воды и т. д. В литературе подобный вид захоронений не описан (рис. 7).



Рис. 7. Разнообразные ракушки и сухая морская пена (белое) на глыбах песчаника. Фото автора  
Fig. 7. A variety of shells and dry sea foam (white) on blocks of sandstone. Photo by the author

*Торф и тонкие древесные остатки* являются характерным видом захоронения органики в составе современной волновой ряби (рис. 8). Они дольше, чем песок, находятся во взвешенном состоянии и оседают в межгребневых ложбинках (рис. 8, *a*). Процесс происходит аналогично ряби в древних песчаниках, в которых межгребневые ложбины заполнялись ожелезненным алевритовым материалом.



Рис. 8. Формы захоронения древесных осадков и ламинарии в составе современной ряби:  
*a* – мелкая древесная пыль (черное) между гребешками ряби; *b* – ламинария на литорали с рябью (результат штормового выброса). Фото О. Придановой  
Fig. 8. Forms of burial of wood sediments and kelp in modern ripples:  
*a* – fine wood dust (black) between ripple scallops; *b* – kelp in the littoral with ripples (the result of a storm surge). Photo by O. Pridanova

Кроме тонкого древесного материала на побережье идет захоронение крупных древесных отложений, принесенных, в частности, штормовыми волнами и накапливающимися в верхних частях литорали. Местами

валы древесины тянутся сотни метров вдоль берега, подвергаясь гниению и постепенно покрываясь отложениями песка и гравия, таким образом формируя слои органики.

*Захоронения морской растительности.* Основной объем биомассы на побережье Белого моря составляют растения ламинария и фукус. Они широко распространены в литоральной зоне, но в основном сосредоточены на глубине, ниже уровня прилива. В штормовую погоду наблюдаются выбросы значительного количества ламинарии на песчаные пляжи (рис. 8, б), где она постепенно засыпается песком.

Мы охарактеризовали лишь некоторые современные формы, участвующие в образовании современных песчаников. Более подробно весьма многочисленные обитатели литорали и их ихнологические признаки перечислены в специальной работе (Вялов и др., 1978): *Arenicola marina*, *Mokoma baltica*, *Littorina obtusata*, *Saxatilis ridis* Mat, *Balanus balanoides*, *Aurelia aurita*, *Mutilus edulis* и др.

## Результаты и обсуждение

Полученные данные подтвердили, что в рифейское время, в период образования песчаников терской свиты, органическая жизнь отсутствовала (Наливкин, 1962; Анатольева, 1978). В древних песчаниках не обнаружено никаких признаков захоронения древней фауны и флоры. Напротив, современная литораль насыщена организмами и в отличие от рифейской, характеризуется присутствием многочисленных видов флоры и фауны и продуктами их жизнедеятельности. В литоральной зоне и донных отложениях Белого моря насчитывается до 428 видов (Наумов, 2019) живых организмов. Растения и животные активно используют как коренные породы, так и продукты их разрушения, поселяются на плитах и валунах песчаников, в трещинах пород, в песке и используют их как питательный и строительный материал, точат норы, высасывают влагу и т. д. Это говорит о том, что причина отсутствия живых организмов в рифее обусловлена не составом породы, а составом атмосферы и воды, не соответствовавшим условиям для жизнедеятельности.

Результаты изучения минерального состава древних пород показали, что в распределении гематита наблюдается закономерная динамика, связанная с цикличностью седиментации. В отличие от кварца, микроклина и других породообразующих минералов гематит не связан с породами основания, поскольку он там отсутствует. Появление гематита фиксируется в базальных конгломератах в составе цемента, а затем в песчаниках. В них гематит рассеян в виде примеси к основной массе и в качестве цемента, но резко возрастает в составе ряби и такырах, вплоть до образования мономинеральных агрегатов. Максимальное содержание гематита наблюдается в такырах, в них весь глинистый слой обогащен гематитом и покрыт гематитовой пленкой. Таким образом, прослеживается важная закономерность: поскольку условия образования такыров связаны с наиболее теплыми, засушливыми периодами седиментации, т. е. с повышенными температурами, очевидно, они были наиболее благоприятны для осаждения гематита из морской воды. Экспериментально доказано, что гематит может кристаллизоваться в растворе при концентрации  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$  от 0,1 до 25 г/л при температуре от 70 до 99 °С, при этом размеры зародышей гематита составляют около 100 нм (Получение красных железистых пигментов..., 2019). Эти параметры не противоречат современным условиям образования такыров и солончаков в пустынях. Известно, что максимальная температура воздуха там достигает 58 °С, а вода и почва прогреваются до 70–80 °С, при этом выпадение солей из растворов может происходить при концентрации 50 г/л. Таким образом, можно допустить, что железо было растворено в "рифейской" воде и периодически, при повышении температуры, выпадало в осадок в виде микроскопических частиц. Высокое содержание гематита в древних такырах свидетельствует об интенсивном осаждении его вследствие достижения критической концентрации, обусловленного повышением температуры. Факты однозначно свидетельствуют, что присутствие железа в рифейских красноцветных песчаниках связано с примесью гематита, поступавшего из морской воды.

Широкое распространение волновой ряби и структуры такыров в красноцветных песчаниках может быть доказательством того, что рифейское время отличалось жарким засушливым климатом, а море было мелким, как современные песчаные пляжи на латерали. Это согласуется с приведенными выше данными о температуре кристаллизации гематита. Высокая температура приводила к периодическому высыханию воды, повышению концентрации железа и образованию такыров. Это сопровождалось осаждением гематита. Можно предположить, что повышение температуры и образование такыров приурочено к ежегодным летним периодам отложения осадков. Возможно, что такыры маркируют годовые циклы седиментации песчаников, отмечая летние периоды. К сожалению, мы не знаем, какие другие параметры имела предположительно "бескислородная" атмосфера в рассматриваемый период, но и приведенные условия являются неблагоприятными для жизни.

Можно отметить еще одну интересную особенность красноцветных песчаников, вытекающую из отсутствия наложенных региональных процессов. Несмотря на длительную историю существования, рифейские песчаники характеризуются отсутствием признаков метаморфизма и каких-либо региональных наложенных гидротермальных процессов. Локальные наложенные процессы захватывали только незначительные

участки рифейских пород и выражены в гидротермальной минерализации кварц-аметист-флюорит-баритового состава 820–690 млн лет (*Фришман, 2015*), оглеении, предшествовавшем началу палеозойской тектономагматической активизации (*Зарипов, 2017*), внедрении алмазоносных трубок взрыва 390 млн лет (*Ветрин и др., 1992*) и в гидротермальных гематитовых жилах (*Зозуля и др., 2021*). Поскольку основная часть песчаников не была затронута изменениями, это дает основание предполагать, что в рифейских песчаниках нет достаточного количества водосодержащих минералов для протекания метаморфических реакций.

### **Заключение**

Подводя итоги изучения структур рифейских красноцветных песчаников на побережье Белого моря можно выделить ряд структурных элементов, указывающих на сходства и различия их с современными процессами, позволяющими идентифицировать условия формирования. К структурам сходства относятся волновая рябь, трещины усыхания, слоистость разного типа, оползневые структуры. Волновая рябь сохранилась в песчаниках в результате постоянного накопления и захоронения отложений в условиях мелководного бассейна. Детали строения волновой ряби идентичны по размерам, форме и ориентации в древних породах и в современных отложениях, поэтому можно по ней рассчитать параметры глубины моря и направления ветров. Хорошо идентифицируются древние такыры, аналогичные современным, образующимся в засушливых районах, а также в современных солончаках. Они убедительно свидетельствуют, что образование древних песчаников происходило в засушливом климате. Их отсутствие в настоящее время на побережье Белого моря говорит о том, что климат изменился. Принципиальные различия между рифейскими и современными песчаниками заключаются в минеральном составе и присутствии фауны и флоры: в древних породах наблюдается обилие гематита, а в современных отложениях – фауны и флоры. По существу эти два фактора взаимосвязаны и обусловлены составом атмосферы и воды в рифее, не соответствовавшим условиям для жизнедеятельности.

### **Благодарности**

Работа выполнена в рамках поисковых исследований темы НИР Ги ФиЦ КНЦ РАН № 0226-2019-0053.  
Автор благодарит Приданову О. В. за предоставленные фотографии.

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Анатольева А. И. Главные рубежи эволюции красноцветных формаций / отв. ред. А. Л. Яншин. Новосибирск, 1978. 189 с. (Труды Института геологии и геофизики / АН СССР, Сиб. отд-ние ; вып. 416).
- Асминг В. Е., Афонин Н. Ю., Бакунович Л. И. [и др.]. Строение и динамика литосферы Беломорья. Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2022. 239 с.
- Балуев А. С. Континентальный рифтогенез Севера Восточно-Европейской платформы в неогее: геология, история развития, сравнительный анализ : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М., 2013. 320 с.
- Балуев А. С., Колодяжный С. Ю., Терехов Е. Н., Лебедев Е. А. [и др.]. Проблемы времени заложения и тектонической эволюции Онежско-Кандалакшского палеорифта в свете данных изотопной геохронологии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2018. № 5. С. 5–11. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-5-5-11. EDN: YLZSJF.
- Ветрин В. Р., Калинин М. М. Реконструкция процессов внутрикорового и корово-мантийного магматизма и метасоматоза (по результатам изучения глубинных включений) / под ред. Ф. П. Митрофанова. Апатиты, 1992. 106 с.
- Вялов О. С., Гаврилишин В. И., Даныш В. В. Ихнологические наблюдения на литорали Белого и Баренцева морей // Следы жизнедеятельности древнейших организмов и проблемы реконструкции палеогеографических обстановок прошлого : сб. статей. Апатиты : КНЦ РАН, 1978. С. 13–26.
- Зарипов Н. Р. Осветление красноцветных пород зимнебережного алмазоносного района архангельской провинции и накынского алмазоносного поля якутской провинции, его связь с кимберлитоконтролирующими структурами : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2017. 26 с.
- Зозуля Д. Р., Соловьева А. Н., Чикирёв И. В. Уникальные гематитовые жилы Терского побережья, Кольский регион: состав, структурно-текстурные особенности и генезис // Труды Ферсмановской научной сессии Ги КНЦ РАН. 2021. № 18. С. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.032>. EDN: GXKTFQ.
- Наливкин Д. В. Геология СССР. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1962. 814 с.
- Наумов А. Д. Белое море и его донные экосистемы. СПб., 2019. 415 с.
- Получение красных железоксидных пигментов : пат. № 2697460 Рос. Федерация / В. Чаплик, Г. Кеттелер, Ю. Кишкевитц ; № RU 2 697 460 C2 ; заявл. 04.09.2015.

- Романенко Ф. А., Гаранкина Е. В., Дзевашвили П. С., Иоч М. Э. [и др.]. Строение и динамика рельефа западной части Терского берега Белого моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России : материалы ежегодной конф. по результатам экспедиционных исследований. 2021. Вып. 8. С. 199–204. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-199-204. EDN: DVNCNP.
- Сафьянов Г. А., Моисеева М. А. Морфодинамические условия гранулометрической дифференциации наносов на пляжах и приливных осушках Белого моря // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2012. № 6. С. 38–45. EDN: PUZPJF.
- Терский район / Д. В. Жиров, В. И. Пожиленко, О. А. Белкина [и др.]. Санкт-Петербург : Ника, 2006. 128 с. (Памятники природы и достопримечательности Мурманской области ; кн. 1).
- Фришман Н. И. Стадийность и условия образования аметиста месторождения "Мыс Корабль" // Труды Ферсмановской научной сессии. 2015. № 12. С. 339–341. EDN: WWMPUD.

## References

- Anatolyeva, A. I. 1978. The main boundaries of the evolution of red-colored formations. Novosibirsk. (In Russ.)
- Asming, V. E., Afonin, N. Yu., Bakunovich, L. I. et al. 2022. Lithospheric structure and dynamics of the White Sea region. (In Russ.)
- Baluev, A. S. 2013. Continental rifting of the north of the East European platform in the Neogean: Geology, development history, comparative analysis. Ph.D. Thesis. Moscow. (In Russ.)
- Baluev, A. S., Kolodyazhny, S. Yu., Terekhov, E. N., Lebedev, E. A. et al. 2018. Problems of the time of initiation and tectonic evolution of the Onega-Kandalaksha paleorift in the light of isotope geochronology data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka*, 5, pp. 5–11. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-5-5-11. EDN: YLZSJF. (In Russ.)
- Vetrin, V. R., Kalinkin, M. M. 1992. Reconstruction of the processes of intracrustal and crust-mantle magmatism and metasomatism (based on the results of studying deep inclusions). Ed. F. P. Mitrofanov. Apatity. (In Russ.)
- Vyalov, O. S., Gavrillishin, V. I., Danysh, V. V. 1978. Ichnological observations on the littoral of the White and Barents Seas. In coll. articles *Traces of vital activity of the most ancient organisms and problems of reconstruction of paleogeographic settings of the past*. Apatity, pp. 13–26. (In Russ.)
- Zaripov, N. R. 2017. Clarification of red-colored rocks of the winter-shore diamond-bearing region of the Arkhangelsk province and the Nakyn diamond-bearing field of the Yakut province, its connection with kimerlite-controlling structures. Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Zozulya, D. R., Solovieva, A. N., Chikiryov, I. V. 2021. Unique hematite veins of the Tersky coast, Kola region: composition, structural and textural features and genesis. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN*, 18, pp. 177–182. DOI: <https://doi.org/10.31241/FNS.2021.18.032>. EDN: GXKTFQ. (In Russ.)
- Nalivkin, D. V. 1962. Geology of the USSR. Moscow-Leningrad. (In Russ.)
- Naumov, A. D. 2019. The White Sea and its bottom ecosystems. St. Petersburg. (In Russ.)
- Chaplik, V., Ketteler, T., Kiskewitz, Yu. 2015. Obtaining red iron oxide pigments, Russian Federation, Pat. 2697460. (In Russ.)
- Romanenko, F. A., Garanina, E. V., Dzhevakhshvili, P. S., Ioch, M. E. et al. 2021. The structure and dynamics of the relief of the western part of the Tersky coast of the White Sea. *Proceedings of the annual conf. according to the results of expeditionary research*, Iss. 8, pp. 199–204. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-199-204. EDN: DVNCNP. (In Russ.)
- Safyanov, G. A., Moiseeva, M. A. 2012. Morphodynamic conditions of granulometric differentiation of sediments on the beaches and tidal drylands of the White Sea. *Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 6, pp. 38–45. EDN: PUZPJF. (In Russ.)
- Tersky district. 2006. Eds. D. V. Zhiron, V. I. Pozhilenko, O. A. Belkina et al. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Frishman, N. I. 2015. Stages and conditions for the formation of amethyst from the Cape Korabl deposit. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii*, 12, pp. 339–341. EDN: WWMPUD. (In Russ.)

## Сведения об авторе

**Нерадовский Юрий Николаевич** – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: [iu.neradovskij@yandex.ru](mailto:iu.neradovskij@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2400-0403>

**Yury N. Neradovsky** – 14 Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KCS RAS, Cand. Sci. (Geology & Miner.), Leading Researcher; e-mail: [iu.neradovskij@yandex.ru](mailto:iu.neradovskij@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2400-0403>

УДК 504.054

## Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris*

Г. А. Щеглов

Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия;  
e-mail: [g.scheglov@ksc.ru](mailto:g.scheglov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2870-3616>

Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
04.04.2023;

получена  
после доработки  
23.05.2023;

принята к публикации  
24.05.2023

Ключевые слова:

карьерные воды,  
соединения  
неорганического азота,  
нитрат аммония,  
поллютанты,  
очистка,  
микроводоросли,  
биотехнологии

Загрязнение сточных вод соединениями неорганического азота является серьезной проблемой для горнодобывающей отрасли, промышленных и коммунальных предприятий. Азот может попадать в сточные воды карьеров, когда для взрывных работ используются взрывчатые вещества, содержащие нитрат аммония. Такое загрязнение воды азотом приводит к экологическому ущербу и заболеваниям людей, компании, превышающие установленные законом пределы загрязнения азотом, облагаются штрафами. Утилизация азота из сточных вод осуществляется биологическими методами, однако эффективность биологических методов в северных регионах России низка в силу климатических факторов, затрудняющих жизнедеятельность организмов. Поэтому важно разработать технологии очистки сточных вод для удаления соединений азота. В работе анализируется способность микроводоросли *Chlorella vulgaris* поглощать и использовать разные формы неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающей промышленности на примере сточных вод отстойника карьера и хвостохранилища предприятия "Карельский окатыш" (Костомукша, Республика Карелия). Изучены концентрации аммония, нитратов, нитритов в воде и биомасса микроводорослей в образцах воды. Новизной исследования является оценка концентраций загрязняющих веществ в параллельно идущих опытах с различными условиями культивирования. Установлено, что при культивировании *Chlorella vulgaris* при температуре 26 °С, аэрации и искусственном освещении концентрация аммония снижалась. Эти результаты свидетельствуют о перспективности биореакторных технологий очистки сточных вод от аммония.

Для цитирования

Щеглов Г. А. Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris*. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 191–199. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199>.

## Changes of inorganic nitrogen compounds concentration in a mining enterprise wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*

Gleb A. Shcheglov

Institute of Industrial Ecology Problems in the North KSC RAS, Apatity, Murmansk region, Russia;  
e-mail: [g.scheglov@ksc.ru](mailto:g.scheglov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2870-3616>

Article info

Received  
04.04.2023;

received  
in revised form  
23.05.2023;

accepted  
24.05.2023

Key words:

quarry waters,  
inorganic nitrogen  
compounds, ammonium  
nitrate, pollutants,  
purification, microalgae,  
biotechnologies

Abstract

Wastewater contamination by nitrogen compounds is a serious problem for the mining, industrial and utility companies. Nitrogen can enter quarry effluent when explosives containing ammonium nitrate are used in blasting operations. This nitrogen pollution of water leads to environmental damage and human disease, companies that exceed the legal limits for nitrogen pollution are subject to fines. Nitrogen is removed from wastewater by biological methods, but their efficiency is low in the Northern regions of Russia due to climatic factors that hinder the vital activity of organisms. Therefore, it is essential to develop wastewater treatment technologies for the removal of nitrogen compounds. This study focuses on the ability of the microalgae *Chlorella vulgaris* to absorb and utilize various inorganic nitrogen compounds in mining effluents using the example of effluents from the "Karelsky Okatysh" mine and tailings dam (Kostomuksha, Republic of Karelia). Concentrations of ammonium, nitrate and nitrite in water and microalgal biomass in water samples have been investigated. A novelty of the study is the evaluation of pollutant concentrations in parallel experiments with different cultivation conditions. It has been found that when *Chlorella vulgaris* is cultivated at 26 °C, aeration and artificial light, the concentration of ammonium decreases. These results show the promising application of bioreactor technologies for the treatment of ammonium polluted wastewater.

For citation

Shcheglov, G. A. 2023. Changes of inorganic nitrogen compounds concentration in a mining enterprise wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 191–199. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199>.

## Введение

В процессе добычи полезных ископаемых, а также при ведении коммунального хозяйства образуются сточные воды, загрязненные соединениями азота.

В воду коммунальных хозяйств азот попадает с отходами жизнедеятельности человека. Помимо загрязнения азотом также воды загрязняются фосфором и различными взвешивыми.

В сточные воды горнодобывающих предприятий азот попадает из нитрата аммония, используемого в качестве взрывчатки при буровзрывных работах (*Рыбникова и др., 2020*). В процессе взрыва нитрат аммония разлагается с выделением энергии и тепла на кислород, воду и азот по формуле



Азот в воде встречается в аммонийной, нитратной и нитритной форме в растворенном состоянии. Не выпадает в осадок и увеличивает растворимость с ростом температуры. В сточные воды азот попадает с карьерными и шахтными водами, а также с атмосферными осадками, проходящими через взорванную породу. Порядка 4 % общей массы азота из взрывчатых веществ попадает в воду после взрывных работ (*Хохряков и др., 2016; Jermakka et al., 2015*).

В результате сброса сточных вод в открытые водоемы происходит загрязнение почвы и воды, что приводит к загрязнению экосистем и ущербу здоровью человека (*Babatunde et al., 2011*). В документации СанПиН 2.1.3684-21<sup>1</sup> установлены нормы предельно допустимых концентраций (ПДК) для различных веществ.

Для разных форм азота в воде установлены свои нормы ПДК:

- аммоний – 1,5 мг/л;
- нитраты – 45 мг/л;
- нитриты – 3,3 мг/л.

Превышение этих показателей приводит к выплате штрафных санкций предприятиями, превышающими ПДК. Таким образом, загрязнение азотом и другими веществами наносит не только экологический ущерб, но и снижает показатели экономической эффективности предприятий.

Так, в регионах с развитым горным производством наблюдаются загрязнения окружающей среды. Например, в Мурманской области вклад горной промышленности в общий объем отходов составляет 90 % и ежегодно образуется 225,78 млн м<sup>3</sup>/год сточных вод, загрязненных соединениями неорганического азота (*Солнышкова, 2020*).

Для борьбы с загрязнением вод азотом эффективно работают биологические методы. Наиболее распространенными из них являются:

1) создание искусственных болот с использованием сообществ сосудистых растений и микроорганизмов, интенсивно поглощающих соединения азота в процессе своей жизнедеятельности (*Савичев, 2008; Иванова и др., 2021; Солнышкова и др., 2018*). При этом у метода имеются свои недостатки:

- индивидуальный подбор растительных сообществ для каждого конкретного производства;
- низкая эффективность в условиях северных регионов России, особенно в условиях Крайнего Севера;
- вторичное загрязнение воды азотом после отмирания части растений в процессе жизнедеятельности;

2) применение сообществ микроорганизмов "активного ила". Сущность метода заключается в преобразовании микроорганизмами азота из одной формы в другую с последующим удалением из воды в процессе нитрификации и денитрификации (*Мешенгиссер и др., 2006; Зубов и др., 2013; Дубовик и др., 2016*). Недостатками метода являются:

- затраты на сооружение для проведения очистки, а также затраты на электроэнергию и нагрев воды;
- метод эффективно работает при температурах выше 10 °С;
- необходимость утилизации избыточного активного ила, образующегося в процессе нитрификации;

3) применение микроводорослей, поглощающих азот в процессе жизнедеятельности. Очистка микроводорослями может проходить как в формате прудов, так и в биореакторе, заменяя или дополняя предыдущие методы очистки. Так, в работе (*Кирилина и др., 2013*) установлена высокая эффективность удаления азота при совместном использовании микроводорослей и активного ила.

Микроводоросли рода *Chlorella* применяются для очистки воды, в том числе от соединений азота (*Кирилина и др., 2013; Солнышкова, 2020*).

Особенностями применения хлореллы для очистки являются:

- невысокая эффективность очистки при низких температурах, хотя существуют штаммы хлореллы, способные выживать и поглощать азот даже при температуре воды 3 °С (*Солнышкова, 2020*);

<sup>1</sup> Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению населения, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий : Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.3684-21 : утв. главным государственным санитарным врачом Рос. Федерации 28.01.21. N 3. URL: <https://base.garant.ru/400289764/?ysclid=li2u1rv39t2166157>.

• необходимость утилизации избыточной биомассы микроводоросли, образующейся в процессе очистки. При этом хлорелла широко применяется в качестве БАД, корма для скота, из водоросли получают добавки Омега-3, в связи с чем избыточную биомассу можно рассматривать не как отход производства, а как ценное сырье для животноводства и фармакологии;

• главной проблемой использования хлореллы для очистки вод и последующей утилизации биомассы является недостаточное развитие подобных технологий. Помимо лабораторных работ, исследующих принципиальную возможность применения водоросли для разработки технологий очистки в условиях Крайнего Севера, необходимы и натурные исследования, рассматривающие практические аспекты использования различных штаммов водоросли для очистки сточных вод.

Представляется актуальной разработка современных методов очистки сточных вод от азота на горнодобывающих предприятиях и в коммунальных хозяйствах, в условиях постоянно возрастающих объемов загрязненных сточных вод и размеров штрафных санкций для предприятий. Проблема очистки сточных вод от азота особенно актуальна в условиях Крайнего Севера, где в силу суровых климатических условий сложнее внедрить любые биологические методы.

В горной промышленности постоянно образуются большие объемы загрязненных сточных вод. Некоторые предприятия пытаются снизить количество выбросов, пуская сточные воды в оборот. Но при внедрении подобного подхода зачастую страдает технологический процесс, например, снижение эффективности флотации из-за повышения pH оборотной воды.

В коммунальном хозяйстве объемы сбросов воды ниже, чем на предприятиях горной промышленности, но при этом штрафы за превышение ПДК по азоту и фосфору оказывают существенное влияние на экономическую эффективность предприятий. Это приводит к удорожанию ведения коммунального хозяйства и отражается на тарифах за водоснабжение для жителей населенных пунктов как конечных потребителей услуг.

Цель исследования – изучить, насколько эффективно штамм водоросли *Chlorella vulgaris* Beyerinck [Beijerinck], 1890 обеспечивает в ходе жизнедеятельности снижение концентрации аммония, нитратов и нитритов в воде при различной исходной концентрации азотсодержащих загрязняющих веществ и различных условиях проведения очистки.

## Материалы и методы

### *Источник загрязненных проб воды*

Работа проводилась на образцах сточных вод, поступающих с предприятия АО "Карельский окатыш", расположенного в г. Костомукша (Республика Карелия, Россия). Предприятие занимается добычей и переработкой железной руды и производит 20 % всех железорудных окатышей в России. Всего было отобрано два образца воды из отстойника карьера и один образец из отстойника хвостохранилища.

### *Характеристика микроводоросли*

Способность микроводорослей снижать концентрацию азота в воде изучалась на примере одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* Beyerinck [Beijerinck], 1890.

Подготовка маточной культуры микроводоросли проходила в течение 7 дней. Водоросль выращивалась на среде Тамия. Во все исследуемые пробы на 200 мл исследуемой воды добавлялось 10 мл маточной культуры микроводоросли. Все пробы находились в колбах с узким горлышком, закрытым алюминиевой фольгой в ходе экспериментов.

Для контроля количества биомассы водоросли измерялась оптическая плотность проб воды с добавленной суспензией перед началом эксперимента. Среднее значение оптической плотности для всех проб составило  $0,022 \pm 0,003$ .

### *Определение концентрации водоросли*

Концентрация биомассы микроводоросли проводилась колориметрическим методом. Измерения оптической плотности проводились на колориметре модели КФК-2 с кюветой на 10 мм. Предварительно спектрофотометрическим методом по ГОСТ 17.1.4.02-90<sup>2</sup> определялась концентрация биомассы водоросли. На основе показателей концентрации и оптической плотности проб на длине волны 540 нм строился калибровочный график на основе линейного уравнения (формула 2), с помощью которого в дальнейшем определялась концентрация биомассы микроводоросли

$$y = 0,4628x + 0,001; R^2 = 0,9999, \quad (2)$$

где  $y$  – оптическая плотность пробы в кювете 10 мм при длине волны 540 нм,  $x$  – концентрация биомассы водоросли в пробе,  $R^2$  – коэффициент детерминации.

<sup>2</sup> ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М., 1999.

#### *Ход эксперимента и условия проведения*

В ходе экспериментов пробы воды разделялись на три группы, различающиеся по условиям культивирования водоросли в процессе эксперимента:

- условия, приближенные к неблагоприятным в зимний период: температура 7 °С в холодильнике без аэрации и освещения;
- промежуточные условия, имитирующие летний период в естественных условиях: 17 °С, без аэрации с естественным освещением;
- оптимальный для вида условия культивирования: 26 °С, с аэрацией и освещением.

Контроль температуры осуществлялся ртутным градусником с точностью шкалы  $\pm 1$  °С.

Для обеспечения оптимальных условий для освещения и подогрева проб использована лампа LED-1088 Aquarium light. Аэрацию обеспечивал компрессор М-102 со скоростью прокачки 2,5 л/мин.

Образцы воды, отобранные на производстве, разделялись на описанные выше группы, часть проб разбавлялась дистиллированной водой для наблюдения изменения концентрации азота при различных исходных степенях загрязнения воды. Внесение суспензии микроводоросли производилось непосредственно перед началом эксперимента, после разбавления и подготовки проб воды.

Так, в 1-й группе рассматривали 2 пробы воды:

3.7 – вода с отстойника карьера № 1;

3/2.7 – вода с отстойника карьера № 1, разбавленная дистиллированной водой в 2 раза.

Во 2-й группе рассматривалось 5 проб воды:

1 – вода с отстойника хвостохранилища;

3 – вода с отстойника карьера № 1;

3/2 – вода с отстойника карьера № 1, разбавленная дистиллированной водой в 2 раза;

3/4 – вода с отстойника карьера № 1, разбавленная дистиллированной водой в 4 раза;

4 – вода с отстойника карьера № 2.

В 3-й группе рассматривалось 2 пробы воды:

3.26 – вода с отстойника карьера № 1;

3/2.26 – вода с отстойника карьера № 1, разбавленная дистиллированной водой в 2 раза.

Продолжительность экспериментов составила 9 суток. В ходе всего периода ежедневно измерялась концентрация аммония, нитратов и биомассы водоросли. Измерение нитритов проводилось на старте экспериментов и после 4 и 8 суток. Все эксперименты были запущены в одно время и шли параллельно.

Для экспериментов отбирались пробы в объеме 200 мл с добавлением 10 мл суспензии микроводоросли.

#### *Метод определения концентрации азота*

Для оценки концентрации аммония и нитратов в воде использовались ионселективные методы с применением иономера Мультитест ИПЛ-112 и электрода сравнения ЭСр-10103/3.0.

Концентрация аммония определялась по методике РД 52.24.394-95<sup>3</sup> с помощью электрода ЭЛИТ-051, концентрация нитратов – по методике РД 52.24.367-95<sup>4</sup> с помощью электрода ЭЛИТ-021. Перед началом серии экспериментов электрод был откалиброван.

Концентрацию нитритов в воде рассчитывали колориметрическим методом ПНД Ф 14.1:2.3-95<sup>5</sup> на колориметре модели КФК-2 с кюветой на 20 мм. Перед началом экспериментов был построен калибровочный график для определения концентрации нитритов

$$y = 1,9517x; R^2 = 0,998. \quad (3)$$

#### *Статистическая обработка данных*

Для статистической обработки результатов экспериментов применены стандартные алгоритмы вариационного и регрессионного анализа, включенные в пакет MS Excell.

## **Результаты и обсуждение**

### *Концентрация биомассы водоросли*

Результаты изменения концентрации биомассы водоросли *Chlorella vulgaris* представлены на двух графиках (рис. 1 и 2) в связи с различным диапазоном значений биомассы в разных пробах. На рис. 1 представлены данные для проб 1; 3.7; 3/2.7; 3/4; 3/2; 4; 3. В данных пробах концентрация изменялась от 0,041 г/м<sup>3</sup> до 0,11 г/м<sup>3</sup>, т. е. отмечено увеличение биомассы после 9 суток в 2,7 раза.

<sup>3</sup> РД 52.24.394-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в поверхностных водах суши потенциометрическим методом с ионселективным электродом. Ростов-на-Дону, 1995.

<sup>4</sup> РД 52.24.367-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитратов в поверхностных водах суши потенциометрическим методом с ионселективным электродом. Ростов-на-Дону, 1995.

<sup>5</sup> ПНД Ф 14.1:2.43-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нитрит-ионов в питьевых, поверхностных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. М., 1995.

На рис. 1 видно, что культивирование при температуре 17 °С, за исключением пробы 1, к концу эксперимента позволило накопить больше биомассы в пробах, чем в ходе культивирования при температуре 7 °С.

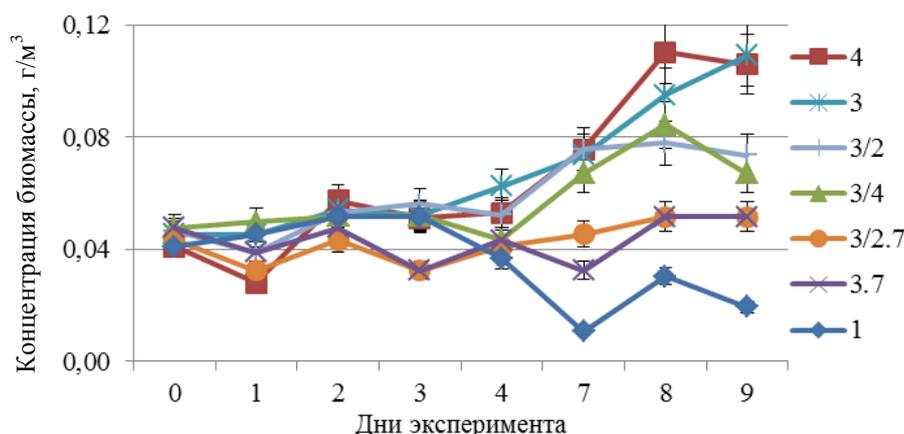


Рис. 1. Концентрация биомассы культуры водоросли, тестируемой для проб воды с разной температурой. Пробы культуры хлореллы в эксперименте при постоянной температуре 17 °С, без аэрации и переменном освещении: 1 – пробы воды из отстойника хвостохранилища; 3 – пробы из отстойника карьера № 1; 3/2 – пробы воды из отстойника карьера № 1, разбавленные в 2 раза; 3/4 – пробы из отстойника карьера № 1, разбавленные в 4 раза; 4 – пробы из отстойника карьера № 2. Пробы культуры хлореллы в эксперименте при постоянной температуре 7 °С, без аэрации и освещения: 3.7 – пробы воды из отстойника карьера № 1; 3/2.7 – пробы из отстойника карьера № 1, разбавленные в 2 раза

Fig. 1. Biomass concentration of the algae culture testing for water samples at different temperature ranges. Samples cultured at constant temperature 17 °С, without aeration and variable illumination: 1 – tailings pond lagoon; 3 – pit № 1 lagoon; 3/2 – pit № 1 lagoon diluted by 2 times; 3/4 – pit № 1 lagoon diluted by 4 times; 4 – pit № 2 lagoon. Samples cultured at a constant temperature of 7 °С, without aeration and lighting: 3.7 – pit № 1 lagoon; 3/2.7 – pit № 1 lagoon diluted by a factor of 2

По сравнению с пробами хлореллы, культивируемой в "идеальных" условиях, пробы, культивируемые при температурах 7 и 17 °С, не показали существенного прироста биомассы, что объясняется низкой температурой для данного вида микроводоросли. Однако прирост биомассы все же был зафиксирован.

На графике ниже представлены гистограммы, отражающие изменения концентрации биомассы микроводоросли в пробах воды при температуре культивирования 26 °С. В пробах 3.26 и 3/2.26 исходная концентрация 0,04 г/м<sup>3</sup> увеличилась к концу экспериментов до 2,4 г/м<sup>3</sup>, что составляет 60-кратный рост биомассы за 9 суток (рис. 2).

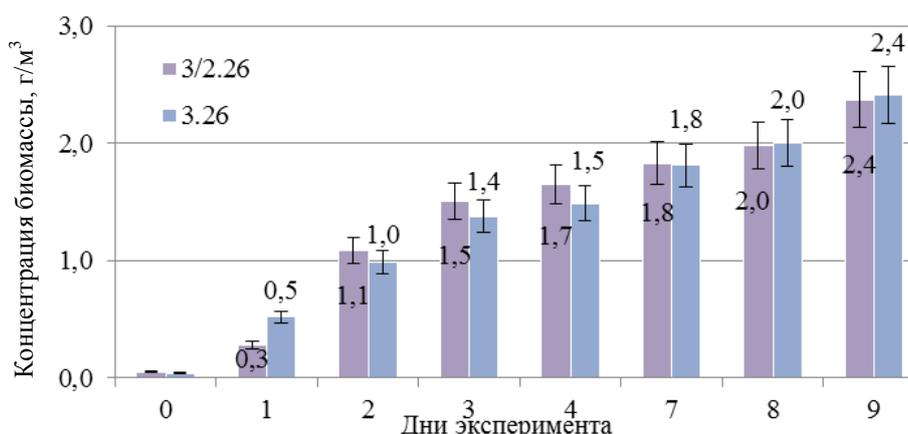


Рис. 2. Изменение концентрации биомассы микроводоросли *Chlorella vulgaris* в оптимальных условиях: при постоянной температуре 26 °С, с аэрацией и освещением: 3.26 – проба воды из отстойника карьера № 1; 3/2.26 – проба из отстойника карьера № 1, разбавленная в 2 раза

Fig. 2. Concentration of the biomass of the microalgae *Chlorella vulgaris* under optimum conditions. Samples cultured at the constant temperature 26 °С, with aeration and lighting: 3.26 – pit 1 lagoon; 3/2.26 – pit 1 lagoon diluted by a factor of 2

При анализе зависимости изменения концентрации биомассы от концентрации форм азота можно отметить, что концентрация биомассы возрастала не только при более высокой температуре, но и при больших исходных концентрациях азота в воде. Однако при температуре 26 °С концентрация биомассы уже не зависела от исходной концентрации азота (рис. 2).

#### Концентрация аммония

На рис. 3 представлена графическая интерпретация результатов измерений содержания аммония в воде для двух групп проб воды: 3 и 3/2 в разных условиях.

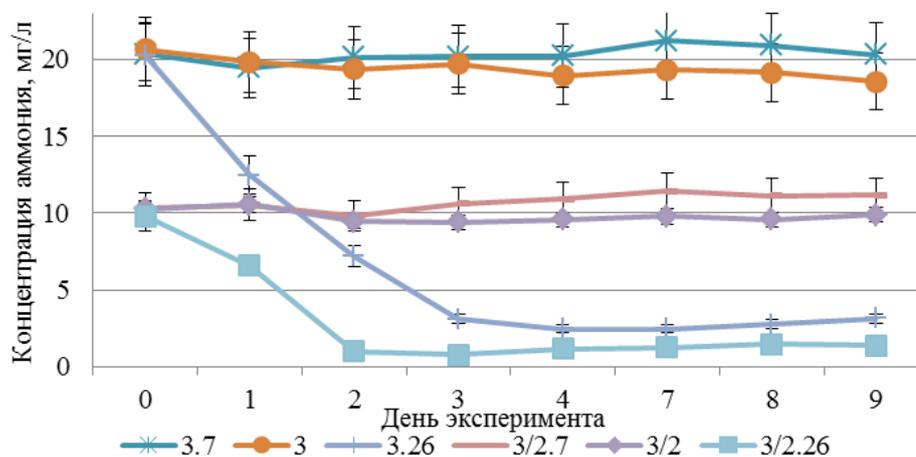


Рис. 3. Концентрация аммония (мг/л) в пробах воды.

Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Fig. 3. Ammonium concentration (mg/l) in water samples.

The designation of the sample labels corresponds to the indexing in the previous figures

На рис. 3 видно, что при температуре культивирования 7 °С концентрация аммония в пробах за 9 суток осталась неизменной, тогда как при температуре культивирования 17 °С концентрация аммония в пробах снизилась относительно исходной концентрации на 10,2 % для пробы 3 и на 3,5 % для пробы 3/2.

В пробах, культивируемых при температуре 26 °С с аэрацией и освещением, наблюдалось равномерное снижение концентрации аммония в воде. Для пробы 3.26 с большей исходной концентрацией аммония снижение соответствующих значений продолжалось в течение 3 суток и составило 84,6 % от исходного уровня. Для пробы 3/2.26 с меньшей исходной концентрацией аммония снижение продолжалось в течение 2 суток и составило 89,7 %. Далее концентрация аммония вышла на плато и колебалась в пределах 0,65 мг/л. Для проб 3.26 и 3/2.26 наблюдался максимальный прирост биомассы водоросли и снижение ее концентрации. Это позволяет сделать вывод, что снижение концентрации аммония обусловлено его поглощением водорослью в процессе питания для поддержания процессов жизнедеятельности и последующего деления клеток.

#### Концентрация нитратов и нитритов

Графическая интерпретация концентрации нитритов в пробах воды представлена на рис. 4.

Концентрация нитритов замерялась трижды: перед началом серии экспериментов, через 4 и 8 суток. Продолжительный перерыв между измерениями обусловлен необходимостью отбирать большой объем пробы воды по сравнению с общим объемом пробы.

В большинстве проб концентрация нитритов оставалась неизменной в ходе экспериментов. Рост значений наблюдался для проб 3.26, 3/2.26, 4. Рост концентрации объясняется переходом из одной формы неорганического азота в другую. Конечная концентрация не превышала уровень ПДК во всех пробах.

Графическая интерпретация концентрации нитратов в пробах воды представлена на рис. 5.

В ходе экспериментов было отмечено незначительное снижение концентрации нитратов в воде по прошествии 3 суток и последующий рост концентрации к начальному уровню (рис. 5, пробы 3.20; 3.25 и 4).

Наиболее близкой к нашим исследованиям является работа (Солнышкова, 2020), согласно которой при температуре воды 3 °С наблюдалось понижение концентрации нитратов с 200 мг/л до 45 мг/л за 8 дней, а при температуре 19 °С – за 7 дней. По нашим результатам статистически значимого снижения концентрации нитратов не зафиксировано даже при оптимальной для объекта температуре 26 °С. Результаты работы (Солнышкова, 2020) показывают, что высокая эффективность очистки вод от азотсодержащих компонентов обусловлена выбором холодоустойчивого вида водоросли, а также специальной методикой подготовки культуры на среде без источников азота – "азотном голодании". Автором не приводятся данные по изменению

концентрации аммонийной формы азота, которая существенно снижалась при культивировании при 26 °С согласно оригинальным результатам. Необходимо повторить проведенные эксперименты с культурой, выращенной в условиях "азотного голодания", для более объективного сопоставления результатов и изучения способа культивирования водорослей на их способность утилизировать нитраты и аммоний.

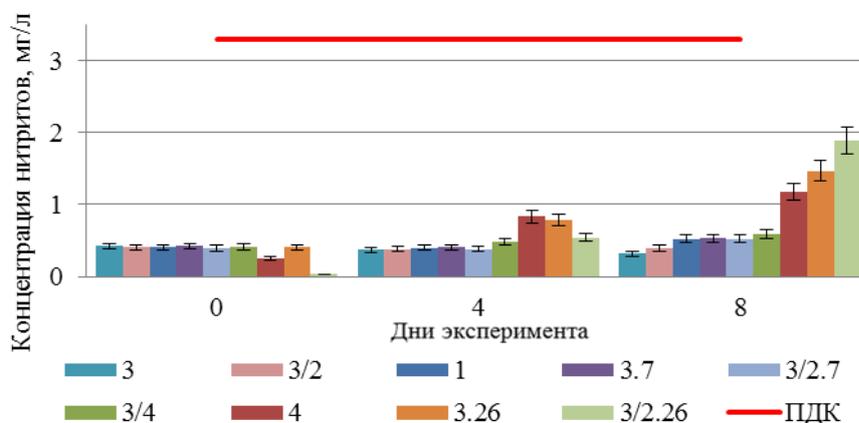


Рис. 4. Концентрация нитритов (мг/л) в пробах воды.

Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Fig. 4. Nitrite concentration (mg/l) in water samples.

The designation of the sample labels corresponds to the indexing in the previous figures

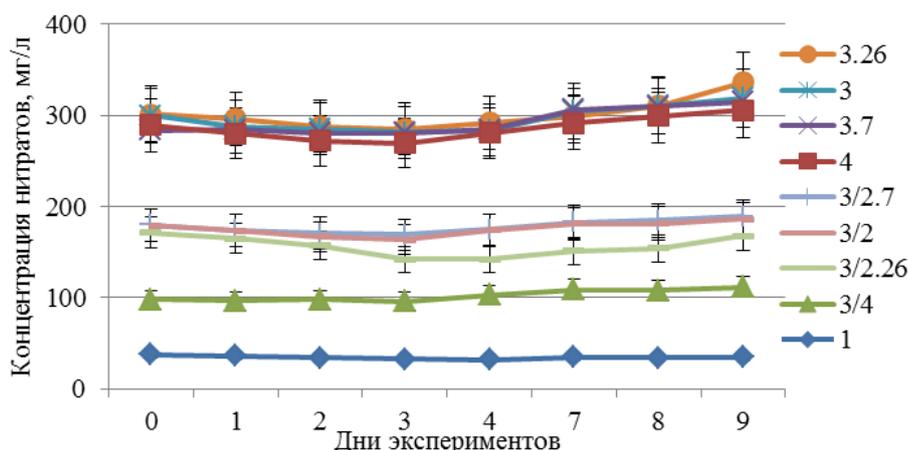


Рис. 5. Концентрация нитратов (мг/л) в пробах воды.

Расшифровка обозначения проб соответствует индексации на предыдущих рисунках

Fig. 5. Nitrate concentration (mg/l) in water samples.

The designation of the sample labels corresponds to the indexing in the previous figures

В работе (Кирилина и др., 2013) изучены особенности применения элодеи и сообществ активного ила для изменения концентрации аммония в сточных водах. Было показано, что культивирование элодеи совместно с активным илом позволило удалить весь аммоний из воды при исходной концентрации 6,5 мг/л и температуре 20 °С. Концентрация нитратов снижалась за 7 дней с 8,1 до 2,9 мг/л в аналогичных условиях. Данный метод превосходит эффективность утилизации азота, показанный в наших опытах, однако стоит отметить, что в полученных нами результатах скорость утилизации аммония была выше, а снижение концентрации на 85–90 % наступало уже через 2–3 дня (в зависимости от исходной концентрации аммония). При этом исходная концентрация азотсодержащих веществ в нашем исследовании была на порядок выше и составляла для аммония 10 и 20 мг/л, а для нитратов доходила до 300 мг/л, тогда как в работе (Кирилина и др., 2013) исходные концентрации аммония и нитратов не превышали 9 мг/л. Вместе с тем неизвестно, как рассмотренные автором организмы отреагируют на столь высокие концентрации азота в воде.

На основе сопоставления полученных результатов с работами других авторов (Кирилина и др., 2013; Солнышкова, 2020) можно сделать вывод о том, что различные организмы в совокупности с учетом методов их подготовки демонстрируют различную способность утилизации соединений азота. В зависимости от условий, в том числе климатических, и от характеристик предприятий (концентрации загрязнителей, объемы водосброса), на которых необходимо проводить очистку, эффективными могут оказаться различные

методы очистки. Из полученных данных можно сделать вывод о том, что применение хлореллы возможно при малых объемах водосброса, когда очистку можно проводить в биореакторах с оптимальными для водоросли условиями роста. Вместе с тем адекватный подбор вида водоросли и оптимизация условий подготовки культуры может способствовать расширению диапазона условий, в которых хлорелла будет наиболее эффективно справляться с загрязнениями.

### **Заключение**

В условиях 9-суточных экспериментов изучена способность культуры микроводоросли *Chlorella vulgaris* наращивать биомассу, поглощая азот из сточных вод горнодобывающих производств в различных температурных условиях. Установлено, что хлорелла, выращенная на среде Тамия, успешно наращивает биомассу при постоянных температуре 26 °С, аэрации и освещении, а также снижает концентрацию аммония в воде в 10 раз уже через 2–3 суток. При температуре 7 и 17 °С без аэрации и с естественным освещением отмечены незначительные изменения в воде концентрации аммония и нитратов, не превышающие уровень ПДК. Успешное поглощение аммония достигалось в идеальных для водоросли условиях с температурой 26 °С, аэрацией и освещением. Данный факт свидетельствует о возможности применения хлореллы для очистки сточных вод в регионах с благоприятным для водоросли климатом. При неблагоприятных климатических условиях может быть перспективна разработка биореакторов, искусственно поддерживающих необходимые для культивирования условия. Перспективным является также изучение способности микроводоросли *Chlorella vulgaris*, выращенной при азотном голодании, утилизировать азот, а также поглощать фосфор и тяжелые металлы из сточных вод.

Важно отметить, что по итогам экспериментов концентрация аммония в сосудах хотя и существенно снижалась, но все равно превышала уровень ПДК, что требует проведения дальнейших экспериментов и подбора таких условий культивирования (состав среды, сроки экспозиции, плотность культуры, температурный режим опытов, вторичный посев культуры), при которых итоговая концентрация соединений азота в очищаемой воде станет ниже значений ПДК.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности широкого использования микроводоросли *Chlorella vulgaris* для снижения содержания аммонийного азота в сточных водах предприятий горнопромышленного комплекса.

### **Благодарности**

Исследование выполнено в рамках темы НИР FMEZ-2022-0010 122022400112-7 "Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)".

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Дубовик О. С., Маркевич Р. М. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод // Труды БГТУ. Химия, технология органических веществ и биотехнология. 2016. № 4. С. 186. EDN: WHMPTT.
- Зубов М. Г., Бояренев С. Ф., Зубов Г. М., Куликов Н. И. [и др.]. Биотехнология очистки сточных вод с иммобилизацией активного ила и удалением азота // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 8. С. 72–75. EDN: QZHNZX.
- Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В. [и др.]. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от соединений азота. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2021. 88 с.
- Кирилина Т. В., До Тхи Тху Ханг, Сироткин А. С. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 8. С. 200–203. EDN: QBIZOF.
- Мешенгиссер Ю. М., Щетинин А. И., Есин М. А. Удаление азота и фосфора активным илом // Коммунальное хозяйство городов. 2006. № 74. С. 36–45.
- Рыбникова Л. С., Наволокина В. Ю. Оценка состояния гидросферы в верховьях бассейна реки Тагил (Свердловская обл.) // Проблемы недропользования. 2020. № 2(25). С. 81–89. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.081. EDN: OVKXMT.
- Савичев О. Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных биогеоценозов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74. EDN: JKOQVT.
- Солнышкова М. А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 133 с.

- Солнышкова М. А., Пашкевич М. А. Исследование эффективности биологической очистки воды от нитратов с помощью биоплато // *Естественные и технические науки*. 2018. № 5(119). С. 169–173. EDN: XSKILZ.
- Хохряков А. В., Студенок А. Г., Студенок Г. А. Исследование процессов формирования химического загрязнения дренажных вод соединениями азота на примере карьера крупного горного предприятия // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016. № 4(44). С. 35–37. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-4-35-37>. EDN: XUXSHX.
- Babatunde A. O., Zhao Y. Q., Doyle R. J., Rackard S. M. [et al.]. On the fit of statistical and the k-C\* models to projecting treatment performance in a constructed wetland system // *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2011. Vol. 46, Iss. 5. P. 490–499. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.551729>.
- Jermakka J., Wendling L., Sohlberg E., Heinonen H. [et al.]. Potential technologies for the removal and recovery of nitrogen compounds from mine and quarry waters in subarctic conditions // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2015. Vol. 45, Iss. 7. P. 703–748. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.900238>.

## References

- Dubovik, O. S., Markevich, R. M. 2016. Improvement of biotechnology of nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater. *Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, 4, pp. 186. EDN: WHMPTT. (In Russ.)
- Zubov, M. G., Boyarenev, S. F., Zubov, G. M., Kulikov, N. I. et al. 2013. Biotechnology of wastewater treatment with immobilization of activated sludge and nitrogen removal. *Water Supply and Sanitary Technique*, 8, pp. 72–75. EDN: QZHNZX. (In Russ.)
- Ivanova, L. A., Myazin, V. A., Korneikova, M. V., Fokina, N.V. et al. 2021. It's time to clean up the Arctic. Creation of phyto-treatment system for post-treatment of mining wastewater from nitrogen compounds. *Apatity*. (In Russ.)
- Kirilina, T. V., Do Tkhi Tkhu Khang, Sirotkin, A. S. 2013. Efficiency assessment of wastewater pretreatment using unicellular and multicellular hydrobionts. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 16(8), pp. 200–203. EDN: QBIZOF. (In Russ.)
- Meshengisser, Y. M., Shchetinin, A. I., Esin, M. A. 2006. Removal of nitrogen and phosphorus by an active sludge. *Kommunalnoe khozyaistvo gorodov*, 74, pp. 36–45. (In Russ.)
- Rybnikova, L. S., Navolokina, V. Yu. 2020. Assessment of hydrosphere condition in the upper Tagil River basin (Sverdlovsk region). *Problems of Subsoil Use*, 2(25), pp. 81–89. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.02.081. EDN: OBKXMT. (In Russ.)
- Savichev, O. G. 2008. Biological wastewater treatment using bog biogeocenoses. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 312(1), pp. 69–74. EDN: JKOQVT. (In Russ.)
- Solnyshkova, M. A. 2020. Reduction of surface water pollution by inorganic nitrogen compounds in the impact zone of mining enterprises in the Murmansk region. Ph.D. Thesis. Saint Petersburg. (In Russ.)
- Solnyshkova, M. A., Pashkevich, M. A. 2018. Study of biological water purification efficiency from nitrates with bioplato. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 5(119), pp. 169–173. EDN: XSKILZ. (In Russ.)
- Khokhryakov, A. V., Studenok, A. G., Studenok, G. A. 2016. Study of processes of formation of chemical pollution of drainage water with nitrogen compounds on the example of the pit of a large mining enterprise. *Izvestiya of the Ural State Mining University*, 4(44), pp. 35–37. DOI: <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2016-4-35-37>. EDN: XUXSHX. (In Russ.)
- Babatunde, A. O., Zhao, Y. Q., Doyle, R. J., Rackard, S. M. et al. 2011. On the fit of statistical and the k-C\* models to projecting treatment performance in a constructed wetland system. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(5), pp. 490–499. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.551729>.
- Jermakka, J., Wendling, L., Sohlberg, E., Heinonen, H. et al. 2015. Potential technologies for the removal and recovery of nitrogen compounds from mine and quarry waters in subarctic conditions. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(7), pp. 703–748. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.900238>.

## Сведения об авторе

**Щеглов Глеб Андреевич** – ул. Ферсмана, 14а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, аспирант;  
e-mail: [g.scheglov@ksc.ru](mailto:g.scheglov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2870-3616>

**Gleb A. Shcheglov** – 14a Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Institute of Industrial Ecology Problems in the North KSC RAS, Ph.D. Student;  
e-mail: [g.scheglov@ksc.ru](mailto:g.scheglov@ksc.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2870-3616>

## КНИЖНАЯ ПОЛКА

### *Методические материалы для подготовки технических специалистов в новых условиях*



Электроника. Элементы электронных схем : учебное пособие / А. Б. Власов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 196 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-1482-1.

Электроника. Аналоговые элементы и узлы электронной аппаратуры : учебное пособие / А. Б. Власов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 264 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-1560-6.

Электроника. Цифровые элементы и узлы электронной аппаратуры : учебное пособие / А. Б. Власов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 216 с. : ил., табл. ISBN 978-5-9729-1598-9.

Адрес издательства:

<https://infra-e.ru/>

160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63

Тел.: 8 (800) 250-66-01, 8 (8172) 23-91-60 (доб. 204)

E-mail: [booking@infra-e.ru](mailto:booking@infra-e.ru)

Подготовка учебных пособий для отечественных технических вузов представляет интерес в связи с заявленной задачей перехода к новой системе образования, построенной на исторически подтвердивших свою значимость методах.

Проблема преподавания и изменения содержания пособий становится актуальной в связи с намеченным переходом от бакалавриата к отечественному специалитету, для которого характерна "старая" школа преподавания технических дисциплин с углубленным изучением и пояснением процессов, приборов, принципов их действия.

По тематике вопросов, включенных в различные части комплекса из трех пособий, в предыдущие годы написано множество учебников и пособий, в том числе и доктором технических наук, профессором Власовым А. Б. Тем не менее многие материалы остаются недостаточно раскрытыми для понимания студентов, в особенности с учетом сокращения контактных часов, выделяемых в рамках современных ФГОС и учебных планов, разрабатываемых вузами. Попытки замещения печатных пособий текстами, приводимыми в сети Интернет, не являются удачными и не прижились, поскольку у молодежи остается доверие к учебному материалу книги и необходимость работы с книгой.

Материалы учебных пособий собраны на основе разделов курсов лекций по темам "Судовая электроника", "Физические основы электроники", предназначенных для курсантов, обучающихся по специальности 26.05.07 "Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики", и студентов технических направлений по курсам "Электротехника и электроника" Мурманского арктического университета (ранее Мурманский государственный технический университет).

Содержание материалов в учебных пособиях связано с программами ФГОС вузов многих технических специальностей и направлений, которые характеризуются профессиональными компетенциями и способствуют выработке таких умений, как:

- осуществление в эксплуатационно-технологической и сервисной деятельности безопасного технического использования, технического обслуживания судового электрооборудования и средств автоматики, объектов водного транспорта в соответствии с требованиями международных и национальных нормативно-технических документов;
- выполнение диагностирования, технического обслуживания и ремонта электроэнергетического электрооборудования и средств автоматики;
- выбор электрооборудования и элементов систем автоматики для замены в процессе эксплуатации устройств и приборов;
- установление причин отказов электрооборудования и средств автоматики, выполнение мероприятий по их предотвращению;
- применение базовых знаний фундаментальных и профессиональных дисциплин, проведение анализа работоспособности узлов, обоснование принимаемых решений по использованию электрооборудования и средств автоматики, решение на их основе практических задач профессиональной деятельности и др.

В книге *"Электроника. Элементы электронных схем"* представлены сведения, необходимые для обучающихся при начальном ознакомлении с проблемами материалов, элементами на их основе, технологией изготовления диодов, транзисторов. Подробно излагаются вопросы, связанные с созданием и свойствами полупроводниковых материалов, элементами зонной диаграммы, проводимостью металлов, полупроводников, применяемых для создания элементов схем. Большое внимание уделяется основным компонентам электроники: нелинейным резисторам, датчикам Холла, диодам Ганна, диодам различных типов, полевым и биполярным транзисторам, тиристорам, особенностям их работы, характеристикам и технологиям изготовления.

В книге *"Электроника. Аналоговые элементы и узлы электронной аппаратуры"* последовательно рассматриваются вопросы построения и анализа работы схем на дискретных элементах, основные узлы, в том числе усилительные каскады, операционные усилители, компараторы, генераторы сигналов, перемножители. Приведены начальные сведения о силовой преобразовательной технике, в которой используются узлы аналоговой электроники: выпрямители, инверторы, преобразователи частоты и др.

В книге *"Электроника. Цифровые элементы и узлы электронной аппаратуры"* особое внимание уделено анализу работы логических элементов, представителям композиционной и последовательностной логики, триггерам, регистрам, счетчикам сигналов, шифраторам и дешифраторам, мультиплексорам и демультиплексорам, сумматорам, таймерам и другим схемам, которые лежат в основе создания узлов и схем цифровой электроники. Представлены анализ работы микросхем, детализация ответов на вопросы, которые вызывают трудности в понимании учащимися рассматриваемых материалов. Дополнительно показаны различные схемные решения формирователей импульсных сигналов и генераторов на логических элементах (мультивибраторов, одновибраторов), проведен анализ дребезга контактов и формирователей импульсов с запуском от механических переключателей.

Учебные пособия предназначены для использования в ходе самостоятельной подготовки курсантов и студентов (в том числе при дистанционном обучении), получающих начальные сведения о приборах, устройствах, схемах аналоговой и цифровой электроники, применяемых на морских судах, объектах инфраструктуры флота и береговой энергетики.

Пособия содержат расширенные списки литературы, в которых учащиеся технических специальностей могут найти необходимые источники для самостоятельного освоения специализированных вопросов, выходящих за рамки рассматриваемых материалов.

Пособия могут быть полезны учащимся старших классов школ, колледжей при изучении электроники и работе над выбором научной тематики для внешкольного обучения в молодежных научно-технических центрах (сеть детских технопарков "Кванториум", образовательный центр "Сириус" и др.).

Курсанты, студенты, а также специалисты, заинтересованные в получении материалов пособий, могут обращаться по вопросам их приобретения в издательство "Инфра-Инженерия", сделать заказы в интернет-магазинах, магазинах технической литературы г. Москвы и Санкт-Петербурга.

Кандидат технических наук, доцент Подобед Н. Е.

## **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](http://www.e.lanbook.com))
- в базе данных Applied Science & Technology Source Ultimate компании  
EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost
- в каталоге журналов открытого доступа Directory of Open Access Journals  
(DOAJ, Швеция) (URL: <https://doaj.org/toc/1997-4736>)

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

---

## **ВЕСТНИК МГТУ**

**Том 26, № 2 (апрель – июнь) 2023 г.**



---

Подписано в печать 26.06.2023  
Дата выхода в свет 30.06.2023  
Формат 60×84/8. Бумага типографская  
Печать ризографическая  
Усл. печ. л. 13.26. Тираж 500 экз. Заказ № 118.  
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