

ISSN 2949-1215



Российская Академия Наук
ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

1/2026(17)

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

0+

Российская Академия Наук
ТРУДЫ

1/2026(17)

Научно-информационный журнал
Основан в 2010 году
Выходит 4 раза в год

Кольского научного центра. Серия: Технические науки

Главный редактор — председатель
редакционного совета
академик РАН, д. г.-м. н. С. В. Кривовичев

Заместитель главного редактора
академик РАН, д. х. н. И. Г. Тананаев

Редакционный совет:
академик РАН, д. г. н. Г. Г. Матишов,
чл.-корр. РАН, д. б. н. В. К. Жиров,
чл.-корр. РАН, д. т. н. С. В. Лукичев,
чл.-корр. РАН, д. т. н. А. И. Николаев,
к. б. н. Е. А. Боровичев,
к. э. н. В. В. Дядик,
к. т. н. А. С. Карпов,
В. В. Мануковский (отв. секретарь)

Редколлегия серии:
академик РАН, д. т. н. Л. А. Смирнов,
чл.-корр. РАН, д. х. н. А. А. Вошкин,
д. т. н. Л. Г. Герасимова,
д. т. н. А. В. Горохов,
д. х. н. С. Р. Деркач,
д. т. н. Ю. Л. Жуковский,
д. х. н. А. М. Калинин,
д. т. н. Н. В. Коровкин,
д. т. н. С. И. Кривошеев,
д. х. н. С. А. Кузнецов,
д. т. н. В. А. Липин,
д. т. н. А. В. Маслобоев,
д. т. н. В. А. Маслобоев,
д. т. н. А. В. Мокеев,
д. т. н. А. Н. Назарычев,
д. т. н. А. Г. Олейник,
д. т. н. М. Н. Палатников,
д. т. н. М. Г. Попов,
д. х. н. А. М. Сафиулина,
д. ф.-м. н. Н. В. Сидоров,
д. т. н. Ю. А. Сычев,
д. т. н. А. Я. Фридман,
д. т. н. М. Г. Шишаев,
к. т. н. А. В. Бежан,
к. т. н. Т. Н. Васильева,
к. т. н. И. О. Датъев,
к. т. н. В. В. Колобов,
к. т. н. С. М. Маслобоева,
к. х. н. Е. К. Папынов,
к. т. н. В. Н. Селиванов,
к. т. н. А. М. Федоров

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр
Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН).

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-83502 от 30 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.

Научное издание

Редактор, корректор Е. Н. Еремеева
Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 28.04.2026.
Дата выхода в свет 06.05.2026.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 16,5. Заказ № 17. Тираж 300 экз.
Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя, редакции и типографии:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр РАН» (ФИЦ КНЦ РАН).
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.
Тел.: 8 (81555) 7-53-50; 7-95-95, факс: 8 (81555) 7-64-25.
Электронная почта: ksc@ksc.ru
Сайт: www.ksc.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Колобов А. Ю., Сычева Г. А.	Дилатометрическое исследование непрозрачного кварцевого стекла, синтезированного методом плазменного плавления из песка Раменского месторождения.....	5
Веляев Ю. О., Майоров Д. В.	Исследования по осветлению поверхности диоксида кремния, полученного на основе сернокислотной переработки нефелинового концентрата.....	12
Кузнецова О. Г., Больших А. О., Анохин А. С.	Получение парамолибдата аммония в процессе электрохимической переработки отходов металлического молибдена в растворах карбоната аммония.....	23
Сафиулина А. М., Лизунов А. В., Костикова Г. В., Жилов В. И., Михалюк В. С., Тананаев И. Г.	Экстракционное выделение циркония в трибутилфосфат при переработке высокоактивных радиоактивных отходов.....	29
Ведмидь Л. Б., Федорова О. М.	Влияние вариативности замещения на эволюцию структурных характеристик в манганитах $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0,0; 0,25$) ($y = 0,0; 0,1$).....	41
Гудкова Е. А., Устинова М. Н., Лебедева О. Е.	Окислительно-деструктивные процессы с участием пероксида водорода в присутствии магнийсиликатов.....	52

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Кузнецов Н. М.	Теплоснабжение потребителей Мурманской области.....	59
Селиванов В. Н.	Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2024 г.....	73
Ярошевич В. В., Губская Е. И., Карпов А. С.	Мониторинг качества электроэнергии на подстанциях промышленных предприятий: роль современных стандартов и приборов.....	83
Климов А. А.	Перспективы электроимпульсного разрушения шлаков медно-никелевых производств для последующей переработки.....	94

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАТИКА

Никонорова М. Л., Шишаев М. Г., Штангель В. А.	Типология задач автоматизированного извлечения мнений и их специфика в контексте анализа социальных медиа.....	105
Федоров А. М., Датьев И. О., Илясов М. О., Вишняков И. Г.	Автоматизированная гипертекстовая документация унаследованных систем на основе статического анализа репозиторий программного кода и генеративного искусственного интеллекта.....	115
Шестаков А. В., Зуенко А. А., Зуенко О. Н.	Возможности интеллектуализации сайта Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».....	129

1/2026(17)

Scientific journal
Published since 2010
Publication frequency — four times a year

Russian Academy of Sciences
TRANSACTIONS

Kola Science Centre. Series: Engineering Sciences

Editor-in-Chief, Editorial Council Chairman
S. V. Krivovichev, Academician of RAS,
DSc (Geology & Mineralogy)

Deputy Editor-in-Chief
I. G. Tananaev, Academician of RAS,
DSc (Chemistry)

Editorial Council:
G. G. Matishov, Academician of RAS, DSc (Geography),
V. K. Zhiron, Cor. Member of RAS, DSc (Biology),
S. V. Lukichev, Cor. Member of RAS, DSc (Engineering),
A. I. Nikolaev, Cor. Member of RAS, DSc (Engineering),
E. A. Borovichev, PhD (Biology),
V. V. Dyadik, PhD (Economy),
A. S. Karpov, PhD (Engineering),
V. V. Manukovskiy, Executive Secretary

Editorial Board:
L. A. Smirnov, Academician of RAS, DSc (Engineering),
A. A. Voshkin, Cor. Member of RAS, DSc (Chemistry),
L. G. Gerasimova, DSc (Engineering),
A. V. Gorokhov, DSc (Engineering),
S. R. Derkach, DSc (Chemistry),
Yu. L. Zhukovskiy, DSc (Engineering),
A. M. Kalinkin, DSc (Chemistry),
N. V. Korovkin, DSc (Engineering),
S. I. Krivosheev, DSc (Engineering),
S. A. Kuznetsov, DSc (Chemistry),
V. A. Lipin, DSc (Engineering),
A. V. Masloboev, DSc (Engineering),
V. A. Masloboev, DSc (Engineering),
A. V. Mokeev, DSc (Engineering),
A. N. Nazarychev, DSc (Engineering),
A. G. Oleinik, DSc (Engineering),
M. N. Palatnikov, DSc (Engineering),
M. G. Popov, DSc (Engineering),
A. M. Safiulina, DSc (Chemistry),
N. V. Sidorov, DSc (Phys. & Math.),
Yu. A. Sychev, DSc (Engineering),
A. Ya. Fridman, DSc (Engineering),
M. G. Shishaev, DSc (Engineering),
A. V. Bezhan, PhD (Engineering),
T. N. Vasileva, PhD (Engineering),
I. O. Datyev, PhD (Engineering),
V. V. Kolobov, PhD (Engineering),
S. M. Masloboeva, PhD (Engineering),
E. K. Papynov, PhD (Chemistry),
V. N. Selivanov, PhD (Engineering),
A. M. Fedorov, PhD (Engineering)

Founder — Federal State Budget Institution of Science
Federal Research Centre “Kola Science
Centre of the Russian Academy of Sciences”.

Mass Media Registration Certificate
ПИ No. ФС77-83502 issued by the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Technology and Mass Media
on June, 30 2022.

Scientific publication

Editor, proofreader Ye. N. Yeremeyeva
Technical Editor V. Yu. Zhiganov

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia.
Tel.: 8 (81555) 7-93-80. Fax: 8 (81555) 7-64-25.
E-mail: ksc@ksc.ru
www.ksc.ru

CONTENTS

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A.	Dilatometric study of opaque quartz glass synthesized by plasma melting from sand of the Ramenskoye deposit.....	5
Velyaev Yu. O., Mayorov D. V.	Studies on the surface lightening of silicon dioxide obtained on the basis of sulfuric acid processing of nepheline concentrate.....	12
Kuznetsova O. G., Bolshikh A. O., Anokhin A. S.	Production of ammonium paramolybdate by electrochemical processing of molybdenum metal waste in ammonium carbonate solutions.....	23
Safulina A. M., Lizunov A. V., Kostikova G. V., Zhilov V. I., Mihalyuk V. S., Tananaev I. G.	Extractive recovery of zirconium into tributyl phosphate during the processing of high-level radioactive waste.....	29
Vedmid L. B., Fedorova O. M.	Influence of substitution variability on the evolution of structural characteristics in manganites $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0.0; 0.25$) ($y = 0.0; 0.1$).....	41
Gudkova E. A., Ustinova M. N., Lebedeva O. E.	Oxidative-destructive processes involving hydrogen peroxide in the presence of magnesium silicates.....	52

ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Kuznetsov N. M.	Heat supply to consumers in the Murmansk region.....	59
Selivanov V. N.	Analysis of the 2024 lightning activity in the Murmansk region.....	73
Yaroshevich V. V., Gubskaya E. I., Karpov A. S.	Power quality monitoring at substations of industrial facilities: the role of up-to-date standards and instruments.....	83
Klimov A. A.	Prospects of electric pulse fracturing of copper-nickel production slags for further processing.....	94

INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER SCIENCE

Nikonorova M. L., Shishaev M. G., Shtangel V. A.	Typology of automated opinion mining problems and their specificity in the context of social media analysis.....	105
Fedorov A. M., Datyev I. O., Ilyasov M. O., Vishnyakov I. G.	Automated hypertext documentation of legacy systems based on static analysis of program code repositories and generative artificial intelligence.....	115
Shestakov A. V., Zuenko A. A., Zuenko O. N.	Opportunities for intelligentization of the FRC KSC RAS website.....	129

ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 666.192
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.001

ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРОЗРАЧНОГО КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ПЛАВЛЕНИЯ ИЗ ПЕСКА РАМЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Артем Юрьевич Колобов¹, Галина Александровна Сычева²

¹Непубличное акционерное общество «Орден Трудового Красного Знамени и Дружбы народов Первоуральский динасовый завод имени Ефима Моисеевича Гришпуна» (АО «ДИНУР»), Первоуральск, Россия

^{1, 2}Филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт" — Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова», Санкт-Петербург, Россия

¹art.kolobov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7986-4778>

²sycheva_galina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4833-7476>

Аннотация

Основным методом исследования непрозрачного кварцевого стекла, полученного методом плазменного плавления из песка Раменского месторождения, в нашей работе была высокотемпературная дилатометрия, которая позволяет не только оценить численные значения температурных коэффициентов линейного расширения, но и смоделировать процесс нагрева и охлаждения огнеупорного изделия в тепловом агрегате. Были получены изменения линейных размеров и определены температурные коэффициенты линейного расширения образцов синтезированного непрозрачного кварцевого стекла в зависимости от различных параметров (времени выдержки, температуры, скорости нагрева и цикличности «разогрева-охлаждения») на высокотемпературном дилатометре DIL-402 компании "Netzsch" (Германия). В качестве практических рекомендаций указаны возможности кратности использования огнеупорных изделий на основе кварцевого стекла при различных температурах.

Ключевые слова:

кварцевое стекло, кварцевая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, линейный размер

Финансирование:

исследование выполнено при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Филиала ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ "Курчатовский институт" — Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова» 1024030700034-2-1.4.3.

Для цитирования:

Колобов А. Ю., Сычева Г. А. Дилатометрическое исследование непрозрачного кварцевого стекла, синтезированного методом плазменного плавления из песка Раменского месторождения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 5–11. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.001.

CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

DILATOMETRIC STUDY OF OPAQUE QUARTZ GLASS SYNTHESIZED BY PLASMA MELTING FROM SAND OF THE RAMENSKOYE DEPOSIT

Artem Yu. Kolobov¹, Galina A. Sycheva²

¹Non-public Joint Stock Company "Orders of the Red Banner of Labor and Friendship of Peoples Pervouralsky Dinas Plant named after Efim Moiseevich Grishpun" (JSC "DINUR"), Pervouralsk, Russia

^{1, 2}Branch of the St. Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B. P. Konstantinov of the Kurchatov Institute Research Center—I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry, St. Petersburg, Russia

¹art.kolobov@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7986-4778>

²sycheva_galina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4833-7476>

Abstract

The main method of studying opaque quartz glass obtained by plasma melting from the sand of the Ramenskoye deposit in our work was high-temperature dilatometry which allows us not only to estimate the numerical values of the temperature coefficients of linear expansion, but also to simulate the process of heating and cooling a refractory product in a thermal unit. Linear size changes were obtained and the temperature coefficients of linear expansion of the obtained opaque quartz glass samples were determined depending on various parameters (exposure time, temperature, heating rate, and "warm-up-cooling" cycle) on a high-temperature dilatometer DIL-402 from Netzsch (Germany). As practical recommendations, the possibilities of multiple use of refractory products based on quartz glass at different temperatures are indicated.

Keywords:

quartz glass, quartz ceramics, temperature coefficient of linear expansion, linear size

Financing:

The research was carried out with the support of the federal budget on the subject of the state assignment of the Branch of the St. Petersburg Institute of Nuclear Physics named after B. P. Konstantinov of the Kurchatov Institute Research Center—I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry 1024030700034-2-1.4.3.

For citation:

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A. Bilatometric study of opaque quartz glass synthesized by plasma melting from sand of the Ramenskoye deposit // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 5–11. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.001.

Введение

К перспективным способам получения непрозрачного кварцевого стекла (НКС) как основного компонента огнеупорной кварцевой керамики следует отнести плазменное плавление, которое находит все большее применение в огнеупорной и стекольной промышленности [Kolobov, Sycheva, 2021]. Одним из важнейших теплофизических свойств для характеристики огнеупорных изделий является термостойкость (термическая стойкость, или термостабильность) — свойство материалов противостоять напряжениям, вызванным изменениями температуры. Нужно, чтобы при этом материал сохранял свои свойства и не разрушался. При расчете термостойкости следует учитывать многие влияющие на нее факторы. Прежде всего, это коэффициент теплового расширения (ТКЛР), теплопроводность, упругие свойства материала, а также форма и размер конкретного изделия [Пивинский и др., 2016; Pivinskii et al., 2016a; Pivinskii et al., 2016b; Pivinskii et al., 2017; Research..., 2018; Kolobov, Sycheva, 2020; Kolobov, Sycheva, 2021].

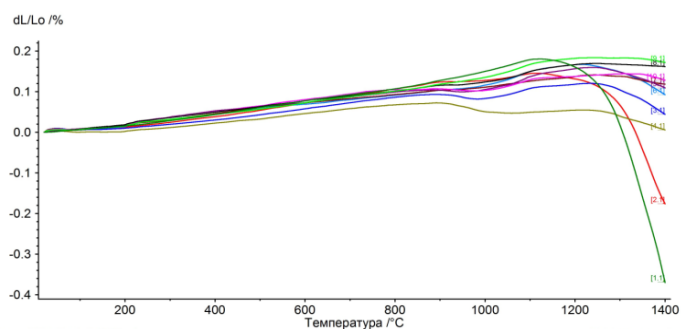
Результаты

Получены зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла для 10 циклов «нагрев-охлаждение» (рис. 1). Под циклом понимаем процесс разогрева образца кварцевого стекла с определенной скоростью (в нашем исследовании 2,5; 5 или 10 °С/мин) до определенной температуры (максимальная составляет 1400 °С и ограничена возможностями прибора) и последующим охлаждением с постоянной скоростью 10 °С/мин до 400 °С. После этой температуры охлаждение прибора и его измерительной ячейки происходит естественным образом в результате теплообмена с окружающей средой.

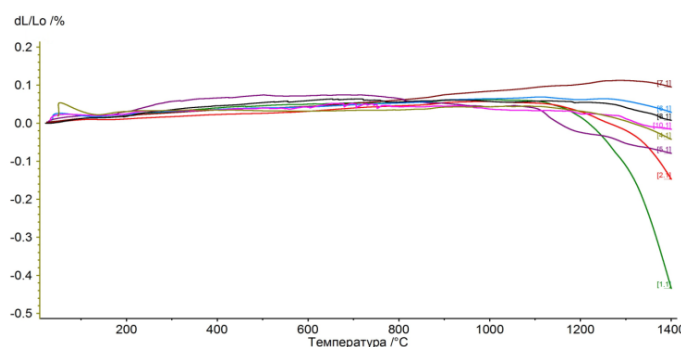
Как видно из рис. 1, всю область исследуемых температур для первичного и повторного обжига кварцевого стекла можно разбить на два достаточно четко различающихся интервала.

Первый — среднетемпературный (до 1200 °С): в этих условиях структура стекла сохраняется в основном «замороженной». При этом в стекле коэффициент расширения положителен и относительно мало меняется с изменением температуры и при повторных обжигах.

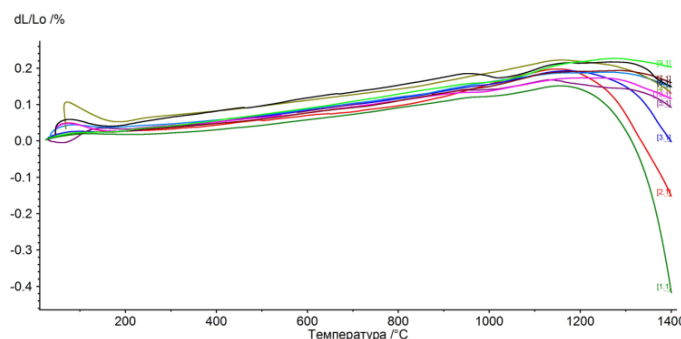
Термостойкость и ТКЛР не являются в строгом научном понимании физическими константами полифазных, поликристаллических и пористых материалов, в частности огнеупоров, керамики и ситаллов. Кварцевое стекло в процессе термообработки переходит из аморфного состояния в типичный ситалл (кристаллическая фаза кристобалита распределена в стекле) с характерной для него нано- и микроструктурой и порами разных размеров и формы. Поэтому при дилатометрии даже на одном образце можно наблюдать заметные флуктуации (колебания и несовпадения) кривых ТКЛР термообработанного кварцевого стекла. Данное явление можно объяснить так. В основе теории термостойкой фрагментальной структуры лежит микротрещиноватая структура. Согласно этой теории, объем изделия разбит микротрещинами на элементарные объемы — фрагменты. При возникновении термических напряжений образованные объемы — фрагменты — могут незначительно сдвигаться по отношению друг к другу без образования дополнительных трещин. Повышение термической стойкости как результат микротрещиноватости структуры достигается использованием смесей из двух и более кристаллических фаз с различным температурным коэффициентом линейного расширения, в нашем случае этот вновь образовавшийся кристобалит в массиве стекла. При повышении температуры и времени выдержки возрастает количество кристобалита, происходит прилипание частиц кристобалита друг к другу, их незначительный рост, а также образование микротрещин между кристаллами. Наличие в образцах значительного количества микротрещин оказывает большое влияние на все основные свойства термообработанного кварцевого стекла. Таким образом, решающее влияние на изменение линейных размеров и значения ТКЛР в исследуемых образцах будет оказывать микроструктура, которая, в свою очередь, будет зависеть от размера кристаллов и пор.



a — нагрев 2,5 °C/мин
a—heating 2.5 °C/min



б — нагрев 5 °C/мин
b—heating 5 °C/min



в — нагрев 10 °C/мин
c—heating 10 °C/min

Рис. 1. Зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла (% к начальной длине) после различных циклов термообработок от температуры:

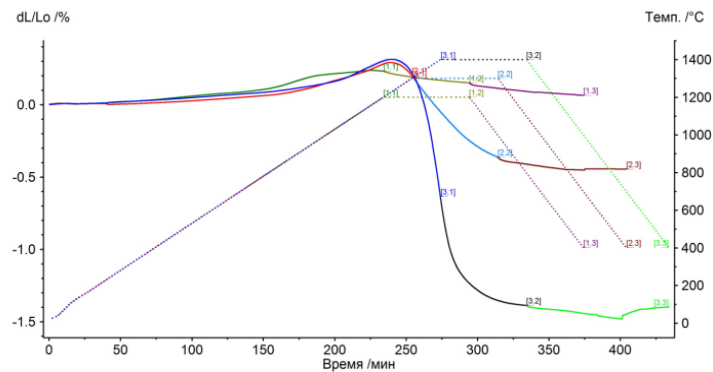
a — режим нагрева 2,5 °C/мин; *б* — режим нагрева 5 °C/мин; *в* — режим нагрева 10 °C/мин.

Нумерация кривых разогрева для всех рисунков: [1.1] — для первого цикла, [2.1] — для второго цикла, [3.1] — для третьего цикла, [4.1] — для четвертого цикла, [5.1] — для пятого цикла, [6.1] — для шестого цикла, [7.1] — для седьмого цикла, [8.1] — для восьмого цикла, [9.1] — для девятого цикла, [10.1] — для десятого цикла

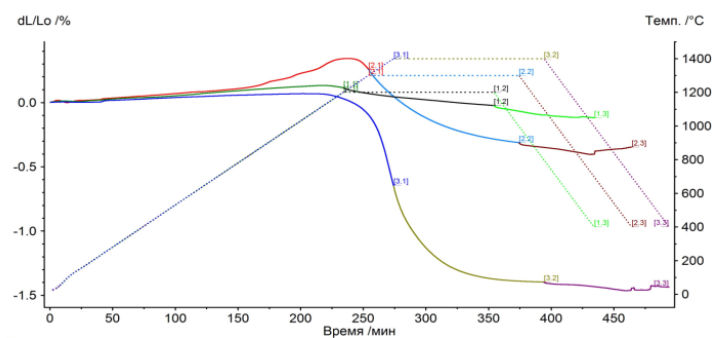
Fig. 1. Dependences of the change in the linear dimensions of quartz glass samples (% of the initial length) after different heat treatment cycles on temperature:

a—heating mode 2.5 °C/min; *b*—heating mode 5 °C/min; *c*—heating mode 10 °C/min.

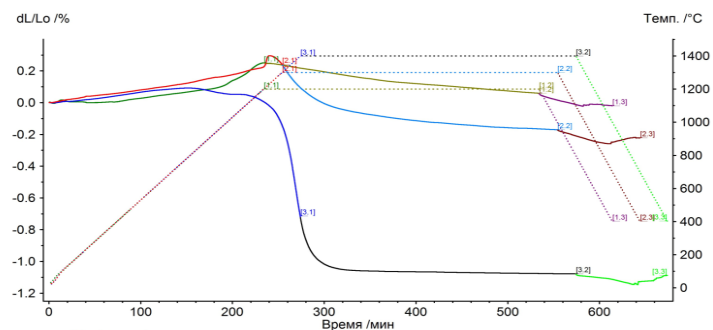
Numbering of heating curves for all figures: [1.1]—for the first cycle, [2.1]—for the second cycle, [3.1]—for the third cycle, [4.1]—for the fourth cycle, [5.1]—for the fifth cycle, [6.1]—for the sixth cycle, [7.1]—for the seventh cycle, [8.1]—for the eighth cycle, [9.1]—for the ninth cycle, [10.1]—for the tenth cycle



a — изотермическая выдержка 1 ч
a—isothermal holding for 1 h



б — изотермическая выдержка 2 ч
b—isothermal holding for 2 h



в — изотермическая выдержка 5 ч
c—isothermal holding for 5 hours

Рис. 2. Зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла (%), предварительно нагретого до $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривая *l* на всех рисунках включает следующие сегменты: [1.1] — разогрев, [1.2] — изотермическая выдержка, [1.3] — охлаждение); $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривая *l* на всех рисунках включает следующие сегменты: [2.1] — разогрев, [2.2] — изотермическая выдержка, [2.3] — охлаждение); $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (кривая *l* на всех рисунках включает следующие сегменты: [3.1] — разогрев, [3.2] — изотермическая выдержка, [3.3] — охлаждение), от времени (сплошная кривая) и температуры (пунктирная кривая) для времени выдержки 1 ч (*a*), 2 ч (*б*), 5 ч (*в*)

Fig. 2. Dependences of the change in the linear dimensions of quartz glass samples (%), preheated to $T = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (curve *l* in all figures includes the following segments: [1.1]—heating, [1.2]—isothermal holding, [1.3]—cooling), $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (curve *l* in all figures includes the following segments: [2.1]—heating, [2.2]—isothermal holding, [2.3]—cooling), $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (curve *l* in all figures includes the following segments: [3.1]—heating, [3.2]—isothermal holding, [3.3]—cooling), on time (solid curve) and temperature (dashed curve) for a holding time of 1 hour (*a*), 2 hours (*b*), 5 hours (*c*)

Второй интервал — высокотемпературный (свыше 1200 °C): в этих условиях вещество находится в метастабильном состоянии. В нем наблюдается резкая зависимость коэффициента расширения от температуры с переменной знака примерно в середине интервала.

Для последующих обжигов (после третьего цикла) два характерных интервала не определяются, изменение длины образца происходит незначительно, коэффициент теплового расширения меняется мало.

Методом РФА в исследуемых образцах фиксируется образование кристобалита, количество которого возрастает с увеличением температуры и длительности выдержки. Максимальное значение — 23 % при изотермической выдержке в течение 5 ч при 1400 °C и 35,5 % после 10 циклов «разогрев-охлаждение» до 1400 °C со скоростью нагрева 2,5 °C/мин. Другой вид смоделированных тепловых нагрузок (изотермические выдержки в течение 1, 2 и 5 ч при температурах 1200, 1300, 1400 °C) представлен на рис. 2.

На рисунках 3–4 видно, что скорость изменения линейного размера (и абсолютная величина усадки) растет с увеличением скорости нагрева. Величина усадки уменьшается с ростом числа нагревов и с ростом количества кристобалита.

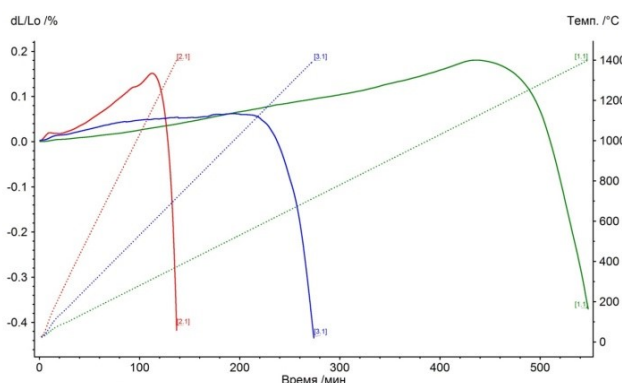


Рис. 3. Зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла (%) для первого цикла «нагрев-охлаждение» (сплошная линия) при различных скоростях нагрева и изменение температуры нагрева (пунктирная линия) от времени: [1.1] на обоих сегментах — скорость нагрева 10 °/мин; [1.2] на обоих сегментах — скорость нагрева 2,5 °/мин; [1.3] на обоих сегментах — скорость нагрева 5 °/мин

Fig. 3. Dependences of the change in the linear dimensions of quartz glass samples (%) for the first heating-cooling cycle (solid line) at different heating rates and the change in heating temperature (dashed line) on time [1.1] in both segments—heating rate 10 °/min, [1.2] in both segments—heating rate 2.5 °/min, [1.3] in both segments—heating rate 5 °/min

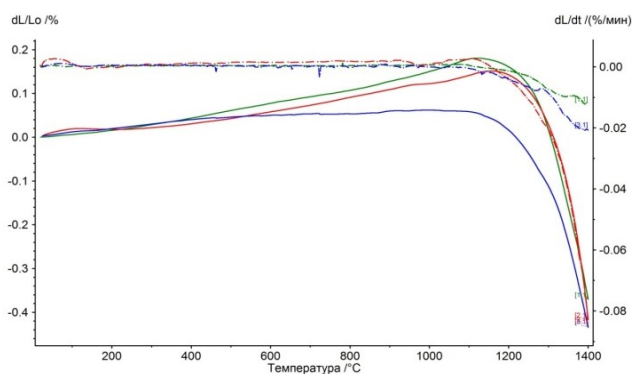


Рис. 4. Зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла (%) для первого цикла «нагрев-охлаждение» (сплошная линия) при различных скоростях нагрева и первая производная для каждой скорости нагрева (пунктирная линия) от температуры: [1.1] на обоих сегментах — скорость нагрева 10 °/мин; [1.2] на обоих сегментах — скорость нагрева 2,5 °/мин; [1.3] на обоих сегментах — скорость нагрева 5 °/мин

Fig. 4. Dependences of the change in the linear dimensions of quartz glass samples (%) for the first heating-cooling cycle (solid line) at different heating rates and the first derivative for each heating rate (dashed line) on temperature: [1.1] on both segments—heating rate 10 °/min, [1.2] on both segments—heating rate 2.5 °/min, [1.3] on both segments—heating rate 5 °/min

Выводы

На высокотемпературном dilatометре DIL-402 компании “Netzsch” (Германия) получены зависимости изменения линейных размеров образцов кварцевого стекла в различных режимах нагрева-охлаждения (скорости нагрева 2,5; 5 и 10 градусов в минуту). Специфика свойств кварцевого стекла в режиме нагрева-охлаждения определяет области его применения для производства огнеупорных изделий. Там, где необходимо многократная эксплуатация изделий, нужно использовать температуру не более 1100–1200 °С. В случае необходимости увеличения температуры до 1600 °С возможно лишь однократное применение. Впервые смоделированы процессы «разогрева-охлаждения» для полученного продукта плавки кварцевого песка с выдержкой 1, 2 и 5 ч при температурах 1200, 1300 и 1400 °С и для десяти циклов с различной скоростью разогрева 2,5; 5 и 10 °С/мин. Указаны возможности кратности использования изделий огнеупорной кварцевой керамики при различных температурах.

Список источников

Пивинский Ю. Е., Дякин П. В., Колобов А. Ю. Исследования в области получения материалов на основе ВКВС плавленного кварца. Часть 8. Влияние щелочных добавок на спекание и кристобалитизацию керамики в режиме неизотермического нагрева // Новые огнеупоры. 2016. № 1. С. 22–28. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-1-22-28>.

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A. Features of crystallization and characteristics of quartz glass obtained on JSC Dinur plasma torches from the quartz sand of the Ramenskii deposit // *Glass Physics and Chemistry*. 2020. Vol. 46, No. 3. P. 249–255. DOI: 10.1134/S1087659620030049.

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A. Synthesis of Nontransparent Quartz Glass for the Production of Refractory Quartz Ceramics // *Glass Physics and Chemistry*. 2021. Vol. 47, No.3. P. 209–218. DOI:10.1134/S1087659621030056.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 9. Effect of alkali additions on cristobalitzation and thermal expansion after nonisothermal heating // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016a. Vol. 57, No. 2. P. 135–140. DOI:10.1007/s11148-016-9942-5.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 10. Some properties of cristobalite-containing materials // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016b. Vol. 57, No. 3. P. 252–257. DOI:10.1007/s11148-016-9942-5.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 9. Preparation and properties of mixed HCBS composition: fused bauxite-corundum, quartz glass, reactive alumina. Dilatometric study of materials based on them // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017. Vol. 58, No. 1. P. 103–108. DOI:10.1007/s11148-017-0062-7.

Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high- alumina HCBS. Part 13. Effect of firing temperature on phase composition, structure, and some properties of materials based on composite composition HCBS (bauxite, electrocorundum, quartz glass) / Yu. E. Pivinskii [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. 2018. Vol. 58, No. 6. P. 652–659. DOI:10.1007/s11148-018-0163-y.

References

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A. Features of crystallization and characteristics of quartz glass obtained on JSC Dinur plasma torches from the quartz sand of the Ramenskii deposit. *Glass Physics and Chemistry*, 2020, Vol. 46, No. 3, pp. 249–255. DOI: 10.1134/S1087659620030049.

Kolobov A. Yu., Sycheva G. A. Synthesis of Nontransparent Quartz Glass for the Production of Refractory Quartz Ceramics. *Glass Physics and Chemistry*, 2021, Vol. 47, No. 3, pp. 209–218. DOI:10.1134/S1087659621030056.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 9. Effect of alkali additions on cristobalitzation and thermal expansion after nonisothermal heating. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016a, Vol. 57, No. 2, pp. 135–140. DOI:10.1007/s11148-016-9942-5.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 10. Some properties of cristobalite-containing materials. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016b, Vol. 57, No. 3, pp. 252–257. DOI:10.1007/s11148-016-9942-5.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high-alumina HCBS. Part 9. Preparation and properties of mixed HCBS composition: fused bauxite-corundum, quartz glass, reactive alumina. Dilatometric study of materials based on them. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017, Vol. 58, No. 1, pp. 103–108. DOI:10.1007/s11148-017-0062-7.

Pivinskii Yu. E., Perepelitsyn V. A., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu., Prokhorenkov D. S. Research in the field of preparing molded and unmolded refractories based on high- alumina HCBS. Part 13. Effect of firing temperature on phase composition, structure, and some properties of materials based on composite composition HCBS (bauxite, electrocorundum, quartz glass). *Refractories and Industrial Ceramics*, 2018, Vol. 58, No. 6, pp. 652–659. DOI:10.1007/s11148-018-0163-y.

Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V., Kolobov A. Yu. Issledovaniya v oblasti polucheniya materialov na osnove VKVS plavlennoogo kvarca. Chast' 8. Vliyanie shchelochnyh dobavok na spekanie i kristobalitzaciyu keramiki v rezhime neizotermicheskogo nagreva [Research in the area of preparing materials based on fused quartz HCBS. Part 8. Effect of alkali additions on ceramic sintering and cristobalitzation in a nonisothermal heating regime]. *Novye ognepuory* [New refractories], 2016, no. 1, pp. 22–28. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2016-1-22-28>.

Информация об авторах

А. Ю. Колобов — кандидат технических наук, начальник лаборатории АО «ДИНУР»;

Г. А. Сычева — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

A. Yu. Kolobov — PhD (Chemistry), Head of the Laboratory JSC «DINUR», Researcher;

G. A. Sycheva — PhD (Chemistry), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 26.12.2026; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 22.02.2026.
The article was submitted 26.12.2026; approved after reviewing 22.02.2026; accepted for publication 22.02.2026.

Научная статья
УДК 546.284-31:54.058
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.002

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОСВЕТЛЕНИЮ ПОВЕРХНОСТИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ СЕРНОКИСЛОТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Юрий Олегович Веляев¹, Дмитрий Владимирович Майоров²

¹Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия, velyaevyo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0372-2458>

²Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИХТРЭМС КНЦ РАН), Апатиты, Россия, d.maiorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>

Аннотация

Представлены результаты исследований по осветлению поверхности диоксида кремния, полученного на основе сернокислотного разложения нефелинового концентрата. В качестве осветлителя использовалась концентрированная перекись водорода, воздействие которой привело к очистке поверхности SiO₂ от сорбированных органических примесей, а также к дополнительной силанизации поверхности. Приводятся данные рентгеновской электронной микроскопии поверхности образцов кремнезема, а также данные по изменению его удельного поверхностного заряда и структурно-поверхностным свойствам до и после обработки его H₂O₂. Методами ИК-спектроскопии зафиксирован небольшой сдвиг характеристического пика O–H связей, обусловленный, вероятно, изменением в координационном окружении поверхностных Si–OH групп после обработки диоксида кремния перекисью водорода.

Ключевые слова:

нефелин, диоксид кремния, поверхность, очистка, перекись водорода

Для цитирования:

Веляев Ю. О., Майоров Д. В. Исследования по осветлению поверхности диоксида кремния, полученного на основе сернокислотной переработки нефелинового концентрата // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 12–22. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.002.

Original article

STUDIES ON THE SURFACE LIGHTENING OF SILICON DIOXIDE OBTAINED ON THE BASIS OF SULFURIC ACID PROCESSING OF NEPHELINE CONCENTRATE

Yuri O. Velyaev¹, Dmitriy V. Mayorov²

¹Sevastopol State University, Sevastopol, Russia, velyaevyo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0372-2458>

²Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” (IST KSC RAS), Apatity, Russia, d.maiorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7787-7455>

Abstract

The results of studies on the surface brightening of silicon dioxide obtained from sulfuric acid decomposition of nepheline concentrate are presented. Concentrated hydrogen peroxide was used as a brightening agent. Its action resulted in the cleansing of the SiO₂ surface from sorbed organic impurities and additional silanization of the surface. The article presents X-ray electron microscopy data on the surface of silica samples; data on the change in its specific surface charge and structural and surface properties before and after treatment with H₂O₂. IR spectroscopy revealed a slight shift in the characteristic peak of the O–H bonds, probably due to a change in the coordination environment of the surface Si–OH groups after treatment of silicon dioxide with hydrogen peroxide.

Keywords:

nepheline, silicon dioxide, surface, purification, hydrogen peroxide

For citation:

Velyaev Yu. O., Mayorov D. V. Studies on the surface lightening of silicon dioxide obtained on the basis of sulfuric acid processing of nepheline concentrate // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 12–22. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.002.

Введение

Повышение белизны поверхности аморфного диоксида кремния, получаемого из природного минерального сырья, представляет собой достаточно сложную технологическую задачу, что обусловлено

как необходимостью учитывать физико-химическую природу аморфной фазы, характеризующейся высокой удельной поверхностью и развитой системой микро- и мезопор, так и ее повышенной химической и физической активностью. Получаемый из минерального сырья диоксид кремния часто обладает низким значением такого показателя, как белизна, что обусловлено содержанием в его высокопористой структуре различных окрашивающих примесей [Reiche, Chalmin, 2013; Dutchaneerphet et al., 2018; Sensitization..., 2024]. Например, ионы железа, марганца, титана, различных органических гуминовых веществ, в случае их присутствия в местах добычи исходного сырья, не просто адсорбируются на поверхности, но и прочно хелатируются силанольными группами и внедряются в структуру каркаса кремнезема [Recent..., 2024]. Также они могут образовывать труднорастворимые соединения непосредственно в порах SiO_2 . Высокая дисперсность материала также способствует сильному светорассеянию, которое может маскировать истинный цвет, вместе с тем любая остаточная окраска, сосредоточенная в огромном объеме внутренней поверхности, становится особенно заметной и устойчивой к удалению.

Основная сложность осветления заключается в необходимости поиска компромисса между агрессивностью очистки и сохранением структуры носителя. Жесткие методы, эффективные для кварца, например высокотемпературное прокаливание или обработка плавиковой кислотой, не применимы для аморфной фазы, так как ведут к спеканию, резкому снижению удельной поверхности, рекристаллизации или полному растворению кремнеземного каркаса. Поэтому стратегия очистки строится на многоступенчатых мягких процессах, сочетающих кислотное выщелачивание для удаления свободных оксидов металлов, окислительную обработку, например, перекисью водорода [Comprehensive..., 2026] для деструкции органики и перевод железа в более растворимую форму, а также комплексообразование с лимонной, щавелевой кислотами или другими хелатантами для селективного извлечения катионов из пор без разрушения силоксановых связей $\equiv\text{Si}-\text{Si}\equiv$. При этом каждый этап должен сопровождаться тщательной отмывкой, поскольку остатки реагентов в порах могут вызвать вторичное загрязнение.

Одним из классических способов очистки аморфного кремнезема является обработка его смесью концентрированной серной кислоты и перекиси водорода обычно в соотношении 3:1 или 4:1 по объему. Этот метод значительно агрессивнее простого кипячения в перекиси. Образующаяся в реакции пероксомоносерная кислота является мощным окислителем, эффективно разрушающим даже самые устойчивые органические соединения, включая полимерные пленки и пиролизированные остатки. Одновременно серная кислота способствует дегидратации и упрочнению поверхностного слоя кремнезема, а также растворяет многие оксиды металлов. Из-за высокой экзотермичности и коррозионной опасности работа с этим реагентом требует крайней осторожности. Другим распространенным окислительным агентом выступает насыщенный раствор бихромата калия в концентрированной серной кислоте. Ионы Cr(VI) являются очень сильными окислителями, что позволяет эффективно очищать поверхность SiO_2 от органики, однако метод теряет популярность из-за высокой токсичности и экологической опасности соединений Cr(VI) , требующих сложной утилизации. Более современными и экологичными альтернативами считаются методы с использованием озона (O_3) и УФ-облучения. Обработка озоном может проводиться как в газовой фазе, так и в виде предварительно озонированной воды. При этом O_3 разлагается с образованием атомарного кислорода и радикалов, которые окисляют загрязнения. Процесс часто совмещают с ультрафиолетовым облучением для фотокаталитической генерации активных частиц. Эти методы особенно хороши для удаления следовых количеств органики без риска внесения новых ионных примесей. Для удаления специфических металлорганических комплексов иногда применяют обработку растворами комплексонов, например ЭДТА или лимонной кислотой, в сочетании с окислителями, что позволяет не только окислить органический примесный лиганд, но и перевести в раствор ионы металлов в виде хелатных комплексов.

Одним из наиболее эффективных и экологически сравнительно безопасных методов удаления органических и части неорганических примесей является кипячение в концентрированной (30–35 %) перекиси водорода. Данный процесс представляет собой мощное окислительное удаление загрязнений непосредственно в порах материала. Механизм осветления при этом комплексный. На первом этапе перекись водорода, вероятно, разлагается с образованием активных радикалов, которые неселективно и полностью окисляют любые органические, в том числе окрашенные, макромолекулы (гуминовые кислоты, остатки биоты, углеводороды) до углекислого газа и воды. На втором этапе происходит

окисление Fe(II), наиболее хромофорного и легко мигрирующего, до Fe(III). Хотя ионы железа(III) обладают окраской, в агрессивной окислительной среде при кипячении они легче переходят в растворимые, легковымываемые комплексы или гидроксиды. Особенно важным для некоторых технологических операций, таких как последующая модификация поверхности кремнезема с помощью химического и физико-химического взаимодействия с поверхностными гидроксильными группами, является эффект изменения поверхности самого кремнезема. Происходит ее дополнительное гидроксילирование, что увеличивает количество силанольных групп и может способствовать выщелачиванию некоторых ионов металлов. Таким образом, кипячение образца аморфного кремнезема в перекиси водорода может способствовать его очищению и активации его поверхности к дальнейшим технологическим операциям. При этом необходимо понимать, какими возможными загрязнителями вызвано изменение окраски кремнезема. Если это SiO₂, входящий в состав исходного вещества, например опоки [Мелконян и др., 2008; Бузаева и др., 2010; Зорина и др., 2011], то с большой вероятностью в нем могут преобладать органические примеси различной природы, а также сорбированные из почвы катионы металлов. Если же это диоксид кремния, полученный из минерального сырья [Mayogov, Velyaev, 2023; Майоров, Веляев, 2023; Recent strategy..., 2025; Shi, 2025], то необходимо знать исходный состав такого сырья, что позволит прогнозировать основные источники появления окраски. Понимание этого дает ключ к решению проблемы очистки и позволит установить, достаточно ли использовать, например, одну концентрированную перекись водорода или необходимо применять ее в тандеме с другими окислителями или комплексообразователями.

Для кремнезема, полученного из нефелинового концентрата, вероятно, характерно загрязнение конечного продукта железом [Матвеев и др., 2013], которое в количестве до 3 % содержится в исходном сырье и при этом не отделяется в виде квасцов в процессе реализации сернокислотной технологии по выделению аморфного диоксида кремния из него. Соответственно, с учетом этого факта, достаточным способом очистки будет использование концентрированной H₂O₂, которая удалит остаточные катионы железа, а также активирует поверхность кремнезема для дальнейшей ее модификации для использования в качестве селективного сорбента [Núñez et al., 2008; Веляев и др., 2024; Bagheri, Shokrollahi, 2024]. Таким образом, целью данной работы было осветление поверхности кремнезема, полученного из нефелина, путем его высокотемпературной обработки в растворе H₂O₂ и изучение морфологии поверхности, а также структурно-поверхностных свойств полученного продукта в сравнении с исходным SiO₂.

Экспериментальная часть и методы

Методика получения аморфного диоксида кремния из нефелинового концентрата (НК) состояла в следующем. НК разлагали в течение 10 мин 15 % H₂SO₄ при ее расходе 100 % от стехиометрического количества на Σ(Al₂O_{3кр.}, Na₂O, K₂O) с последующим отделением кремнеземсодержащего раствора от нерастворимого минерального остатка фильтрацией на нутч-филт্রে. Фильтрат охлаждали до 12 °С для кристаллизации из него алюмокалиевых квасцов, которые отделяли фильтрацией. Из полученного кремнийсодержащего раствора ацетоном экстрагировали SiO₂ при объемном отношении раствор:экстрагент = 3:1 в течение 30 мин в лабораторном экстракторе ПЭ-8110 фирмы «Экрос». По завершении процесса экстракт, содержащий SiO₂, отделяли от маточного раствора декантацией и упаривали на песчаной бане до образования геля SiO₂, который сушили при 105 °С с последующей водной промывкой на фильтре до достижения рН промывки ~7. Отмытый кремнезем повторно сушили при 105 °С до постоянной массы (образец 1).

Полученный образец 1 репульпировали в десятикратном по отношению к навеске SiO₂ объеме 35 % H₂O₂ с целью его осветления и гидроксילирования поверхности. Процесс вели при постоянном перемешивании со скоростью 250 оборотов в минуту с использованием верхнеприводного перемеривающего устройства ПЭ-8300 «Экрос» в течение 3,5 ч при температуре 60 °С. По завершении процесса гидроксильный диоксид кремния отделяли фильтрованием на нутч-филт্রে от раствора H₂O₂ и сушили при температуре 60 °С до постоянной массы (образец 2).

Морфология поверхности образцов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа Phenom ProX при ускоряющем напряжении 10 кВ. Рентгеноспектральный микроанализ (РСМА) проводили

при ускоряющем напряжении 15 кВ с помощью микроскопа Phenom ProX. Работы проводились в ЦКП «Перспективные технологии и материалы» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Изучение кислотно-основных свойств поверхности проводилось согласно методике Паркса [Parks, de Bruyn, 1962; Kosmulski, 2016], согласно которой в идентичных условиях проводилось потенциометрическое титрование одинаковой навески (0,5 г) каждого из полученных образцов, результаты которого сравнивались с идентичными данными для образца сравнения, которым выступал раствор электролита, а именно 0,1М NaCl. Перед началом титрования к титруемому раствору добавлялось 5 мл 0,1М NaOH. Титрование проводили 0,1М HCl. Скорость добавления титранта составляла 0,2 мл в минуту. На основании полученных данных получали зависимость удельного поверхностного заряда от pH среды. Измерение активности ионов водорода проводили на pH-метре-милливольтметре pH-420 с комбинированным электродом ЭСЛК-01.7.

Полученные образцы исследовались методом ИК-спектроскопии с использованием инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 2201 (ООО «Инфраспек», Россия) в области 4000–400 см⁻¹ (спектральное разрешение 2 см⁻¹; 16 сканов). ИК-спектр образцов снимали в таблетке KBr. Для работы с ИК-спектрометром ФСМ-2201 использовали программу FSPEC 4.3.0.7 (ООО «Инфраспек», Россия). Работы проводились в Институте развития города ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Данные по структурно-поверхностным свойствам получены методами BET и V_N на анализаторе удельной поверхности и пористости TriStar II 3020 с использованием азота в качестве газа-адсорбата. Белизну измеряли с помощью измерителя белизны WM-106.

Результаты

Электронные микрофотографии полученных образцов кремнезема представлены на рис. 1. Из рисунков видно, что обработка кремнезема перекисью водорода существенно не влияет на морфологию его частиц, которые представляют собой бесформенные агломераты, состоящие из более мелких частиц микронных размеров. Однако поверхность обработанного перекисью водорода кремнезема (см. рис. 1, б) отличается меньшей контрастностью. Уменьшение контрастности на изображении, полученном с помощью РЭМ, после обработки перекисью водорода может быть напрямую связано с двумя факторами. Во-первых, перекись эффективно окисляет и удаляет органические загрязнения с поверхности частиц кремнезема. Органический углерод обычно обладает большей вторичной электронной эмиссией и является хорошим проводником, что делает неочищенные частицы более яркими и контрастными. Удаление этого слоя может уменьшить сигнал. В данном случае при рентгеноэлементном анализе нельзя объективно оценить этот параметр, поскольку с поверхности образца мог уйти примесный углерод, но сорбироваться углекислый газ из воздуха, а также фон могла давать и углеродная подложка, на которую крепиться сам образец при его микроскопическом исследовании. Во-вторых, обработка приводит к увеличению числа поверхностных силанольных групп (Si-OH). Эти гидроксильные группы могут способствовать образованию тонкой проводящей водной плёнки, образующейся за счет адсорбции влаги из воздуха, или улучшать поверхностную проводимость, облегчая сток накопленного отрицательного заряда. В результате заряд меньше накапливается на поверхности обработанных частиц, уменьшаются артефакты зарядки, такие как пересветы и искажения, а изображение становится более равномерным, но с меньшим общим контрастом, так как разница в эмиссии электронов между частицами и подложкой сглаживается. Таким образом, эффект, представленный на рис. 1, может достигаться как комплексный результат очистки поверхности и увеличения ее гидрофильности и проводимости.

На рисунке 2 представлены данные РСМА, которые показывают увеличение содержания кислорода в поверхностном слое на 7 %, что может быть обусловлено именно ростом числа поверхностных гидроксильных групп, в то время как содержание поверхностного углерода снижается, но незначительно, на 0,2 %, что, вероятно, связано с фоновым влиянием углеродного скотча, к которому крепится образец в ходе проведения анализа. Таким образом, методами электронной микроскопии фиксируется некоторое изменение поверхности обработанного перекисью кремнезема.

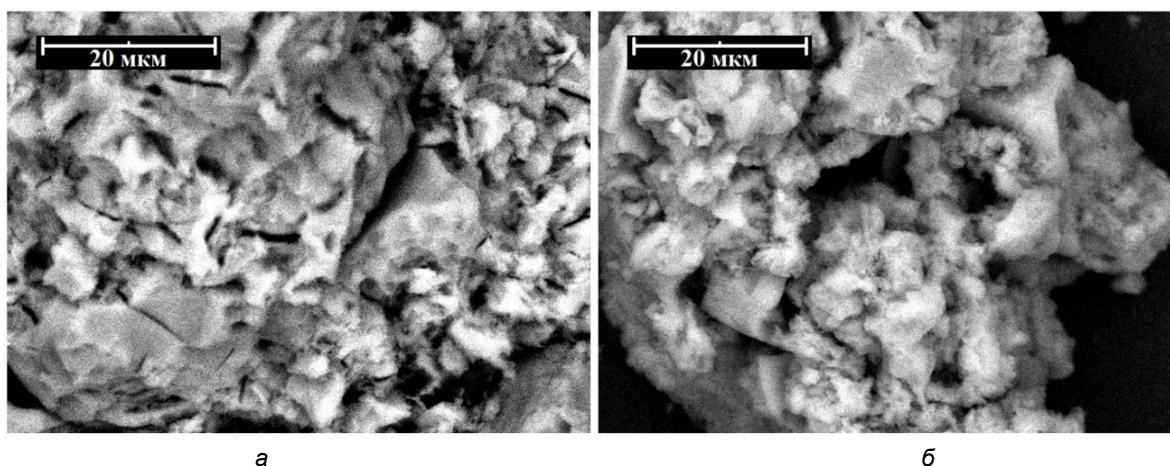


Рис. 1. Морфология образцов кремнезема:
a — исходного (1); *б* — гидроксилированного (2)

Fig. 1. Morphology of silica samples:
a—original (1); *b*—hydroxylated (2)

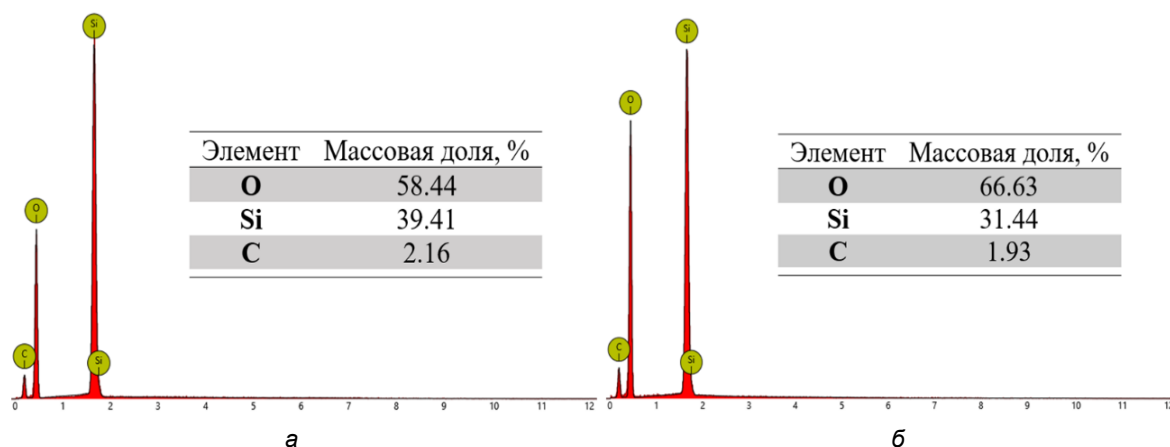


Рис. 2. Данные РСМА образцов кремнезема:
a — исходного (1); *б* — гидроксилированного (2)

Fig. 2. X-ray microanalysis data for silica samples:
a—original (1); *b*—hydroxylated (2)

Обработка перекисью водорода приводит к незначительному, но систематическому изменению электрохимических свойств поверхности кремнезема (рис. 3), что согласуется с данными электронной микроскопии. В области высоких рН в щелочной среде значения удельного поверхностного заряда для исходного и обработанного перекисью образцов практически идентичны. Это объясняется тем, что в щелочных условиях поверхность и исходного, и гидроксилированного кремнезема полностью депротонирована, ввиду чего на поверхности преобладают отрицательно заряженные группы $\equiv\text{Si-O}^-$. Дополнительные силанольные группы $\equiv\text{Si-OH}$, введенные при обработке в H_2O_2 , в этих условиях также депротонированы, поэтому их вклад в суммарный отрицательный заряд не создает существенной разницы, ввиду того что предел отрицательной заряженности уже достигнут. Ключевой эффект проявляется в кислой и близкой к нейтральной областях.

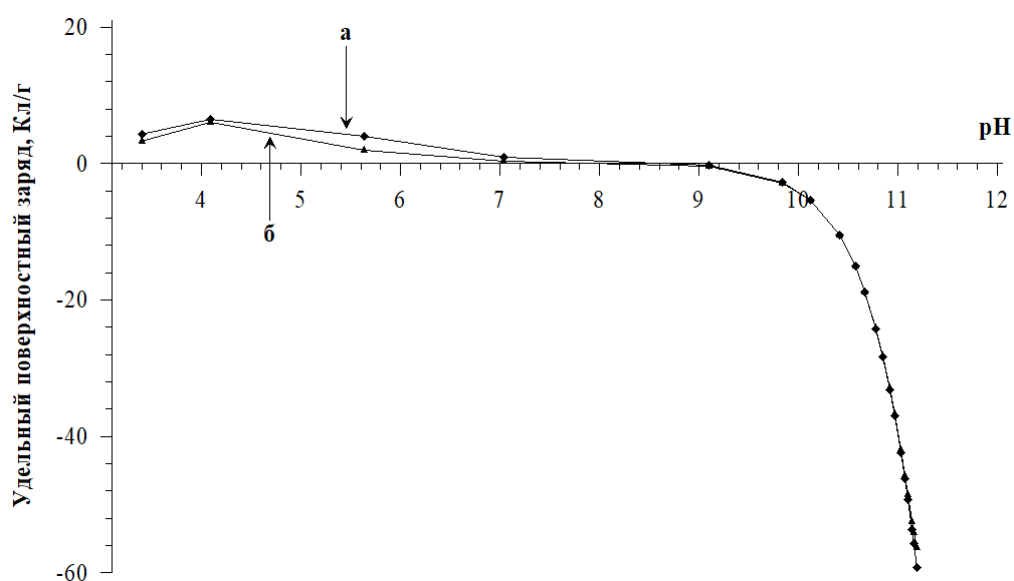


Рис. 3. Распределение удельного поверхностного заряда образцов кремнезема:
а — исходного (1); б — гидроксильированного (2)

Fig. 3. Distribution of specific surface charge of silica samples:
a—original (1); b—hydroxylated (2)

Смещение точки нулевого заряда ($\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$) с $\sim 7,95$ для исходного кремнезема до $\sim 8,30$ для гидроксильированного указывает на увеличение кислотности его поверхностных. Обработка перекисью водорода, вероятно, не только очищает поверхность SiO_2 от органических примесей, но и увеличивает концентрацию и, возможно, повышает кислотность $\equiv\text{Si-OH}$ групп. Это можно объяснить, вероятно, тем, что окисление может приводить к образованию более электроотрицательных соседей у атома кремния, связанного с гидроксильной группой. Введение даже единичных сильно электроотрицательных групп, например следов пероксидных остатков или изменения степени гидратации, в ближайшую координационную сферу повышает поляризацию связи O-H в силанольной группе. Это облегчает диссоциацию протона: $\equiv\text{Si-OH} \rightarrow \equiv\text{Si-O}^- + \text{H}^+$, тем самым повышая кислотность группы. Таким образом, обработка не просто количественно увеличивает число $\equiv\text{Si-OH}$, но и создает более кислые, «активированные» центры, что и объясняет смещение точки нулевого заряда в щелочную область. Более кислые группы легче теряют протон, поэтому для достижения нейтрального состояния поверхности требуется более высокая щелочность среды, что и наблюдается в виде смещения $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$.

В кислой среде при $\text{pH} < 5-6$ это также приводит к несколько меньшей положительной заряженности гидроксильированного образца, так как часть вновь образованных групп остается не протонированной. Таким образом, обработка в H_2O_2 делает поверхность SiO_2 более гидрофильной и химически однородной за счет увеличения числа силанольных групп, что слегка повышает ее кислотность, не влияя радикально на заряд в крайних значениях pH .

На рисунке 4 представлены ИК-спектры исходного (рис. 4, а) и гидроксильированного (рис. 4, б) кремнезёмов. На них присутствуют полосы, характерные для аморфного кремнезёма: $1094, 967, 797$ и 462 см^{-1} (а) и $1096, 967, 801$ и 466 см^{-1} (б). Пики $1094-1096$ и $797-801 \text{ см}^{-1}$ соответствуют асимметричным и симметричным валентным колебаниям связи Si-O-Si ; 967 и $462-466 \text{ см}^{-1}$ — деформационным колебаниям связей Si-OH и Si-O-Si . Пики в районе $1640-1642$ и $3448-3465 \text{ см}^{-1}$ принадлежат деформационным колебаниям молекул адсорбированной и координационно связанной воды [Synthesis..., 2024]. Следует отметить, что сдвиг широкой полосы поглощения связи O-H в сторону более высоких частот на $\sim 17 \text{ см}^{-1}$ с 3448 на 3465 см^{-1} после обработки перекисью водорода, вероятно, объясняется ослаблением водородных связей в системе. Обработка перекисью водорода

приводит к уменьшению общего количества физически адсорбированной воды, формировавшей прочную трехмерную структуру с низкочастотным сигналом. Оставшаяся вода или поверхностные силанольные группы оказываются в более изолированном и однородном окружении, образуя более слабые водородные связи либо с другими молекулами воды, либо с силанольными группами кремнезема, что и проявляется в виде сдвига пика влево на рис. 4. Таким образом, данный сдвиг указывает на успешную активацию поверхности, ее химическое «осушение» и образование менее сложной структуры.

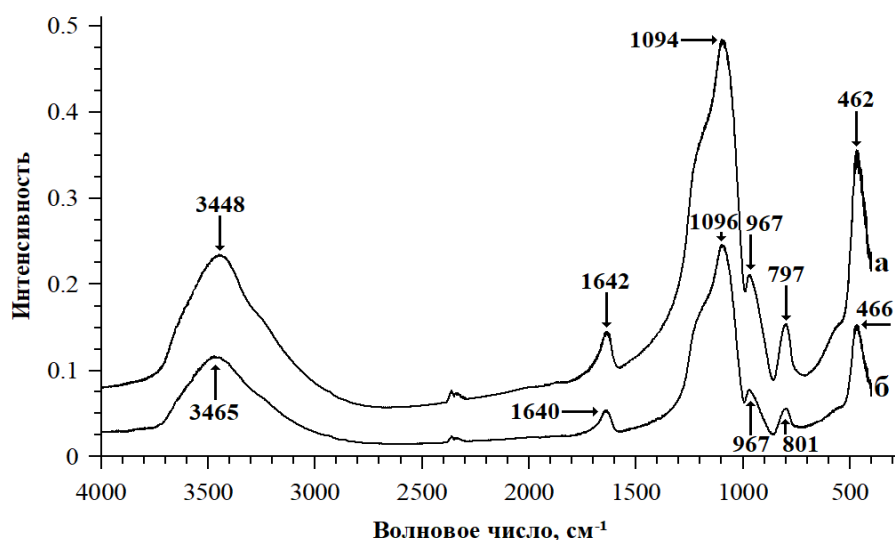


Рис. 4. ИК-спектры образцов кремнезема:
a — исходного (1); *b* — гидроксильированного (2)

Fig. 4. IR spectra of silica samples:
a—original (1); *b*—hydroxylated (2)

Структурно-поверхностные свойства исходного (1) и обработанного перекисью кремнезема (2) образцов представлены в таблице, из которой видно, что данная обработка приводит к небольшому ($\approx 3\%$), росту удельной поверхности, что происходит, вероятно, за счет тех же процессов, которые приведены выше при рассмотрении ИК-спектров данных образцов. Аналогичная картина видна при рассмотрении изотерм сорбции-десорбции азота (рис. 5) и распределения объема пор по их диаметру (рис. 6) у этих образцов кремнезема. На обеих изотермах присутствуют петли гистерезиса, характерные для мезопористых веществ и обусловленные протеканием капиллярной конденсации в мезопорах. Смыкание петель гистерезиса на всех изотермах в процессе десорбции ранее, чем относительное давление достигнет величины 0,45, говорит о практически полном отсутствии в образцах микропор с диаметром пор менее 2 нм, что подтверждается данными по распределению объема пор по их диаметру, представленными на рис. 6, а также в таблице. Кроме того, форма петель гистерезиса для обоих образцов характерна для материалов, состоящих из плоскопараллельных частиц, которым свойственна свободная моно-полислойная адсорбция, что соответствует типу В согласно классификации Дз-Бэра или типу Н3 согласно рекомендациям ИЮПАК [Gregg, Sing, 1982], а их поры обладают щелевидной структурой. Стоит отметить, что количество поглощаемого азота также практически идентично для обоих образцов. Распределение объема пор по их диаметру для обоих образцов является характерным для материалов, у которых преобладает мезопористая структура с преимущественным диаметром пор менее 20 нм. Что касается белизны кремнеземных образцов, видно, что проведенная обработка перекисью водорода привела к увеличению белизны SiO_2 с 87 до 91 усл. ед.

Структурно-поверхностные свойства образцов SiO₂ Structural and surface properties of SiO₂ samples

Параметр	Образец	
	1	2
Удельная поверхность по методу БЭТ, м ² /г	501,31	518,18
Удельная поверхность микропор, м ² /г	9,86	9,43
Удельный объем пор, нм (1,7 ≤ d ≤ 300), по методу ВЈН (десорбция), см ³ /г	0,92	0,94
Ширина пор по методу БЭТ, нм	7,24	7,16
Диаметр пор по методу ВЈН (десорбция), нм	6,10	6,04
Средний диаметр частиц (d = 6 / (S _{уд.внеш.} ·ρ) (ρ = 2200 кг/м ³), нм	5,44	5,76
Белизна, усл. ед.	87	91

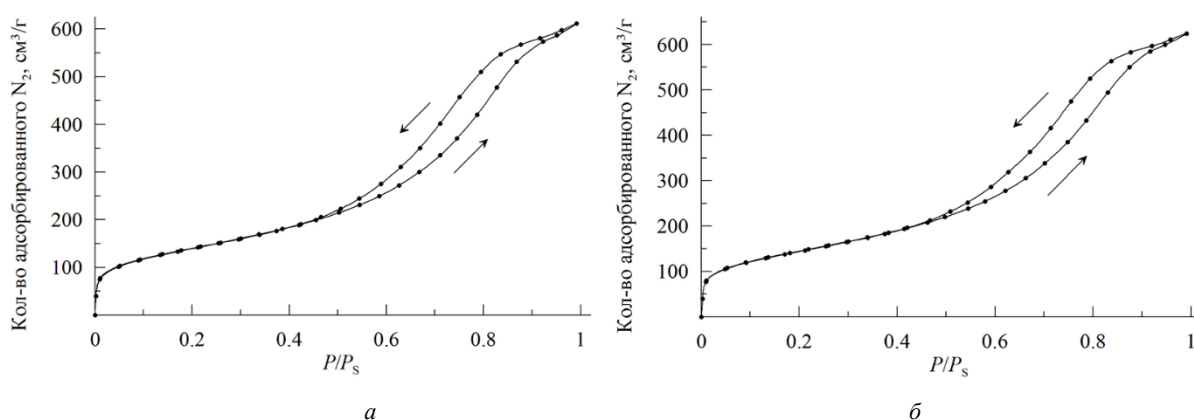


Рис. 5. Изотермы сорбции-десорбции азота образцами кремнезема:
 а — исходного (1); б — гидроксильированного (2)

Fig. 5. Nitrogen sorption-desorption isotherms by silica samples:
 a—original (1); b—hydroxylated (2)

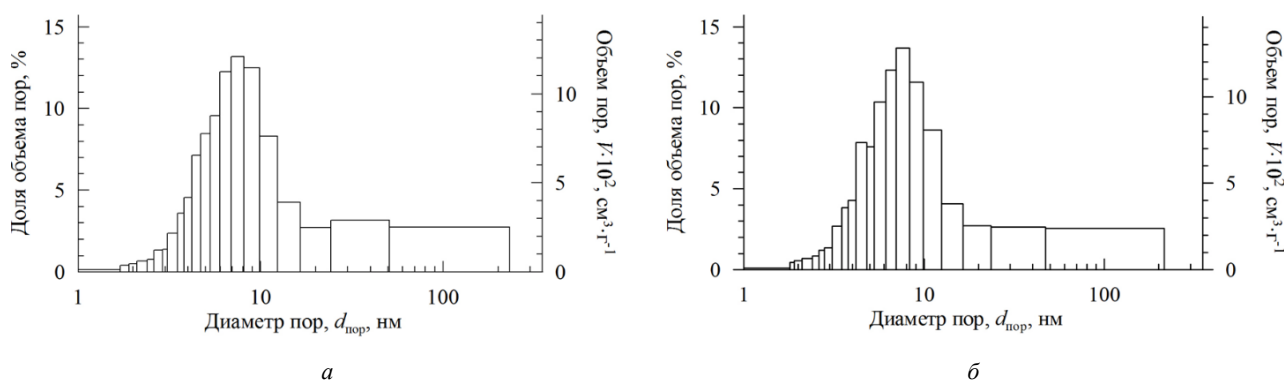


Рис. 6. Распределение объема пор по их диаметру у образцов кремнезема:
 а — исходного (1); б — гидроксильированного (2)

Fig. 6. Distribution of pore volume by diameter in silica samples:
 a—original (1); b—hydroxylated (2)

Выводы

В ходе проведения исследований получен образец осветленного кремнезема и изучены его физико-химические свойства. Обработка синтезированного образца SiO_2 перекисью водорода привела к удалению с его поверхности органических примесей и увеличению числа поверхностных силанольных групп, о чем косвенно свидетельствуют данные растровой электронной микроскопии. Данное воздействие привело к небольшому изменению кислотно-основных свойств поверхности кремнезема и сдвинуло точку его нулевого заряда в сторону большего значения pH, что свидетельствует о приобретении поверхности SiO_2 большей кислотности. Незначительный сдвиг характерного для связи O–H пика колебаний в области 3448–3465 cm^{-1} также говорит о небольшом изменении в окружении поверхностных силанольных групп кремнезема. При этом структурно-поверхностные свойства получаемого продукта практически не изменились, за исключением незначительного ($\approx 3\%$) увеличения удельной поверхности, обусловленного, по-видимому, очисткой ее от поверхностных примесей в процессе жесткой окислительной обработки кремнезема в перекиси водорода.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что использование исключительно H_2O_2 позволяет без использования других методов осветлить получаемый из нефелинового концентрата диоксид кремния без особого изменения его пористой структуры. Это может повысить его востребованность в различных сферах применения, таких как изготовление огнетушащих смесей, пищевой и фармацевтической промышленности, а также при получении на его основе модифицированных кремнезёмов, для чего важным является как химическая чистота, так и наличие гидроксильных групп на поверхности кремнезема.

Список источников

- Бузаева М. В., Климов Е. С., Кириллов А. И. Физико-химические свойства природных сорбентов Ульяновской области // Башкирский химический журнал. 2010. Т. 17, № 4. С. 37–40.
- Веляев Ю. О., Майоров Д. В., Пименов К. А. Модификация диоксида кремния, выделенного в процессе кислотной переработки нефелинового концентрата // Перспективные материалы. 2024. № 12. С. 36–45. doi 10.30791/1028-978X-2024-12-36-45.
- Зорина С. О., Афанасьева Н. И., Гревцев В. А. Литохимические и генетические особенности опок Каменоярского месторождения (Астраханская область) // Отечественная геология. 2011. № 4. С. 70–76.
- Майоров Д. В., Веляев Ю. О. О возможности использования диоксида кремния, получаемого из минерального сырья, в качестве энтеросорбента // Химическая технология. 2023. Т. 24, № 3. С. 85–92. DOI 10.31044/1684-5811-2023-24-3-85-92.
- Матвеев В. А., Веляев Ю. О., Майоров Д. В. Усовершенствование метода выделения чистого диоксида кремния из растворов от серно-кислотного разложения нефелина // Химическая технология. 2013. Т. 14, № 8. С. 453–459.
- Мелконян Р. Г., Ефремов А. Н., Дручек С. В. Диатомиты и опоки Мурманской области и Республики Карелия — перспективное сырье для получения силикатных материалов // Конструкции из композиционных материалов. 2008. № 1. С. 64–70.
- Bagheri A. R., Shokrollahi A. Recent trends in the use of silica-based materials and their composites in extraction techniques: A review // TrAC. Trends in Analytical Chemistry. 2024. Vol. 180. P. 117910. DOI 10.1016/j.trac.2024.117910.
- Comprehensive review of molecular oxygen activation technology: strategies, organic pollutants removal and other innovative applications / T. Zhong [et al.] // Separation and Purification Technology. 2026. Vol. 388. P. 136776. DOI 10.1016/j.seppur.2026.136776.
- Dutchaneephet J., Limpichaipanit A., Ngamjarurojana A. Spectroscopic property and color of bismuth silicate glasses with addition of 3d transition metals // Materials Letters. 2018. Vol. 229. P. 174–177. DOI 10.1016/j.matlet.2018.07.010.
- Gregg S. J., Sing K. S. W. Adsorption, surface area and porosity: second ed. London : Academic press, 1982. 303 p.
- Kosmulski M. Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review // Advances in Colloid and Interface Science. 2016. Vol. 238. P. 1–61. DOI 10.1016/j.cis.2016.10.005.
- Mayorov D. V., Velyaev Yu. O. Physicochemical, structural, and surface properties of silicon dioxide produced from mineral raw materials // Inorganic Materials: Applied Research, 2023. Vol. 14, № 5–6. P. 1263–1269. DOI 10.1134/s2075113323050258.
- Núñez O., Tanaka N., Nakanishi K. Preparation of monolithic silica columns for high-performance liquid chromatography // Journal of Chromatography A. 2008. Vol. 1191, No. 1–2. P. 231–252. DOI 10.1016/j.chroma.2008.02.029.

Parks G. A., de Bruyn P. L. The zero point of charge of oxides // *J. Phys. Chem.* 1962. V. 66. P. 967–973. DOI 10.1021/j100812a002.

Recent advances in heavy metals uptake by tailored silica-based adsorbents / Md. A. Taleb, R. Kumar, M. A. Barakat [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 955. P. 177093. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.177093.

Recent strategy on green synthesis of mesoporous silica from waste for a sustainable and circular economy / R. E. Nugraha [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. Vol. 13, No. 5. P. 118288. DOI 10.1016/j.jece.2025.118288.

Reiche I., Chalmin E. Synchrotron Methods: color in paints and minerals // *Treatise on Geochemistry: Second Edition*. 2013. Vol. 14. P. 209–239. DOI 10.1016/B978-0-08-095975-7.01216-X.

Sensitization and mineralization synergistically enhanced the coloration of V to Cr-doping ZrSiO₄ based jewel green pigment and its near-infrared reflection performance / Ju. Yu, F. Jiang, G. Feng [et al.] // *Ceramics International*. 2024. Vol. 50 (20). P. 38688–38697. DOI 10.1016/j.ceramint.2024.07.240.

Shi Zh. Utilizing desert sand as raw material for manufacturing silica-based materials and byproducts // *Materials Today Sustainability*. 2025. Vol. 30. P. 101120. DOI 10.1016/j.mtsust.2025.101120.

Synthesis and transport characteristics of multi-color fluorescent silica nanoparticle tracer in sandstone cores / F. Ju, Jia [et al.] // *Petroleum Science*. 2024. 22 (4). P. 1771–1786. DOI 10.1016/j.petsci.2024.12.027.

References

Bagheri A. R., Shokrollahi A. Recent trends in the use of silica-based materials and their composites in extraction techniques: A review. *TrAC. Trends in Analytical Chemistry*, 2024, Vol. 180, pp. 117910. DOI 10.1016/j.trac.2024.117910.

Buzaeva M. V., Klimov E. S., Kirillov A. I. Fiziko-khimicheskie svoystva prirodnykh sorbentov Ulyanovskoy oblasti [Physico-chemical properties of natural sorbents of the Ulyanovsk region]. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, Vol. 17, No. 4, pp. 37–40. (In Russ.).

Dutchaneephet J., Limpichaipanit A., Ngamjarurojana A. Spectroscopic property and color of bismuth silicate glasses with addition of 3d transition metals. *Materials Letters*, 2018, Vol. 229, pp. 174–177. DOI 10.1016/j.matlet.2018.07.010.

Gregg S. J., Sing K. S. W. *Adsorption, surface area and porosity*. London, Academic press, 1982, 303 p.

Jia F. J., Li H. T., Liu Z. M., Zhang G. Q., Zhang Q., H., Li H., T., Ma X., Li J. Synthesis and transport characteristics of multi-color fluorescent silica nanoparticle tracer in sandstone cores. *Petroleum Science*, 2024, 22 (4), pp. 1771–1786. DOI 10.1016/j.petsci.2024.12.027.

Kosmulski M. Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, Vol. 238, pp. 1–61. DOI 10.1016/j.cis.2016.10.005.

Matveev V. A., Velyaev Yu. O., Mayorov D. V. Usovershenstvovanie metoda vydeleniya chistogo dioksida kremniya iz rastvorov ot serno-kislotnogo razlozheniya nefelina [Improvement of the method of isolation of pure silicon dioxide from solutions from sulfuric acid decomposition of nepheline]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2013, Vol. 14, No. 8, pp. 453–459. (In Russ.).

Mayorov D. V., Velyaev Yu. O. O vozmozhnosti ispol'zovaniya dioksida kremniya, poluchaemogo iz mineral'nogo syr'ya, v kachestve enterosorbenta [On the possibility of using silica obtained from mineral raw materials as an enterosorbent]. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology], 2023, Vol. 24, No. 3, pp. 85–92. DOI 10.31044/1684-5811-2023-24-3-85-92.

Mayorov D. V., Velyaev Yu. O. Physicochemical, structural, and surface properties of silicon dioxide produced from mineral raw materials. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2023, Vol. 14, No. 5–6, pp. 1263–1269. DOI 10.1134/s2075113323050258.

Melkonyan R. G., Efremov A. N., Drucek S. V. Diatomity i opoki Murmanskoy oblasti i Respubliki Kareliya—perspektivnoe syr'e dlya polucheniya silikatnykh materialov [Diatomites and flanks of the Murmansk region and the Republic of Karelia are promising raw materials for the production of silicate materials]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite structures], 2008, No. 1, pp. 64–70. (In Russ.).

Nugraha R. E., Fauziyah N. A., Nurherdiana S. D. Recent strategy on green synthesis of mesoporous silica from waste for a sustainable and circular economy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, Vol. 13 No. 5, pp. 118288. DOI 10.1016/j.jece.2025.118288.

Núñez O., Tanaka N., Nakanishi K. Preparation of monolithic silica columns for high-performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, 2008, Vol. 1191, No. 1–2, pp. 231–252. DOI 10.1016/j.chroma.2008.02.029.

Parks G. A., de Bruyn P. L. The zero point of charge of oxides. *The Journal of Physical Chemistry*, 1962, vol. 66, pp. 967–973.

Reiche I., Chalmin E. Synchrotron Methods: color in paints and minerals. *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, 2013, Vol. 14, pp. 209–239. DOI 10.1016/B978-0-08-095975-7.01216-X.

Shi Zh. Utilizing desert sand as raw material for manufacturing silica-based materials and byproducts. *Materials Today Sustainability*, 2025, Vol. 30, p. 101120. DOI 10.1016/j.mtsust.2025.101120.

Taleb M. A., Kumar R., Barakat M. A., Almeelbi T., Seliem M. K., Ahmad A. Recent advances in heavy metals uptake by tailored silica-based adsorbents. *Science of the Total Environment*, 2024, Vol. 955, p. 177093. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.177093.

Velyaev Yu. O., Mayorov D. V., Pimenov K. A. Modifikatsiya dioksida kremniya, vydelenogo v protsesse kislотноy pererabotki nefelinovogo kontsentrata [Modification of silicon dioxide isolated during acid processing of nepheline concentrate]. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2024, Vol. 12, pp. 36–45. (In Russ.).

Yu J., Jiang F., Feng G., Zhang X., Zhang Qu., Yu Y., Jiang F., Wang T., Liu J., Wu Q. Sensitization and mineralization synergistically enhanced the coloration of V to Cr-doping ZrSiO₄ based jewel green pigment and its near-infrared reflection performance. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, No. 20, pp. 38688–38697. DOI 10.1016/j.ceramint.2024.07.240.

Zhong T., Fu Y., Chen Y., Wang Q. Comprehensive review of molecular oxygen activation technology: strategies, organic pollutants removal and other innovative applications. *Separation and Purification Technology*, 2026, Vol. 388, p. 136776. DOI 10.1016/j.seppur.2026.136776.

Zorina S. O., Afanasyeva N. I., Grevtsev V. A. Litokhimicheskie i geneticheskie osobennosti opok Kamennyarskogo mestorozhdeniya (Astrakhanskaya oblast') [Lithochemical and genetic features of the gaize Kamennyarsk deposit (Astrakhan region)]. *Otechestvennaya geologiya* [Domestic geology], 2011, No. 4, pp. 70–76. (In Russ.).

Информация об авторах

Ю. О. Веляев — кандидат технических наук, доцент;

Д. В. Майоров — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the authors

Y. O. Velyaev — PhD (Engineering), Associate Professor;

D. V. Mayorov — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 02.02.2026; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 22.02.2026.

The article was submitted 02.02.2026; approved after reviewing 22.02.2026; accepted for publication 22.02.2026.

Научная статья
УДК 544.653.22
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.003

ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМОЛИБДАТА АММОНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МОЛИБДЕНА В РАСТВОРАХ КАРБОНАТА АММОНИЯ

Ольга Геннадьевна Кузнецова¹, Артем Олегович Больших², Александр Сергеевич Анохин³

^{1, 2, 3}Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

¹olyakolya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0513-5814>

²artem.bolshih@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6816-3664>

³aanokhin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2847-1615>

Аннотация

Исследован процесс электрохимического окисления техногенных отходов металлического молибдена под действием постоянного тока в растворах карбоната аммония с достижением скорости окисления молибдена ~12 кг/м²·ч и предложена принципиальная технологическая схема получения парамolibдата аммония.

Ключевые слова:

молибден, карбонат аммония, электролиз, растворение, техногенные отходы, парамolibдат аммония

Финансирование:

государственное задание № 075-00320-26-00.

Для цитирования:

Кузнецова О. Г., Больших А. О., Анохин А. С. Получение парамolibдата аммония в процессе электрохимической переработки отходов металлического молибдена в растворах карбоната аммония // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 23–28. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.003.

Original article

PRODUCTION OF AMMONIUM PARAMOLYBDATE BY ELECTROCHEMICAL PROCESSING OF MOLYBDENUM METAL WASTE IN AMMONIUM CARBONATE SOLUTIONS

Olga G. Kuznetsova¹, Artem O. Bolshikh², Alexander S. Anokhin³

^{1, 2, 3}A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹olyakolya@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-0513-5814>

²artem.bolshih@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6816-3664>

³aanokhin@imet.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2847-1615>

Abstract

The electrochemical oxidation of industrial waste metallic molybdenum under the action of direct current in ammonium carbonate solutions was studied, the oxidation rate of molybdenum of ~12 kg/m²·h was achieved, and a basic technological scheme for the production of ammonium paramolybdate was proposed.

Keywords:

molybdenum, ammonium carbonate, electrolysis, dissolution, industrial waste, ammonium paramolybdate

Funding:

State task № 075-00320-26-00.

For citation:

Kuznetsova O. G., Bolshikh A. O., Anokhin A. S. Production of ammonium paramolybdate by electrochemical processing of molybdenum metal waste in ammonium carbonate solutions // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 23–28. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.003.

Введение

Молибден признан в России стратегически важным материалом, обеспечивающим устойчивое развитие важнейших отраслей промышленности (авиации, ракетостроения, автомобилестроения, медицины и др.) [Сайт Минприроды России, 2025]. Его преимущественно используют в качестве легирующего элемента сталей и суперсплавов с целью улучшения их механических свойств, а также стойкости к коррозии [Snaider et al., 2021; Ковтун, Wu Y et al., 2024; Марченко, 2025]. Рост потребности

в молибденовой продукции при обострении экологических проблем металлургии вызывает необходимость расширения сырьевой базы молибдена и создания зеленых технологий его извлечения, в том числе из техногенных отходов и вторичного сырья [Ануфриева и др., 1993; Шодиев и др., 2020].

Традиционная переработка металлических молибденовых отходов характеризуется сложностью технологических схем и повышенными потерями металла на переделах [Кисляков и др., 1976; Аширов и др., 1991; Зеликман, Коршунов, 1991]. Электрохимические методы позволяют проводить переработку в мягких условиях, значительно сокращая потери молибдена и обеспечивая непрерывность процесса.

До недавнего времени считалось, что наиболее простой способ получения соединений редких тугоплавких металлов (вольфрама, рения и молибдена) в товарном виде при минимальном количестве технологических операций и потерь ценных компонентов обеспечивает применение аммиачного электролита [Аширов и др., 1991; Ануфриева и др., 1993; Палант и др., 2006; Башов и др., 2010]. Однако замена гидроксида аммония на карбонат аммония значительно увеличивает электропроводность раствора и скорость электрохимического растворения тугоплавких металлов и сохраняет при этом возможность прямого получения соответствующих аммонийных солей при упаривании электролита [Кузнецова и др., 2025; Kuznetsova et al., 2025].

Ранее нами было установлено, что растворы карбоната аммония позволяют с высокой производительностью осуществлять электрохимическое растворение металлических отходов вольфрама и рения, их двойных сплавов, а также твердых и тяжелых сплавов на основе вольфрама за счет применения постоянного либо симметричного переменного тока промышленной частоты [Кузнецова и др., 2023; Кузнецова и др., 2025; Кузнецова и др., 2025; Kuznetsova et al., 2025; Кузнецова, Левчук, 2025]. Переменный ток необходим при электрохимическом растворении тяжелых вольфрамовых сплавов типа ВНЖ и ВНЖК, что вызвано необходимостью обновления поверхности растворяемых сплавов в процессе электролиза вследствие ее пассивации оксидами металлов подгруппы железа [Кузнецова и др., 2023]. Для отходов металлического рения, вольфрама и сплавов вольфрам-рений типа ВР максимальную скорость их растворения обеспечивает применение постоянного тока [Кузнецова и др., 2025; Кузнецова и др., 2025; Kuznetsova et al., 2025].

В связи с вышесказанным целью настоящей работы явилось исследование процесса электрохимического растворения отходов металлического молибдена под действием постоянного тока в растворах карбоната аммония, а также получение важного полупродукта молибдена — парамolibдата аммония.

Результаты

Было исследовано влияние концентрации карбоната аммония ($0,5 \div 1,0$ М), анодной плотности тока ($0,5 \div 2,0$ А/см²) и температуры электролита ($20 \div 50$ °С) на скорость окисления и выход по току отходов металлического молибдена (99,9 мас. % Мо), которые определялись по убыли массы молибденового анода. В качестве катода использовали стеклографит. Контроль pH среды при осаждении парамolibдата аммония из полученного электролита осуществляли с помощью pH-метра HANNA Instruments HI 98128. Содержание молибдена в электролите и порошке парамolibдата аммония проводили с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой EXPEC 6500 (Focused Photonics Inc., PRC).

Было установлено, что скорость окисления молибдена увеличивается с ростом плотности тока от ~ 3 кг/м²·ч до ~ 12 кг/м²·ч при выходе по току ~ 100 % (рассчитанном на степень окисления молибдена (+6)) и слабо зависит от концентрации карбоната аммония и температуры электролита. При этом процесс электрохимического растворения молибдена сопровождался образованием мелкодисперсного шлама черно-синего цвета, представляющего собой, согласно [Башов, 2016], смесь оксидов молибдена различного состава, что связано с многоступенчатым механизмом электрохимического окисления молибдена. Следует отметить, что электрохимическое растворение рения и вольфрама в исследуемых условиях протекает с полным переходом металлов в раствор без образования шлама [Snaider et al., 2021; Сайт Минприроды России, 2025].

Для практического использования изученного варианта переработки техногенных отходов молибденового листа предлагается принципиальная технологическая схема (рис.). Процесс проводили в гальваностатическом режиме при плотности тока $\sim 2,0 \text{ А/см}^2$, концентрации карбоната аммония $1,0 \text{ М}$ и температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до концентрации молибдена в электролите $\sim 190 \text{ г/л}$. Образованный электролизный мелкодисперсный шлам был отделен от электролита фильтрацией, в шлам перешло $\sim 10 \text{ мас. \%}$ молибдена. Молибденосодержащий электролит был нагрет и выдержан при температуре $70\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ до полного отсутствия запаха аммиака, полученный водный раствор молибдата аммония упаривали при подщелачивании водным раствором аммиака во избежание образования неоднородного продукта, содержащего димолибдат и тетрамолибдат аммония [Зеликман, Коршунов, 1991; Бромшлейн и др., 1992], раствор охлаждали до температуры $\sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Порошок парамолибдата аммония отфильтровывали на бумажном фильтре, промывали небольшим количеством дистиллированной воды и высушивали. Степень извлечения молибдена из отходов в парамолибдат аммония составила $\sim 70 \text{ \%}$. Маточный раствор и промывные воды, содержащие молибден, могут быть возвращены на стадию приготовления электролита. Электролизный шлам, представляющий собой смесь оксидов молибдена [Баешов, 2016], по мере накопления рекомендуется доокислить до MoO_3 кислородом воздуха при нагревании [Зеликман, Коршунов, 1991].



Принципиальная технологическая схема электрохимической переработки отходов металлического молибдена в растворах карбоната аммония

Schematic flow chart of electrochemical processing of metallic molybdenum waste in ammonium carbonate solutions

Помимо парамолибдата аммония, из водного раствора молибдата аммония возможно осаждение тетрамолибдата аммония [Боева и др., 2011; Аминжон, Сафаров, 2021], также процесс может быть реализован путем упаривания водного раствора молибдата аммония до сухого остатка без подщелачивания и его дальнейшего окисления до MoO_3 .

Таким образом, полученные результаты позволяют рекомендовать представленную технологическую схему электрохимической переработки отходов металлического молибдена (см. рис.) к опробованию на отечественных предприятиях, производящих тугоплавкие металлы, твердые и тяжелые сплавы. Она позволяет вовлечь техногенные отходы металлического молибдена в электрохимическую переработку различных видов металлических отходов тугоплавких металлов (отходов металлического рения, вольфрама, сплавов вольфрам-рений типа ВР, тяжелых вольфрамовых сплавов типа ВНЖ и ВНЖК, а также карбидных вольфрамовых сплавов типа ВК [Кузнецова, Левчук, 2023; Кузнецова, 2023; Кузнецова и др., 2025; Кузнецова и др., 2025; Kuznetsova et al., 2025]) с применением установленного сотрудниками ИМЕТ РАН универсального электролита — водного раствора карбоната аммония.

Выводы

Осуществлена электрохимическая переработка отходов металлического молибдена в водных растворах карбоната аммония с получением парамолибдата аммония и предложена принципиальная технологическая схема процесса.

Список источников

Kuznetsova O. G., Levchuk O. M., Anokhin A. S. Application of Ammonium Carbonate Solutions in Rhenium Scrap Recycling // Сборник трудов XVII Международного Российско-Китайского Симпозиума «Новые материалы и технологии»: в 2 т. / под ред. академика РАН К.А. Солнцева, академика РАН К. В. Григоровича, члена-корреспондента РАН В. С. Комлева. М.: Интерконтакт Наука, 2025. 704 с.

Snaider M., Simunkova L., Michaelis A. Electrochemical machining of molybdenum // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials v.101. december 2021. P. 105689.

Wu Y., Wang G., Yang M., Zhang Y. Precision electrochemical micro-machining of molybdenum in neutral salt solution based on electrochemical analysis // Micromachines. 2024. Vol. 15. P. 1191.

Аминжон Н. Б., Сафаров А. Р. Гидрометаллургическая переработка молибденосодержащего сырья и отходов молибденового производства // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2021. Т. 11, № 2. С. 26–29.

Ануфриева Г. И., Левин А. М., Палант А. А., Резниченко В. А. Анодная поляризация молибдена в аммиачных растворах // Металлы. 1993. № 3. С. 77–79.

Аширов А. Б., Гуро В. П., Расаулова С. Н. Переработка металлических отходов молибдена в электролите на основе едкого кали и аммиака // Universum: химия и биология: электр. науч. журнал. 2023. 11 (113).

Баешов А. Б., Адайбекова А. А., Абдувалиева У. А. Электрохимическое поведение молибденового электрода в растворе гидроксида натрия // Доклады национальной академии наук Республики Казахстан. 2016. Vol. 6. С. 70–76.

Баешов А. Б., Иванов Н. С., Даулетбаев А. С., Журинов М. Ж. Электрохимическое поведение молибдена в аммиачных растворах // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. 2010. № 6. С. 49–51.

Боева А. В., Баринова О. П., Кирсанова С. В. Морфология кристаллов паравольфрамата аммония при кристаллизации из водных растворов // Успехи в химии и химической технологии. 2011. № 8 (124). С. 84–86.

Бромилейн В. Е., Володин В. Ф., Глейзер С. В., Исхакова Л. Д., Короткевич И. Б., Легочкая М. А., Мороченец Е. П., Нефедов С. Г., Ясинов А. А. Способ получения парамолибдата аммония: авторское свидетельство SU 1723042 A1; опубл. 30.03.92, Бюл. № 12.

Зеликман А. Н., Коришун Б. Г. Металлургия редких металлов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1991. 432 с.

Ковтун О. Н., Марченко Н. В. Металлургия редких металлов. Молибден : учебное пособие / ред.: Н. М. Вострикова, Н. В. Миронкина. Красноярск, 2025. 136 с.

Кузнецова О. Г., Левин А. М., Анохин А. С., Левчук О. М., Больших А. О., Леонтьев В. Г. Электрохимическое получение микродисперсного порошка оксидов вольфрама из техногенных отходов металлического вольфрама под действием переменного тока в растворах карбоната аммония // Металлы. 2025. № 1. С. 78–90.

Кузнецова О. Г., Левин А. М., Конушкин С. В., Цыбин О. И., Больших А. О. Электрохимическая переработка отходов тяжелых вольфрамовых сплавов в растворах карбоната аммония // Металлы. 2023. № 1. С. 9–15.

Кузнецова О. Г., Левчук О. М. Электрохимическая переработка отходов вольфрамокобальтовых твердых сплавов в растворе карбоната аммония // Тезисы докладов. XVI Плёсская Международная научная конференция «Современные проблемы теоретической и прикладной электрохимии. Электрохимия в настоящем и будущем». (г. Плес, Ивановская обл., 22–26 сентября 2025 г.). Иваново: Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН, 2025. С. 79.

Кузнецова О. Г., Левчук О. М., Анохин А. С. Электрохимическое окисление отходов сплавов W-Re под действием постоянного и переменного тока в растворах карбоната аммония // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 190–194.

Палант А. А., Брюквин В. А., Грачева О. М. Оптимизация электрохимической переработки металлических отходов молибдена в аммиачных электролитах при наложении симметричного переменного тока // Электрометаллургия. 2006. № 9. С. 26–29.

Сайт Минприроды России. Достаточно для полного обеспечения отечественной промышленности и экспорта: всё о запасах молибдена в России. URL: https://mnr.gov.ru/press/news/dostatochno_dlya_polnogo_obespeche_niya_otechestvennoy_promyshlennosti_i_eksporta_vsye_o_zapasakh_mol/ (дата обращения: 14.07.2025).

Химия и технология редких и рассеянных элементов: учеб. пособие для хим.-технол. специальностей вузов. В 3 ч. Ч. 3 / П. С. Киндяков [и др.]. М., 1976. 320 с.

Шодиев А. Н. У., Хужакулов А. М., Олимов Ф. М. У., Ахмедова Д. А., Туробов Ш. Н. Исследование возможности извлечения редких металлов из отходов металлургического производства Узбекистана // Вестник науки и образования. 2020. № 13–1 (91). С. 26–31.

References

- Aminzhon N. B., Safarov A. R. Gidrometallurgicheskaya pererabotka molibdensoderzhashchego syr'ya i otkhodov molibdenovogo proizvodstva [Hydrometallurgical processing of molybdenum-containing raw materials and molybdenum production waste]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences], 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 26–29. (In Russ.).
- Anufriyeva G. I., Levin A. M., Palant A. A., Reznichenko V. A. Anodnaya polarizatsiya molibdena v ammiachnykh rastvorakh [Anodic polarization of molybdenum in ammonia solutions]. *Metally* [Metals], 1993, No. 3, pp. 77–79. (In Russ.).
- Ashirov A. B., Guro V. P., Rasaulova S. N. Pererabotka metallicheskih otkhodov molibdena v elektrolite na osnove yedkogo kali i ammiaka [Processing of metal waste molybdenum in an electrolyte based on caustic potash and ammonia]. *Universum: khimiya i biologiya: elektr. nauch. zhurnal* [Universum: chemistry and biology: Electric. Scientific. Journal], 2023, No. 11 (113). (In Russ.).
- Bayeshov A. B., Adaybekova A. A., Abduvaliyeva U. A. Elektrokhimicheskoye povedeniye molibdenovogo elektroda v rastvore gidroksida natriya [Electrochemical behavior of a molybdenum electrode in a sodium hydroxide solution]. *Doklady natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Reports of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], 2016, Vol. 6, pp. 70–76. (In Russ.).
- Bayeshov A. B., Ivanov N. S., Dauletbayev A. S., Zhurinov M. Zh. Elektrokhimicheskoye povedeniye molibdena v ammiachnykh rastvorakh [Electrochemical behavior of molybdenum in ammonia solutions]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan], 2010, No. 6, pp. 49–51. (In Russ.).
- Boyeva A. V., Barinova O. P., Kirsanova S. V. Morfologiya kristallov paravolframata ammoniya pri kristallizatsii iz vodnykh rastvorov [Morphology of ammonium paratungstate crystals during crystallization from aqueous solutions]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology], 2011, No. 8 (124), pp. 84–86.
- Bromshley N. Ye., Volodin V. F., Gleyzer S. V., Iskhakova L. D., Korotkevich I. B., Legochkaya M. A., Morochenets Ye. P., Nefedov S. G., Yasinov A. A. Sposob polucheniya paramolibdata ammoniya [Method for producing ammonium paramolybdate]: avtorskoye svidetel'stvo SU 1723042 A1; opubl. 30.03.92, Byul. No. 12. (In Russ.).
- Kindyakov B. G., Korshunov P. I., Fedorov P. I., Kislyakov I. P. *Khimiya i tekhnologiya redkikh i rasseyannykh elementov* [Chemistry and technology of rare and trace elements]. Moscow, 1976, chapter 3, 320 p. (In Russ.).
- Kovtun O. N., Marchenko N. V. *Metallurgiya redkikh metallov. Molibden* [Rare Metallurgy. Molybdenum]. Krasnoyarsk, 2025, 136 p. (In Russ.).
- Kuznetsova O. G., Levchuk O. M., Anokhin A. S. Application of Ammonium Carbonate Solutions in Rhenium Scrap Recycling. *Sbornik trudov XVII Mezhdunarodnogo Rossiysko-Kitayskogo Simpoziuma "Novyye materialy i tekhnologii"* [Proceedings of the XVII International Russian-Chinese Symposium "New Materials and Technologies"]. Moscow, Interkontakt Nauka, 2025, 704 p. (In Russ.).
- Kuznetsova O. G., Levchuk O. M. Elektrokhimicheskaya pererabotka otkhodov volframokobaltovykh tverdykh splavov v rastvore karbonata ammoniya [Electrochemical processing of tungsten-cobalt hard alloy waste in ammonium carbonate solution]. *Tezisy dokladov XVI Plosskaya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. "Sovremennyye problemy teoreticheskoy i prikladnoy elektrokhimii. Elektrokhiya v nastoyashchem i budushchem" (g. Ples, Ivanovskaya obl., 22–26 sentyabrya 2025 g.)* [Abstracts of the XVI Ples International Scientific Conference. "Modern Problems of Theoretical and Applied Electrochemistry. Electrochemistry in the Present and Future"]. Ivanovo, Institut khimii rastvorov im. G. A. Krestova RAN, 2025, p. 79. (In Russ.).
- Kuznetsova O. G., Levchuk O. M., Anokhin A. S. Elektrokhimicheskoye okisleniye otkhodov splavov W-Re pod deystviyem postoyannogo i peremennogo toka v rastvorakh karbonata ammoniya [Electrochemical oxidation of W-Re alloy wastes under the action of direct and alternating current in ammonium carbonate solutions]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskiye nauki* [Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences], 2025, Vol. 16, No. 1, pp. 190–194. (In Russ.).
- Kuznetsova O. G., Levin A. M., Anokhin A. S., Levchuk O. M., Bol'shikh A. O., Leont'yev V. G. Elektrokhimicheskoye polucheniye mikrodispersnogo poroshka oksidov volframa iz tekhnogennykh otkhodov metallicheskogo volframa pod deystviyem peremennogo toka v rastvorakh karbonata ammoniya [Electrochemical production of microdispersed tungsten oxide powder from technogenic tungsten metal waste under the action of alternating current in ammonium carbonate solutions]. *Metally* [Metals], 2025, No. 1, pp. 78–90. (In Russ.).
- Kuznetsova O. G., Levin A. M., Konushkin S. V., Tsybin O. I., Bol'shikh A. O. Elektrokhimicheskaya pererabotka otkhodov tyazhelykh volframovykh splavov v rastvorakh karbonata ammoniya [Electrochemical processing of heavy tungsten alloy waste in ammonium carbonate solutions]. *Metally* [Metals], 2023, No. 1, pp. 9–15. (In Russ.).
- Palant A. A., Bryukvin V. A., Gracheva O. M. Optimizatsiya elektrokhimicheskoy pererabotki metallicheskih otkhodov molibdena v ammiachnykh elektrolitakh pri nalozhenii simmetrichnogo peremennogo toka [Optimization of electrochemical processing of metal waste molybdenum in ammonia electrolytes with the application of symmetrical alternating current]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2006, No. 9, pp. 26–29. (In Russ.).

Sajt Minprirody Rossii. Dostatochno dlya polnogo obespecheniya otechestvennoj promyshlennosti i eksporta: vsyo o zapasah molibdena v Rossii [The Russian Ministry of Natural Resources website. Sufficient to fully supply domestic industry and exports: all about molybdenum reserves in Russia]. (In Russ.). Available at: https://mnr.gov.ru/press/news/dostatochno_dlya_polnogo_obespecheniya_otchestvennoy_promyshlennosti_i_eksporta_vsye_o_zapasakh_mol/ (accessed 14.07.2025).

Shodiyev A. N. U., Khuzhakulov A. M., Olimov F. M. U., Akhmedova D. A., Turobov Sh. N. Issledovaniye vozmozhnosti izvlecheniya redkikh metallov iz otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva Uzbekistana [Study of the possibility of extracting rare metals from waste of metallurgical production in Uzbekistan]. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education], 2020, No. 13-1 (91), pp. 26–31.

Snaider M., Simunkova L., Michaelis A. Electrochemical machining of molybdenum. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, Vol. 101, p. 105689.

Wu Y., Wang G., Yang M., Zhang Y. Precision electrochemical micro-machining of molybdenum in neutral salt solution based on electrochemical analysis. *Micromachines*, 2024, Vol. 15, p. 1191.

Zelikman A. N. Korshunov B. G. *Metallurgiya redkikh metallov* [Metallurgy of rare metals]. Moscow, Metallurgiya [Metallurgy], 1991, 432 p. (In Russ.).

Информация об авторах

О. Г. Кузнецова — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

А. О. Больших — младший научный сотрудник;

А. С. Анохин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

O. G. Kuznetsova — Ph.D (Engineering), Leading Researcher;

A. O. Bolshikh — junior researcher;

A. S. Anokhin — Ph.D (Engineering), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 22.02.2026.

The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 22.02.2026; accepted for publication 22.02.2026.

Научная статья

УДК 541.61

doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.004

ЭКСТРАКЦИОННОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ЦИРКОНИЯ В ТРИБУТИЛФОСФАТ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ВЫСОКОАКТИВНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Алфия Минеровна Сафиулина^{1, 2}, Алексей Владимирович Лизунов³,
Галина Валерьевна Костикова⁴, Валерий Иванович Жилое⁵,
Виктор Сергеевич Михалюк⁶, Иван Гундарович Тананаев^{7, 8}**

^{1, 3}Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара, Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

^{4, 5}Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия

⁶ООО «ГК Энергоинжиниринг», Екатеринбург, Россия

⁷Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

⁸Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук (ИХТРЭМС КНЦ РАН)», Апатиты, Россия

¹AMsafiulina@bochvar.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3107-6086>

³AVLizunov@bochvar.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4299-6681>

⁴galyna_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5740-0038>

⁵zhilov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6013-7936>

⁷i.tananaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

Аннотация

Разработана адаптированная к существующей аппаратурной схеме PUREX-процесса технология экстракционного выделения циркония(IV) из растворов высокоактивных отходов на примере модельных в трибутилфосфат в углеводородном разбавителе. Проведено экспериментальное моделирование рассчитанного 5-ступенчатого противоточного каскада, показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Выбраны способы рекстракции Zr^{4+} из нагруженной органической фазы, определено количество ступеней исчерпывания Zr^{4+} из нагруженной органической фазы в выбранных условиях. Предложена принципиальная технологическая схема экстракционного метода выделения циркония из ВАО, не требующая кардинальной реконструкции действующих высокоактивных производств переработки ОЯТ.

Ключевые слова

экстракция, цирконий, фосфорорганические соединения, трибутилфосфат, противоточный каскад, переработка ОЯТ, замкнутый ядерный топливный цикл

Для цитирования:

Экстракционное выделение циркония в трибутилфосфат при переработке высокоактивных радиоактивных отходов / А. М. Сафиулина [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 29–40. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.004.

Original article

EXTRACTIVE RECOVERY OF ZIRCONIUM INTO TRIBUTYL PHOSPHATE DURING THE PROCESSING OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE

**Alfiya M. Safiulina^{1, 2}, Aleksey V. Lizunov³, Galina V. Kostikova⁴, Valeriy I. Zhilov⁵, Victor S. Mihalyuk⁶,
Ivan G. Tananaev^{7, 8}**

^{1, 3}Advanced Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A. A. Bochvar, Moscow, Russia

²Mendeleev Russian State Technical University, Moscow, Russia

^{4, 5}Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry RAS (IPCE RAS), Moscow, Russia

⁶The EnergoEngineering Group of Companies, Yekaterinburg, Russia

⁷Federal Research Center “Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

⁸Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences” (ICT KSC RAS), Apatity, Russia

¹AMSafulina@bochvar.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3107-6086>

³AVLizunov@bochvar.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4299-6681>

⁴galyna_k@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5740-0038>

⁵zhilov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6013-7936>

⁷i.tananaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

Abstract

A technology for the extraction of zirconium (IV) from solutions of high-level waste, adapted to the existing equipment scheme of the PUREX process, has been developed using the example of model solutions in tributyl phosphate in a hydrocarbon diluent. An experimental simulation of the calculated 5-stage counter-current cascade was carried out, and good agreement between the calculated and experimental results was shown. The methods for re-extraction of Zr^{4+} from the loaded organic phase were selected, the number of stages of exhaustion of Zr^{4+} from the loaded organic phase under the selected conditions was calculated. A fundamental technological scheme for the extraction method of zirconium recovery from Eastern Administrative Okrug is proposed which does not require a radical reconstruction of existing high-level nuclear fuel reprocessing facilities.

Keywords:

extraction, zirconium, organophosphorus compounds, tributyl phosphate, countercurrent cascade, spent nuclear fuel reprocessing, closed nuclear fuel cycle

For citation:

Extractive recovery of zirconium into tributyl phosphate during the processing of high-level radioactive waste / A. M. Safulina [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 29–40. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.004.

Введение

Отработанное ядерное топливо (ОЯТ) остается ценным сырьем для повторного использования, несмотря на исчерпание энергетического потенциала для реакторной эксплуатации [Status..., 2011; Адамов и др., 2012; Тананаев и др., 2016; Адамов и др., 2021; Gutorova et al., 2024]. Переработка ОЯТ концептуально аналогична переработке концентрата любого комплексного полиметаллического минерала для извлечения содержащихся в нем ценных элементов. В данном случае «руда», или, по сути, концентрат, представляет собой твердый керамический диоксид урана с рядом других элементов (в общей сложности около 4 % [Шмелев, 2008]), включая как продукты деления, так и актиниды, образующиеся в реакторе. Кроме диоксида урана на переработку с ОЯТ поступают и конструкционные материалы (ТВС — тепловыделяющая сборка), содержащие в основной массе металлический цирконий. Основные ключевые стадии переработки ОЯТ заключаются: в выдержке (охлаждении) в бассейнах сроком 3–10 лет; транспортировке ОЯТ на перерабатывающее предприятие; механической подготовке (резка ТВС); волоксации ОЯТ — в дополнительном окислении при термической обработке в атмосфере кислорода; химическом растворении в азотной кислоте; гидрометаллургическом выделении и последующем разделении компонентов с извлечением ценных материалов — урана и плутония, пригодных для повторного использования в ядерных реакторах; кондиционировании радиоактивных отходов (РАО) для минимизации их объема и активности.

Все коммерческие заводы по переработке топлива используют хорошо зарекомендовавший себя гидрометаллургический процесс PUREX (извлечение плутония и урана), который очень эффективно разделяет уран и плутоний. Это включает растворение топливных элементов в концентрированной азотной кислоте. Затем осуществляется химическое разделение урана и плутония с помощью экстракции растворителем (при необходимости также может быть извлечен нептуний, который может использоваться для производства Pu-238 для термоэлектрических генераторов космических аппаратов). Pu и U могут быть возвращены на входную сторону топливного цикла — уран на завод по переработке перед обогащением, а плутоний непосредственно на производство МОКС-топлива [Status..., 2011].

В настоящее время цирконий рассматривается в ОЯТ как компонент радиоактивных отходов, а не как ценный продукт. В технологических схемах (PUREX и др.) основное внимание уделяется выделению урана и плутония. Цирконий удаляется вместе с другими продуктами деления в форме твердых осадков, которые подвергаются остекловыванию или захоронению. Хотя цирконий не является

делящимся материалом и не представляет прямой энергетической ценности, его выделение из ОЯТ преследует несколько важных технологических и экономических целей. Основное количество циркония в ОЯТ образуется при делении урана (выход по сумме изотопов составляет 3–4 кг/т ОЯТ) и находится в топливном материале, но, кроме этого, при переработке образуется и значительное количество металлического циркония из материала трубок тепловыделяющих элементов ТВС. В настоящей работе рассматривается задача выделения циркония, образующегося в топливном материале.

Цирконий в природе встречается в виде смеси пяти стабильных изотопов: ^{90}Zr (51,46 %), ^{91}Zr (11,23 %), ^{92}Zr (17,11 %), ^{94}Zr (17,4 %) и ^{96}Zr (2,8 %). Взаимодействие с нейтронами, возникающее при облучении оболочек и конструктивных материалов ТВС (сплав на основе циркония и ниобия), приводит к образованию β -активных изотопов ^{94}Nb (период полураспада $1,8 \cdot 10^4$ лет) и ^{93}Zr (период полураспада $1,5 \cdot 10^6$ лет). После облучения ТВС подвергаются механическому разрушению и растворению. Измельченный металлический остаток также захоранивается из-за высокой радиоактивности [Способ обработки..., 2013; Способ разделения..., 2000; Способ получения..., 2018]. Его активность обусловлена присутствием остатков топлива и изотопа ^{94}Nb ($2,96 \cdot 10^7$ Бк/г для β -излучения и $3,7 \cdot 10^4$ Бк/г для α -излучения). Для возврата циркония, который хранится в виде ВАО, в промышленный оборот, а также для применения природного циркония в оболочках новых топливных сборок (ТВС) без образования радиоактивного изотопа ^{93}Zr рекомендуется выделять из них стабильный изотоп ^{90}Zr . Стоит отметить, что ^{90}Zr при облучении нейтронами практически не активируется и обладает наименьшим сечением захвата тепловых нейтронов среди всех изотопов циркония. Для решения задачи выделения стабильного ^{90}Zr используется прием электромагнитной сепарации из тетрагидридной или тетрафторидной смеси [Способ обработки..., 2013; Способ разделения..., 2000; Способ получения..., 2018]. Поиск методов, не требующих кардинальной реконструкции действующих высокоактивных производств (например, установки большого количества дополнительных ступеней), является приоритетом при разработке предлагаемой модифицированной гидрометаллургической технологии переработки ОЯТ и кондиционирования ВАО. Предлагаемые варианты модификации ориентированы на встраивание в существующую аппаратную схему PUREX-процесса с минимальными ее изменениями. Кроме того, данная научно-исследовательская работа направлена на усовершенствование имеющихся технологических решений переработки ОЯТ, в частности рафинирования циркония, а также на получение новых теоретических основ при экстракционном распределении циркония в системе с ТБФ.

Целью данной работы является разработка технологии экстракционного выделения катионов циркония из растворов высокоактивных отходов на примере модельных с использованием в качестве экстрагента раствора трибутилфосфата (ТБФ) в декане (30 об. %, или 1,19 моль/л по ТБФ).

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментов по экстракции циркония (IV) использовали модельный раствор, имитирующий состав ВАО, исходя из расчетного количества компонентов высокоактивных отходов относительно 1 тонны перерабатываемого ОЯТ (табл. 1) [Шмелев, 2008].

Раствор готовили растворением нитратных солей металлов (х. ч., ООО «АО Реахим»), приведенных в табл. 1, в растворе азотной кислоты (о. с. ч., ООО «АО Реахим»). Молибден вводили в виде полимолибдата аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (х. ч., ООО «АО Реахим»). Нитрат циркония $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$ готовили кипячением в течение 72 ч $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (х. ч., АО «Химреактивснаб») в концентрированной азотной кислоте с обратным холодильником с последующим отделением нерастворившегося осадка.

В качестве экстрагента использовали 30 об. % раствор трибутилфосфата (ТБФ) в декане марки «х. ч.» (АО «ЭККОС-1»). Экстрагент предварительно очищали от примесей промывкой 5 мас. % раствором карбоната натрия в воде с последующей промывкой водой. Операцию проводили дважды. Эксперименты по экстракции циркония(IV) проводили в статических условиях при соотношении объемов органической и водной фаз 2,5:1 и температуре 20 ± 1 °С. Перемешивание фаз осуществляли в течение 3 мин в ротационном смесителе (80 об./мин). Этого времени было достаточно для установления равновесия в системе, что подтверждено контрольным опытом с 20-минутным контактированием фаз. Фазы разделяли центрифугированием. После разделения фаз отбирали пробы на анализ. Оперативный контроль распределения Zr^{4+} осуществляли комплексонометрическим титрованием с Трилоном Б, для азотной кислоты — кислотно-основным титрованием.

Таблица 1

Содержание элементов в модельном растворе, имитирующем ВАО

The content of elements in a model solution simulating high-altitude waste

Элемент	Концентрация (г/л) элемента в растворе 3,92 моль/л HNO ₃
Na	3,30
K	0,33
Cs	3,00
Mg	0,10
Ca	0,33
Sr	3,50
Ba	1,00
Al	0,33
PЗЭ	18,7
Zr	2,90
Pb	0,10
Cr	0,33
Mn	0,33
Fe	8,60
Ni	0,04
Mo	3,30

Концентрации компонентов имитирующего раствора ВАО в азотнокислых средах после предварительной пробоподготовки определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП) на приборе Agilent 7500ce (“Agilent Technologies” США) с прослеживаемостью к государственным стандартам. Концентрацию растворов HNO₃ определяли потенциометрическим титрованием 0,1 моль/л NaOH с использованием рН-метра/кондуктометра S470 Seven Excellence™ (Mettler Toledo) с точностью ±0,01 ед. рН, при этом концентрацию раствора NaOH уточняли аттестованным раствором (фиксаналом). Для всех случаев проводили не менее пяти независимых опытов. Суммарная погрешность полученных результатов составляла ~20 %, учитывая неисключенную и случайную составляющие.

Результаты и обсуждение

Механизм экстракции четырехвалентного циркония в ТБФ с образованием негидратированного комплекса дисольвата Zr(IV) исследован и подробно описан в работе [Блажева и др., 2008]:



Перед началом экспериментальной работы представлялось целесообразным провести одностадийное выделение Zr(IV) из модельного раствора ВАО в 30 об. % ТБФ в декане для выявления эффективности данного процесса (рис. 1).

При проведении однократного контакта выявлена высокоселективная экстракция Zr(IV) из модельного раствора ВАО в ТБФ, в одну стадию извлеклось около 60 %, в то же время по остальным компонентам извлечение не превысило 3 %. Кроме того, необходимо отметить, что образование третьих фаз не наблюдалось, видимое расслаивание фаз происходило за секунды. Высокая селективность экстракции Zr(IV) создает предпосылки использования этой системы для успешного решения задачи выделения циркония(IV) из ВАО.

Для теоретического моделирования экстракционного процесса и определения количества ступеней с целью полного извлечения в органическую фазу Zr(IV) необходимы данные по изотерме экстракции его с системе раствор ВАО — 30 об. % ТБФ в декане — ~3 моль/л HNO₃. Попытка использования данных [Николотова, Карташова, 1976; Пузиков и др., 2020] успеха не имела, поскольку

солевой фон растворов, на которых были получены изотермы экстракции Zr(IV) в этих работах, сильно отличался от условий поставленной задачи. Вследствие этого был выполнен предварительный эксперимент по получению изотермы экстракции Zr(IV) из модельного раствора ВАО, состав которого приведен в табл. 1. Экстракционное равновесие циркония(IV) и азотной кислоты при контакте модельного раствора ВАО с раствором ТБФ изучали методом изменения объемов фаз. Этот метод позволяет оперировать многокомпонентными растворами, не опасаясь, что по какому-либо компоненту не будет достигнуто равновесие (рис. 2, а, б).



Рис. 1. Степень извлечения Zr(IV) при экстракции из модельного раствора ВАО.
 Водная фаза — модельный раствор ВАО в 3,92 М HNO₃.
 Органическая фаза — 30 об. % ТБФ в декане. О:В = 1:1. Время контакта 20 мин

Fig. 1. Zr(IV) recovery from a model HLW solution.
 Aqueous phase: model HLW solution in 3.92 M HNO₃.
 Organic phase: 30 vol.% TBP in decane. A:W = 1:1. Contact time: 20 min.

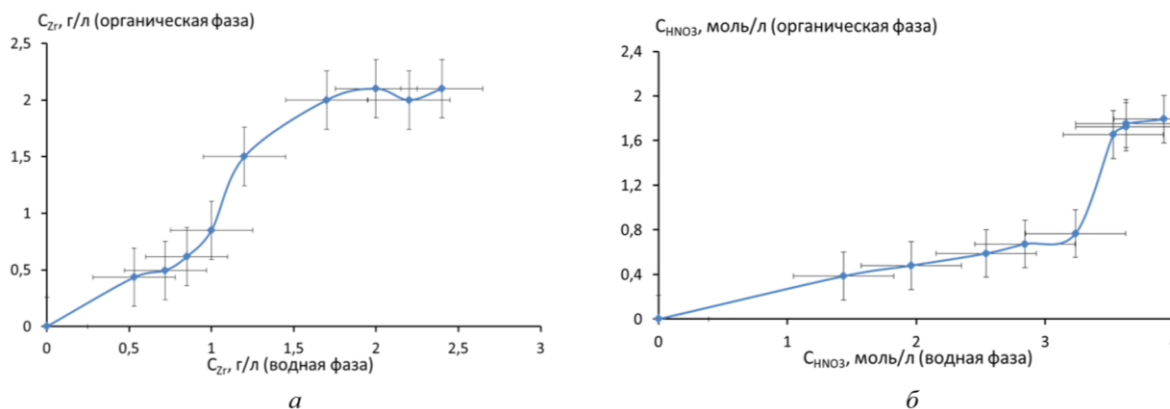


Рис. 2. Изотермы экстракции циркония(IV) (а) и азотной кислоты (б)
 в системе модельный раствор ВАО — 3,92 М HNO₃ — 30 об. % ТБФ в декане

Fig. 2. Extraction isotherms of zirconium(IV) (a) and nitric acid (b)
 in the system: model solution of HAO—3.92 M HNO₃—30 vol. % TBP in decane

Расчет числа теоретических ступеней экстракции проводили графическим методом по диаграмме Тиле МакКэба [Дытнерский, 1991], который заключается в построении ступеней изменения концентрации катиона Zr⁴⁺ между равновесной (изотерма экстракции, см. рис. 2, а) и рабочей линиями (рис. 3).

$$A(x_n - x_k) = S(y_k - y_n) \quad (2)$$

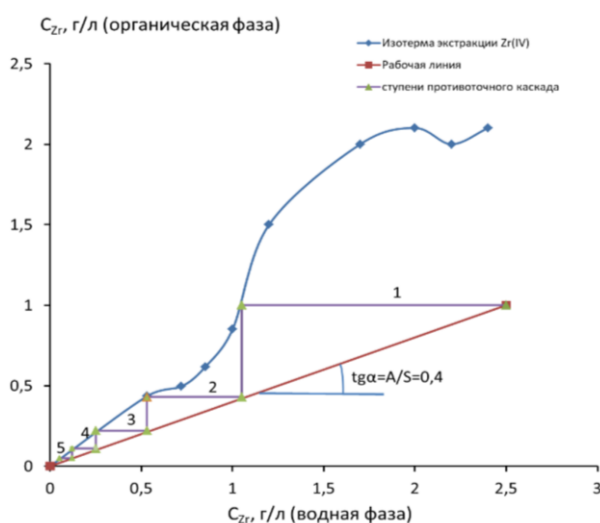


Рис. 3. Графический расчет числа теоретических ступеней экстракции циркония(IV) в системе модельный раствор ВАО — 3,92 М HNO₃ — 30 об. % ТБФ в декане при 20 °С: 1–5 — теоретические ступени экстракции, экспериментальные и расчетные данные представлены с учетом суммарной погрешности 20 %

Fig. 3. Graphical calculation of the number of theoretical stages of zirconium(IV) extraction in the system of a model solution of HLW—3.92 M HNO₃—30 vol. % TBP in decane at 20 °C: 1–5—theoretical stages of extraction, experimental and calculated data are presented taking into account a total error of 20 %

Общий вид уравнения рабочей линии: A — поток водной фазы; S — поток органической фазы; x_n, x_k — начальная и конечная концентрации Zr(IV) в водной фазе, г/л; y_n, y_k — начальная и конечная концентрации Zr(IV) в органической фазе, г/л.

Выбор отношения О:В (A/S), численно равного тангенсу угла наклона рабочей линии на рис. 3, осуществляли итерационно варьированием различных его значений, критериями оптимальности служили минимальное количество необходимых ступеней экстракции и отсутствие пересечения равновесной и рабочей линии при выбранном значении О:В. Результат проведенного расчета числа теоретических ступеней экстракции Zr⁴⁺ приведен на рис. 3.

При реализации результатов теоретической оценки (см. рис. 3) в условиях противоточного каскада возможно достичь извлечения Zr(IV) в фазу ТБФ в декане из азотнокислых растворов ВАО на 98 % за пять ступеней контакта. Параметры рабочей линии представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры рабочей линии для экстракционного противоточного каскада Zr(IV) в 5 ступеней

Operating line parameters for a 5-stage countercurrent Zr(IV) extraction cascade

Параметр	Концентрация, г/л	
	Органическая фаза	Водная фаза
Входная в каскад по Zr ⁴⁺	0	2,70
Выходная по Zr ⁴⁺	1,00	0,05

Примечание. О:В = 2,5:1. Коэффициент рабочей линии 0,4 (рис. 3).

Наряду с расчетной оценкой количества ступеней экстракции, необходимых для практически полного извлечения циркония(IV) из модельных растворов ВАО, в этом же процессе оценили распределение азотной кислоты по ступеням каскада (рис. 4). Равновесное распределение азотной кислоты при ее совместной экстракции с цирконием представлено на рис. 1. Распределение азотной кислоты по ступеням экстракционного каскада в условиях реализации процесса для циркония (отношение О:В = 2,5:1) определено

по ступеням. Выявлено, что градиент концентраций HNO_3 осуществляется на первых 4 ступенях, а дальнейшее увеличение количества степеней не приводит к значительному изменению содержания азотной кислоты в фазах (рис. 4).

Параметры рабочей линии для азотной кислоты при реализации процесса представлены в табл. 3.

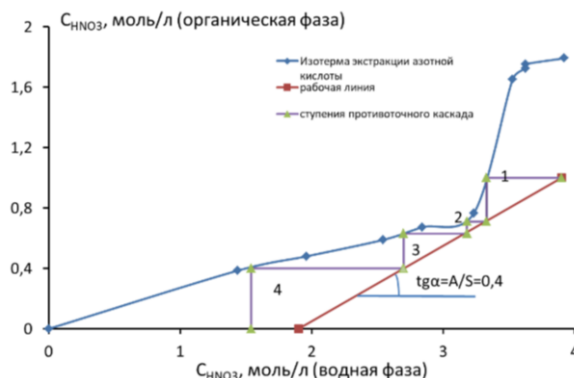


Рис. 4. Графический расчет числа теоретических ступеней экстракции азотной кислоты в системе модельный раствор ВАО — 3,92 М HNO_3 — 30 об. % ТБФ в декане при 20 °С: 1–4 — теоретические ступени экстракции, экспериментальные и расчетные данные представлены с учетом суммарной погрешности 20 %

Fig. 4. Graphical calculation of the number of theoretical stages of nitric acid extraction in the system: model solution of HAO—3.92 M HNO_3 —30 vol. % TBP in decane at 20 °C: 1–4 are theoretical stages of extraction; experimental and calculated data are presented taking into account a total error of 20 %

Таблица 3

Параметры рабочей линии для HNO_3 экстракционного противоточного каскада в 4 ступени
 Operating line parameters for a 4-stage HNO_3 countercurrent extraction cascade

Параметр	Концентрация, моль/л	
	Органическая фаза	Водная фаза
Входная в каскад по HNO_3	0	3,90
Выходная по HNO_3	0,40	1,54

Примечание. О:В = 2,5:1. Коэффициент рабочей линии 0,4 (см. рис. 3).

Для подтверждения расчетных оценок, проведенных ранее, было выполнено экспериментальное моделирование непрерывной экстракции с помощью ряда следующих друг за другом операций периодической экстракции. На схеме эксперимента по моделированию противоточного экстракционного каскада, приведенной на рис. 5, показана имитация противоточного непрерывного процесса периодическим 5-кратным повторением межфазных контактов по схеме перекрестного тока. Используемая схема позволяет получить концентрационный профиль компонентов по ступеням каскада и на основании этих данных оценить эффективность экстракционного процесса.

При использовании предложенной схемы моделирования принимали, что экстракционный контакт эквивалентен одной теоретической ступени разделения [Альдерс, 1962; Трейбал, 1966]. В ячейке 1 модельный раствор ВАО контактирует со свежим раствором экстрагента, экстракт отбрасывается, а рафинат поступает на экстракционный контакт со свежей порцией экстрагента в ячейке 2. После этого экстракт подается в ячейку 1 второй ступени, а рафинат — в ячейку 3 первой ступени и т. д. При этом в схеме на рис. 5 рафинаты движутся слева направо, а экстракты — сверху вниз. Соотношение фаз при всех экстракционных контактах было постоянным и составляло 2,5:1. Для уточнения содержания циркония(IV) и других компонентов ВАО на выходе рафината из каждой ступени отбирали пробу на МС-ИСП анализ. Таким образом, были получены стационарные профили концентраций Zr^{4+} и азотной кислоты по ступеням моделируемого противоточного каскада.

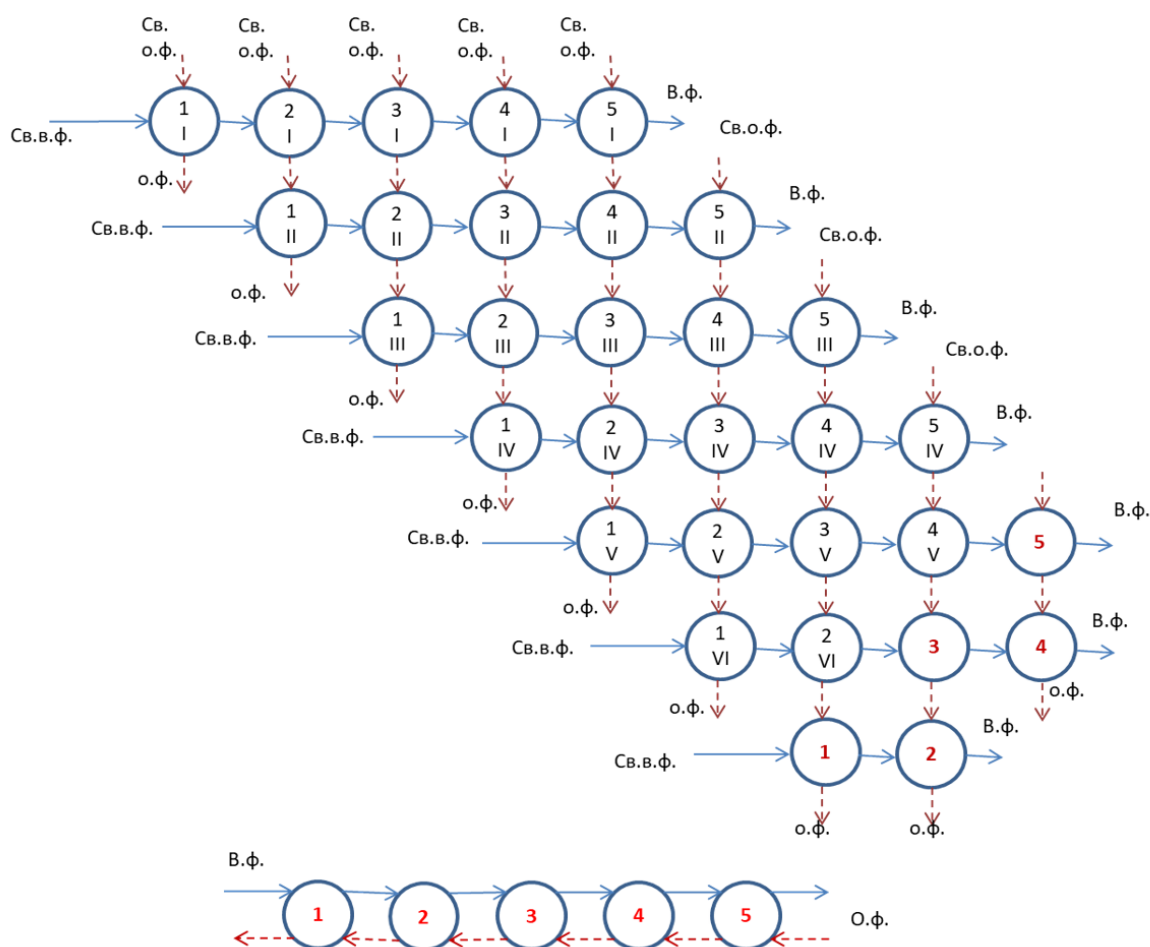


Рис. 5. Моделирование пятиступенчатого противоточного экстракционного каскада:
 Св.о.ф. — свежая органическая фаза; Св.в.ф. — свежая водная фаза; о.ф. — проконтактировавшая органическая фаза; в.ф. — проконтактировавшая водная фаза; 1(I)–5(I) и т. д. до 1(VI)–2(VI) — точки контактов фаз для осуществления противоточного каскада методом перекрестного тока; 1–5 — ступени противоточного каскада

Fig. 5. Simulation of a five-stage countercurrent extraction cascade:
 F.O.P.—fresh organic phase; F.A.P.—fresh aqueous phase; O.P.—contacted organic phase;
 A.P.—contacted aqueous phase; 1(I)–5(I), etc., up to 1(VI)–2(VI) — phase contact points for implementing the countercurrent cascade using the cross-current method; 1–5—countercurrent cascade stages

Результаты экспериментального моделирования режима работы противоточного каскада, приведенные на рис. 6, а, б и в табл. 4, 5, совпадают с расчетными оценками, полученными с использованием изотерм экстракции Zr^{4+} и HNO_3 .

Экспериментальные данные вполне согласуются с теоретическими (см. рис. 6, а, б). Концентрация Zr^{4+} на выходе из каждой ступени противоточного непрерывного каскада укладывается в рабочую линию, извлечение циркония(IV) в ТБФ протекает на 98 % за пять ступеней при О:В = 2,5:1, также необходимо отметить, что другие компоненты ВАО в условиях эксперимента в органическую фазу практически не экстрагируются. Таким образом, задача селективного выделения циркония(IV) в ТБФ решена.

Исследована возможность реэкстракции Zr^{4+} из нагруженной органической фазы 0,1 моль/л раствором азотной кислоты при температуре 20 °С. Экстракционное равновесие циркония(IV) в системе ТБФ– Zr^{4+} – HNO_3 – H_2O изучали методом изменения объемов фаз. В качестве органической фазы использовали 30 об. %-й раствор ТБФ в декане, содержащий 1,5 г/л Zr^{4+} , 0,7 моль/л HNO_3 (рис. 7).

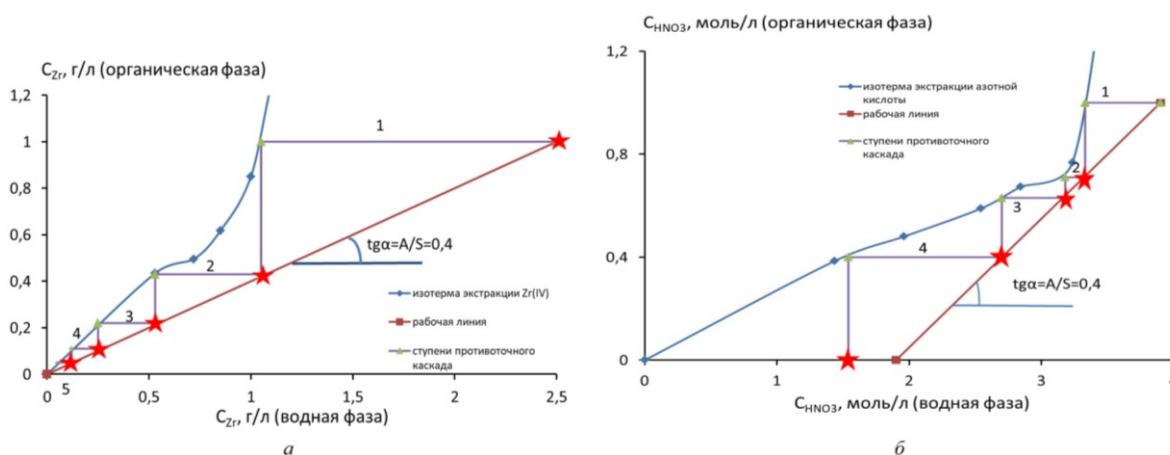


Рис. 6. Стационарный профиль Zr^{4+} (а) и азотной кислоты (б) по ступеням моделируемого противоточного каскада. Обозначение красная звезда — экспериментальные данные.

Экспериментальные и расчетные данные представлены с учетом суммарной погрешности 20 %

Fig. 6. Steady-state profile of Zr^{4+} (a) and nitric acid (b) across the stages of the simulated counter-current cascade. Red star designation—experimental data. Experimental and calculated data are presented taking into account a total error of 20 %

Таблица 4

Содержание Zr^{4+} в ступенях противоточного каскада, г/л
 Content of Zr^{4+} in the counter-current cascade stages, g/l

Фаза	1	2	3	4	5
Водная	1,05	0,53	0,25	0,12	0,05
Органическая	0,05	0,11	0,22	0,43	1,00

Таблица 5

Содержание HNO_3 в ступенях противоточного каскада, моль/л
 HNO_3 content in the countercurrent cascade stages, mol/l

Фаза	1	2	3	4	5
Водная	1,52	1,54	2,70	3,18	3,33
Органическая	0,70	0,71	0,63	0,40	0

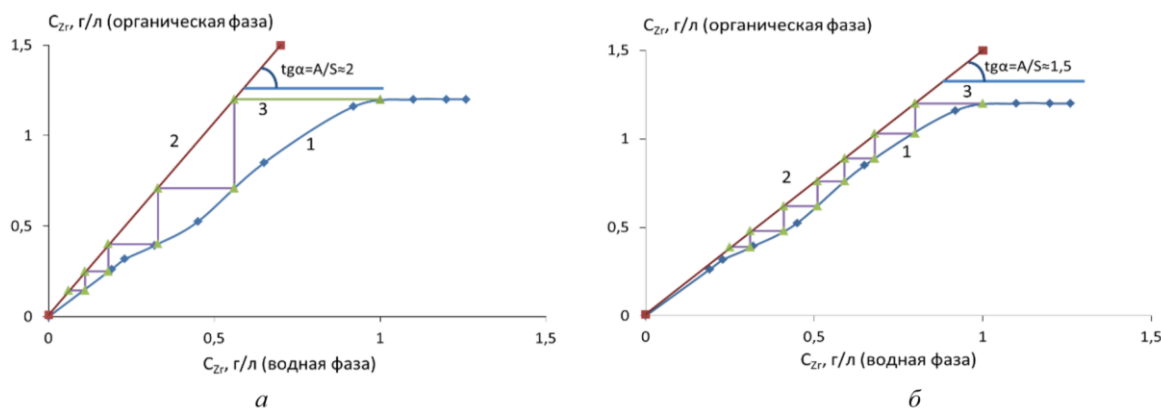


Рис. 7. Распределение $Zr(IV)$ в системе ТБФ– $Zr(IV)$ – HNO_3 – H_2O (1), расчетная рабочая линия (2) при отношениях фаз $O:B = 1:2$ (а) и $O:B = 1:1,5$ (б), а также ступени (3)

Fig. 7. Distribution of $Zr(IV)$ in the TBP– $Zr(IV)$ – HNO_3 – H_2O system (1), the calculated operating line (2) at phase ratios $O:B = 1:2$ (a) and $O:B = 1:1.5$ (b), as well as steps (3)

При варьировании отношения потоков фаз можно достичь практически полного извлечения катионов циркония из нагруженной органической фазы при $O:B = 1:1,5$ за 9 ступеней, а при $O:B = 1:2$ — за 5 ступеней непрерывного противоточного каскада.

На основании проведенного комплекса исследований по экстракции и реэкстракции $Zr(IV)$ в системе модельный раствор ВАО — HNO_3 — 30 об. % ТБФ в декане была предложена принципиальная схема выделения Zr^{4+} из азотнокислых ВАО в ТБФ (рис. 8).

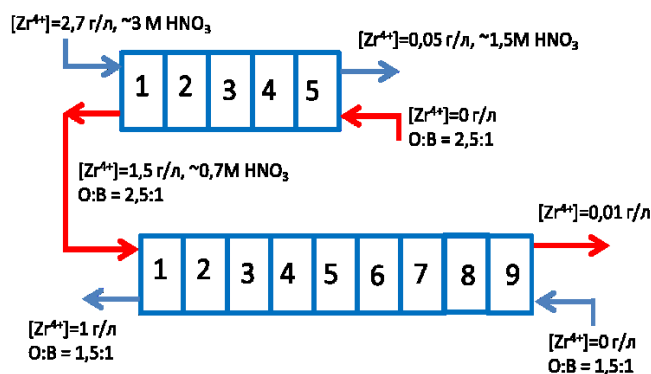


Рис. 8. Принципиальная схема экстракционного выделения Zr^{4+} из азотнокислых ВАО в ТБФ

Fig. 8. Schematic diagram of the extraction of Zr^{4+} from nitric acid HLW in TBP

Предложенная схема (см. рис. 8) состоит из двух частей: экстракционной, представляющей собой пятиступенчатый противоточный каскад, позволяющих снизить концентрацию Zr^{4+} с ВАО на 98 %, и реэкстракционной, также представляющей собой девятиступенчатый противоточный каскад, в котором нагруженная органическая фаза из первого каскада исчерпывается по цирконию(IV) практически полностью.

Заключение

1. Разработана адаптированная к существующей аппаратной схеме PUREX-процесса технология экстракционного выделения циркония(IV) из растворов высокоактивных отходов на примере модельных в трибутилфосфат в углеводородном разбавителе.

2. Экспериментально получены изотермы экстракции методом изменения объемов фаз относительно целевого компонента — циркония(IV).

3. На основании полученных изотерм экстракции выявлено, что минимально необходимое количество теоретических ступеней противоточного каскада с извлечением Zr^{4+} в органическую фазу более 98 % составляет 5.

4. Проведено экспериментальное моделирование рассчитанного 5-ступенчатого противоточного каскада, показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов.

5. Выбраны способы реэкстракции Zr^{4+} из нагруженной органической фазы, рассчитано количество ступеней исчерпывания Zr^{4+} из нагруженной органической фазы в выбранных условиях.

6. Предложена принципиальная технологическая схема экстракционного метода выделения циркония из ВАО, не требующая кардинальной реконструкции действующих высокоактивных производств переработки ОЯТ.

Список источников

Альдерс Л. Жидкостная экстракция. М.: Изд-во. иностр. литер., 1962. 258 с.

Блажева И. В., Федоров Ю. С., Зильберман Б. Я., Маширов Л. Г. Взаимодействие циркония с трибутилфосфатом при экстракции из азотнокислых растворов // Радиохимия. 2008. Т. 50, № 3. С. 221–224.

Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. М.: Химия, 1991. 496 с.

Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. / Е.О. Адамов [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 112, № 6. С. 319–330.

Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике / Е. О. Адамов [и др.] // Атомная энергия. 2021. Т. 130, вып. 1. С. 28–34.

Пузиков Е. А., Зильберман Б. Я., Голецкий Н. Д., Блажева И. В., Кудинов А. С. Использование унифицированной модели с разбавлением ТБФ для описания экстракции нитратов четырехвалентных актинидов, циркония и гафния из азотнокислых растворов // Радиохимия. 2020. Т. 62, № 4. С. 329–336. DOI: 10.31857/S0033831120040061.

Способ обработки металлических радиоактивных отходов, образованных при переработке ядерного топлива водо-водяных реакторов и реакторов РБМК. Патент RU №2569998 С2.

Способ получения высокообогащенных изотопов циркония. Патент RU №2660850(13) С2.

Способ разделения изотопов циркония в электромагнитном сепараторе с использованием источника ионов. Патент РФ 2160153.

Справочник по экстракции: в 3 т. Т. 1. Николотова З. И., Карташова Н. А. Экстракция нейтральными органическими соединениями / под ред. д. х. н. А. М. Розена. М., Атомиздат, 1976. 600 с.

Тананаев И. Г., Мясоедов Б. Ф. Методы и подходы к технологическому выделению ценных радионуклидов из отработавшего ядерного топлива // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 3. С. 222–228.

Трейбал Р. Жидкостная экстракция. М.: Химия, 1966. 724 с.

Шмелев А. Н., Апсе В. А., Куликов Г. Г. Физические основы обезвреживания долгоживущих радиоактивных отходов. Потенциал инновационных технологий: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008.

Modern Trends in Spent Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Fractionation / S. V. Gutorova [et al.] // Russ. Journal of General Chemistry. 2024. V. 94 (Suppl 2). P. S243–S430. <https://doi.org/10.1134/S1070363224150015>.

Status of Developments in the Back End of the Fast Reactor Fuel Cycle. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.2. IAEA, Vienna, 2011. 91 p.

References

Adamov E. O., Dzhilavyan A. V., Lopatkin A. V., Molokanov N. A., Muravyov E. V., Orlov V. V., Kal'akin S. G., Rachkov V. I., Troyanov V. M., Avrorin E. N., Ivanov V. B., Aleksakhin R. M. Conceptual framework of a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100. *Atomic Energy*, 2012, Vol. 112, No. 6, pp. 391–403. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9574-x>.

Adamov E. O., Mochalov Y. S., Rachkov V. I., Khomyakov Y. S., Shadrin A. Y., Kascheev V. A., Khaperskaya A. V. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. *Atomic Energy*, 2021, Vol. 130, No. 1, pp. 29–35. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00769-w>.

Al'ders L. *Zhidkostnaya ekstrakciya* [Liquid extraction]. Moscow, Izd-vo. inostr. liter., 1962, 258p. (In Russ.).

Blazheva I. V., Fedorov Yu. S., Zilberman B. Ya., Mashirov L. G. Extraction of zirconium with tributylphosphate from nitric acid solutions. *Radiochemistry*, 2008, vol. 50, no. 3, pp. 256–260. DOI: 10.1134/S1066362208030077.

Dytner'skiy Yu. I. *Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering]. Moscow, Himiya, 1991, 496 p. (In Russ.).

Gutorova S. V., Logunov M. V., Voroshilov Y. A., Babain V. A., Shadrin A. Yu., Podoymitsyn S. V., Kharitonov O. V., Firsova L. A., Kozlitin E. A., Ustynyuk Yu. A., Lempert P. S., Nenajdenko V. G., Voronina A. V., Volkovich V. A., Polovov I. B., Dvoeglazov K. N., Mochalov Yu. S., Vidanov V. L., Kascheev V. A., Zaikov Yu. P., Kovrov V. A., Holkina A. S., Suntsov D. Yu., Filimonova E. D., Shmidt O. V., Volk V. I., Melentev A. B., Korchenkin K. K., German K. E., Pokhitonov Yu. A., Tananaev I. G., Pavlyukevich E. Yu., Bagautdinova O. A., Alekseenko V. N., Podrezova L. N., Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kaptakov V. O., Tkachenko L. I., Kalmykov S. N. Modern Trends in Spent Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Fractionation. *Russ. Journal of General Chemistry*, 2024, Vol. 94 (Suppl. 2), pp. S243–S430. <https://doi.org/10.1134/S1070363224150015>.

Method for processing metallic radioactive waste generated during the reprocessing of nuclear fuel from water-moderated and RBMK reactors. RU Patent No. 2569998 C2.

Method for producing highly enriched zirconium isotopes. RU Patent No. 2660850(13) C2.

Method for separating zirconium isotopes in an electromagnetic separator using an ion source. RU Patent No. 2160153.

Puzikov E. A., Zil'berman B. Y., Goletskii N. D., Blazheva I. V., Kudinov A. S. Application of unified model with TBP dilution to description of extraction of nitrates of tetravalent zirconium and hafnium actinides from nitrate solutions. *Radiochemistry*, 2020, V. 62, no. 4, pp. 492–498. DOI: 10.1134/S1066362220040062.

Shmelev A. N., Apse V. A., Kulikov G. G. *Fizicheskie osnovy obvezvrezhivaniya dolgozhivushchih radioaktivnykh othodov. Potencial innovacionnykh tekhnologij* [Physical Principles of Long-Lived Radioactive Waste Neutralization: Potential for Innovative Technologies]. Moscow, MIFI, 2008. (In Russ.).

Spravochnik по экстракции [Extraction Handbook]. В 3 т. Т. 1 Nikolotova Z. I., Kartashova N. A. Ekstrakciya nejtral'nymi organichesкими soedineniyami [Extraction with neutral organic compounds]. Moscow, Atomizdat, 1976, 600 p. (In Russ.).

Status of Developments in the Back End of the Fast Reactor Fuel Cycle. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.2. IAEA, Vienna, 2011, 91 p.

Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Commercial recovery of valuable radionuclides from spent nuclear fuel: methods and approaches. *Radiochemistry*, 2016, Vol. 58, No. 3, pp. 257–264. <https://doi.org/10.1134/S1066362216030061>.

Treybal R. *Zhidkostnaya ekstrakciya* [Liquid extraction]. Moscow, Himiya, 1966, 724 p. (In Russ.).

Информация об авторах

А. М. Сафиулина — доктор химических наук, главный научный сотрудник, доцент;

А. В. Лизунов — кандидат технических наук, директор отделения научно-исследовательского отделения специальных неядерных материалов и изотопной;

Г. В. Костикова — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;

В. И. Жиллов — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник;

В. С. Михалюк — ведущий научный сотрудник;

И. Г. Тананаев — академик РАН, доктор химических наук, профессор.

Information about the authors

A. M. Safiulina — DSc (Chemistry), Chief Researcher, Associate Professor;

A. V. Lizunov — PhD (Engineering), Director of the Research Department of Special Non-Nuclear Materials and Isotope;

G. V. Kostikova — PhD (Chemistry), Senior Researcher;

V. I. Zhilov — PhD (Chemistry), Leading Researcher;

V. S. Mikhalyuk — Leading Researcher;

I. G. Tananaev — Academician of the RAS, DSc (Chemistry), Professor.

Статья поступила в редакцию 09.02.2026; одобрена после рецензирования 20.02.2026; принята к публикации 22.02.2026.
The article was submitted 09.02.2026; approved after reviewing 20.02.2026; accepted for publication 22.02.2026.

Научная статья
УДК 548.7
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.005

ВЛИЯНИЕ ВАРИАТИВНОСТИ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В МАНГАНИТАХ $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0,0; 0,25$) ($y = 0,0; 0,1$)

Лариса Борисовна Ведмидь¹, Ольга Михайловна Федорова²

^{1, 2}Институт металлургии имени академика Н. А. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

¹elarisa100@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0367-2510>

²fom55@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0692-770X>

Автор, ответственный за переписку: Лариса Борисовна Ведмидь, elarisa100@mail.ru

Аннотация

Исследована эволюция структуры в перовскитоподобных манганитах $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0,0; 0,25$) ($y = 0,0; 0,1$), полученных керамическим синтезом. Манганиты празеодима обладают орторомбической структурой (пр. гр. *Pbnm*). Показано влияние химического состава и температуры на фазовое состояние манганитов. Установлено, что наибольшее влияние на искажение кристаллической структуры исходного манганита оказывает комплексное замещение Pr/(Gd, Sr). Влияние замещения на искажение кристаллической структуры $PrMnO_3$ рассматривается с позиции изменения среднего ионного радиуса манганитов в А- подрешетке и степени ян-теллеровского искажения.

Ключевые слова:

манганит празеодима, кристаллическая структура, замещение, эффект Яна — Теллера

Благодарности:

работа выполнена в соответствии с государственным заданием Института металлургии имени В. И. Ватолина Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УРО РАН) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Урал-М».

Финансирование:

государственное задание.

Для цитирования:

Ведмидь Л. Б., Федорова О. М. Влияние вариативности замещения на эволюцию структурных характеристик в манганитах $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0,0; 0,25$) ($y = 0,0; 0,1$) // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 41–51. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.005.

Original article

INFLUENCE OF SUBSTITUTION VARIABILITY ON THE EVOLUTION OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS IN MANGANITES $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0.0; 0.25$) ($y = 0.0; 0.1$)

Larisa B. Vedmid¹, Olga M. Fedorova²

^{1, 2}Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

¹elarisa100@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0367-2510>

²fom55@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0692-770X>

Corresponding author: Larisa B. Vedmid, elarisa100@mail.ru

Abstract

The evolution of the structure in perovskite-like manganites $(Pr_{1-y}Gd_y)_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0.0; 0.25$) ($y = 0.0; 0.1$) obtained by ceramic synthesis has been studied. Praseodymium manganites have an orthorhombic structure, (sp. gr. *Pbnm*). The influence of chemical composition and temperature on the phase state of manganites is shown. It has been established that the complex substitution of Pr/(Gd, Sr) has the greatest effect on the distortion of the crystal structure of the initial manganite. The effect of substitution on the distortion of the crystal structure of $PrMnO_3$ is considered from the perspective of changes in the average ion radius of manganites in the A-sublattice and the degree of Jahn-Teller distortion.

Keywords:

praseodymium manganite, crystal structure, substitution, Jahn-Teller effect

Acknowledgements:

the work was carried out according to the state assignment Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMET UB RAS) using equipment of the Collaborative usage centre "Ural-M."

Funding:

State assignment.

For citation:

Vedmid' L. B., Fedorova O. M. Influence of substitution variability on the evolution of structural characteristics in manganites $(\text{Pr}_{1-y}\text{Gd}_y)_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.0; 0.25$) ($y = 0.0; 0.1$). // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 41–51. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.005.

Введение

Оксиды ABO_3 (А — редкоземельный элемент, В — переходный металл), имеющие перовскитоподобную кристаллическую структуру, являются характерными примерами объектов для изучения свойств сильно коррелированных электронных систем. Перовскиты, содержащие ионы Яна — Теллера (ЯТ) (например, ион Mn^{3+}) в октаэдрическом участке, проявляют конкурирующие зарядовые, спиновые, орбитальные и решеточные взаимодействия [Salamon, Jaime, 2001; Nagaev, 2001; Maris et al., 2004; Hizi et al., 2023], которые приводят к проявлению интересных свойств: гигантское магнитосопротивление, сверхпроводимость, зарядовое упорядочение и разделение фаз [Goodenough, 2004; Tokura, 2006]. Благодаря высокой химической и термической стабильности эти соединения считаются потенциальными кандидатами для применения в устройствах спинтроники, магнитного охлаждения, возобновляемых источниках энергии, конверсии газов [Tsipis, Kharton, 2008; Gao et al., 2021; Žužić et al., 2022]. По данным исследований перовскитоподобных манганитов [Nakajima et al., 2004; Bose et al., 2007; Hcini et al., 2011; Aguilar et al., 2022; Vedmid et al., 2024; Vedmid' et al., 2024; Wu et al., 2025] наибольшее влияние на их физические свойства оказывают средний ионный радиус элемента в А-подрешетке ($\langle r_A \rangle$) и соотношение $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ в В-подрешетке. Поэтому для достижения целевых функциональных свойств манганитов применяют направленное контролируемое замещение в А- и/или В-подрешетках подходящими элементами. При обсуждении зависимости различных свойств от $\langle r_A \rangle$ в качестве одного из критериев обычно используют фактор толерантности Гольдшмидта (t), который оценивается из выражения (1):

$$t = (r_A + r_O) / \sqrt{2(r_B + r_O)}, \quad (1)$$

где r_A , r_B — средний ионный радиус катионов; r_O — ионный радиус аниона [Goldschmidt, 1926]. Для кубической структуры t близок к 1. Этот критерий служит мерой отклонения структуры от кубической за счет несоответствия между ионными радиусами элементов соединения. Такое искажение проявляется во вращении кислородных октаэдров, окружающих ион Mn^{3+} . Другим критерием является степень ян-теллеровских искажений кислородных октаэдров MnO_6 . Ян-теллеровское искажение регулируется изменением длин связей Mn-O и наклонов октаэдров MnO_6 . Последние оцениваются величиной отклонения от идеального из выражений (2):

$$\varphi_1 = (\pi - [\text{Mn-O1-Mn}]) / 2; \quad \varphi_2 = (\pi - [\text{Mn-O2-Mn}]) / 2, \quad (2)$$

где φ_1 — отклонение вдоль вертикальной оси; φ_2 — отклонение от горизонтальной плоскости [Karmakar et al., 2011].

Замещение редкоземельных элементов в манганитах $\text{A}_{1-x}\text{M}_x\text{MnO}_3$ (M = щелочноземельные элементы Ca, Sr, Ba) создает химическое давление в элементарной ячейке и, следовательно, дополнительно деформирует марганец-кислородные октаэдры. Вариацией замещения можно достичь разной степени деформации октаэдров MnO_6 . Это приведет к изменению угла связи Mn-O-Mn и возможности обменного взаимодействия между разновалентными ионами марганца [Zener, 1956]. Наша работа посвящена изучению влияния частичного замещения иона Pr^{3+} ионами Sr либо Gd или их сочетанием на эволюцию искажения кристаллической структуры манганита PrMnO_3 . Гетеровалентное замещение ионов Pr^{3+} ($r_{\text{эфф}} = 1,179 \text{ \AA}$) на ионы Sr^{2+} ($r_{\text{эфф}} = 1,31 \text{ \AA}$) [Shannon, 1976], имеющие больший ионный радиус, провоцирует увеличение $\langle r_A \rangle$, снижение степени искажения кристаллической структуры и улучшение электропроводности и магнитных свойств манганитов [Kostoglou et al., 1997; Pollert et al., 2002; Vedmid' et al., 2021; Kharrat et al., 2022]. Усложнение состава за счет частичного изовалентного замещения редкоземельного элемента другим редкоземельным элементом может улучшить уже существующие характеристики материалов и расширить спектр их прикладного использования. По данным работ [Pal et al., 2020; Bhutia et al., 2025] известно, что дополнительная

замена лантана гадолинием в манганитах $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ и $\text{La}_{0,7}\text{Ba}_{0,3}\text{MnO}_3$ в концентрации $x = 0,1$ понижает в 2 раза температуру перехода парамагнетик-ферромагнетик (T_C). Замещение празеодима гадолинием в манганите $\text{Pr}_{0,5-x}\text{Gd}_x\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ ($x = 0,0; 0,1$) приводит к повышению удельного сопротивления и магниторезистивного эффекта [Ben Jazia Kharrat et al., 2024]. Изовалентное замещение ионов Pr^{3+} на ионы Gd^{3+} ($r_{\text{эфф.}} = 1,107 \text{ \AA}$) [Shannon, 1976] с меньшим ионным радиусом приводит к уменьшению $\langle r_A \rangle$ и усиливает искажение кристаллической структуры. При комплексном частичном замещении иона Pr^{3+} ионами Gd^{3+} и Sr^{2+} возможно снижение искажения структуры по сравнению с исходным манганитом за счет влияния размерного фактора $\langle r_A \rangle$ катиона. Однако известные нам литературные данные не рассматривают влияние низкого уровня комплексного замещения ионов Pr ионами Gd и Sr на искажения кристаллической структуры PrMnO_3 . Таким образом, полученные сведения важны для понимания физической природы манганитов празеодима при замещении элементами со значительной разницей в их ионных радиусах.

Материалы и методы

Манганиты PrMnO_3 , $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$, $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$, $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ синтезированы твердофазным керамическим методом. Исходными материалами для синтеза служили Pr_6O_{11} , Gd_2O_3 (Merck Aldrich, 99,9 %), SrCO_3 (qualified as “high purity”) и Mn_2O_3 (Sigma-Aldrich, 99,9 %). Для удаления адсорбированной влаги исходные компоненты предварительно прокаливали при $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 8 ч, затем смешивали в необходимых пропорциях, прессовали и обжигали. Термическую обработку проводили в течение 70 ч при температуре $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ для исходного манганита PrMnO_3 и при температуре $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ для легированных манганитов на воздухе с последующим охлаждением внутри печи. Фазовый состав полученных образцов исследовали с помощью дифрактометра XRD-7000 (Shimadzu), в $\text{CuK}\alpha$ -излучении ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в диапазоне углов $20^\circ \leq 2\Theta \leq 70^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ и выдержкой в точке 2 с. Высокотемпературные рентгеновские исследования проведены с помощью приставки HA-1001 (Shimadzu), установленной на дифрактометре XRD-7000 при нагреве в интервале температур $20\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ (скорость нагрева $10 \text{ }^\circ/\text{мин}$), выдержке при каждой температуре 10 мин и последующей съемке в диапазоне углов $20^\circ \leq 2\Theta \leq 60^\circ$ с шагом $0,02^\circ$ и выдержкой 1,5 с.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 показаны расчетные и экспериментальные дифракционные профили всех образцов. Уточнение кристаллической структуры образцов проведено методом Ритвельда с использованием программного комплекса EXPGUI [Toby, 2001]. В таблице приведены параметры кристаллической структуры и достигнутые коэффициенты расхождения для всех исследованных соединений. Согласно результатам рентгенофазового анализа, проведенного при комнатной температуре, образец PrMnO_3 имеет орторомбическую структуру, относящуюся к пространственной группе (пр. гр.) $Pbnm$ (ICDD № 01–072-7191). Отклонение кристаллической структуры PrMnO_3 от идеальной (кубической) обусловлено значительной разницей между ионными радиусами катиона Pr^{3+} и аниона O^{2-} ($r_{\text{эфф.}} = 1,35 \text{ \AA}$) [Shannon, 1976], фактор толерантности t этого манганита равен 0,894. В орторомбической кристаллической структуре выделяют две подструктуры, обозначаемые как O - и O' -структуры, которые отличаются разным соотношением параметров кристаллической решетки. Формирование O -структуры вызвано вращениями октаэдров MnO_6 , соотношение параметров ячейки соответствует выражению: $a < c/\sqrt{2} < b$. Образование O' -структуры обусловлено совместным влиянием вращения октаэдров MnO_6 и ЯТ искажения [Maris, 2004]. Для этой структуры характерно следующее соотношение параметров ячейки: $c/\sqrt{2} < a < b$. Замещенные манганиты празеодима также обладают орторомбической структурой (пр. гр.) $Pbnm$ (ICDD № 01–072-7191, № 00-069-0576; № 01-086-4288). Исходный манганит PrMnO_3 и замещенные манганиты $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ имеют соотношение параметров элементарной ячейки, соответствующее O' -фазе, с орбитальным упорядочением, вызванным эффектом ЯТ. Соотношение параметров ячейки комплексно замещенного манганита $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ соответствует соотношению для O -фазы. Из рассматриваемых манганитов наименьшим фактором толерантности t , соответственно, наибольшим искажением кристаллической

решетки, обладает манганит $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$ за счет внедрения в позиции иона Pr^{3+} ионов Gd^{3+} с меньшим ионным радиусом. Наибольшее значение t показывает манганит $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Гетеровалентное замещение части катионов Pr^{3+} на Sr^{2+} приводит к ослаблению искажения кристаллической структуры не только за счет увеличения $\langle r_A \rangle$, но и в результате повышения валентного состояния части ионов марганца Mn^{3+} ($r_{\text{эфф}} = 0,65 \text{ \AA}$) \rightarrow Mn^{4+} ($r_{\text{эфф}} = 0,53 \text{ \AA}$) [Shannon, 1976] в В-подрешетке, что уменьшает количество ЯТ ионов Mn^{3+} . Значение фактора толерантности t комплексно замещенного манганита ($\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}$) $_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ близко к таковому для манганита замещенного стронцием $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Это свидетельствует о более заметном влиянии иона Sr и его концентрации на искажение исходного манганита.

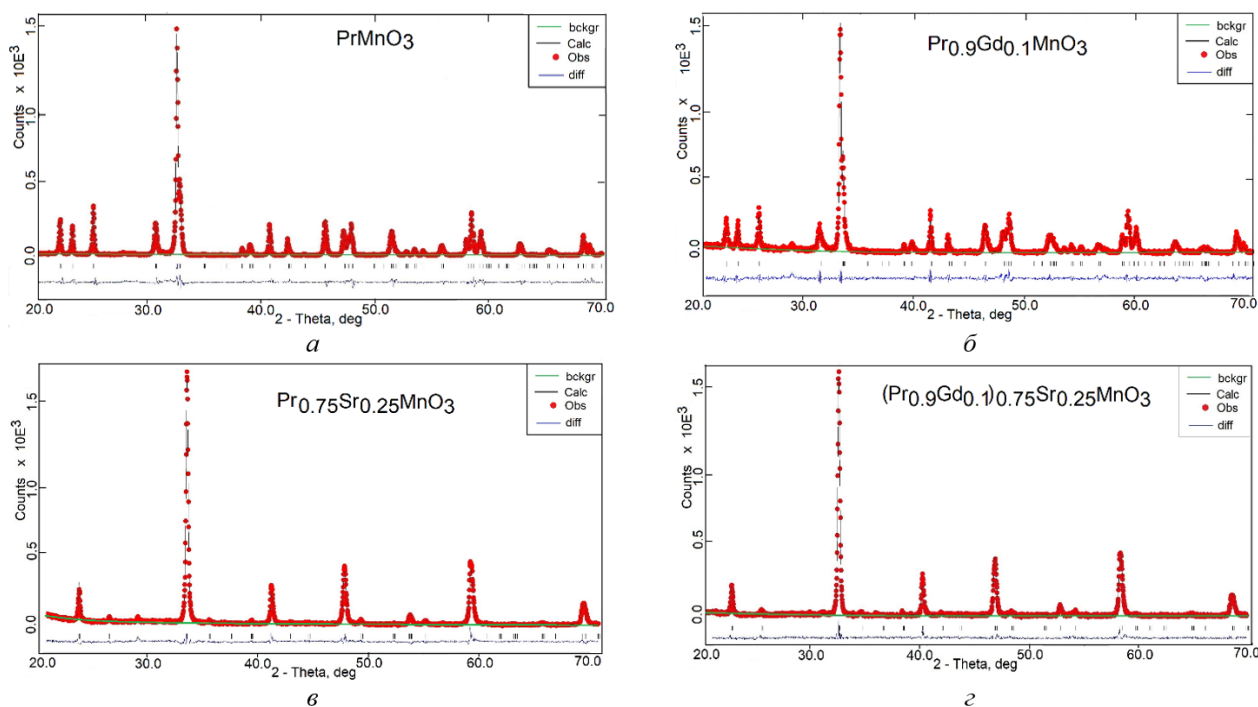


Рис. 1. Рентгенограммы манганитов празеодима, уточненные методом Ритвельда

Fig. 1. XRD patterns of praseodymium manganites refined by the Rietveld method

Параметры кристаллической структуры образцов $(\text{Pr}_{1-y}\text{Gd}_y)_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$;
 координаты атомов — (PrGd)/Sr: $4c(x, y, 1/4)$; Mn : $4b(1/2, 0, 0)$, O(1): $4c(x, y, 1/4)$; O(2): $8d(x, y, z)$

Crystal structure parameters of $(\text{Pr}_{1-y}\text{Gd}_y)_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ samples:
 atomic coordinates: (PrGd)/Sr: $4c(x, y, 1/4)$; Mn: $4b(1/2, 0, 0)$, O(1): $4c(x, y, 1/4)$; O(2): $8d(x, y, z)$

Образец	PrMnO_3	$\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$	$\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$	$(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$
1	2	3	4	5
a, Å	5,4422(2)	5,4274(2)	5,4893(3)	5,4635
b, Å	5,8391(1)	5,6538(3)	5,5021(3)	5,4720
c, Å	7,6062(2)	7,6005(3)	7,7635(2)	7,7366
$c/\sqrt{2}$, Å	5,3792(2)	5,3752(3)	5,4896(2)	5,4714
V, Å ³	241,7(6)	233,22(3)	234,9(4)	231,29
$\langle r_A \rangle$, Å	1,179	1,172	1,212	1,206
Mn-O1(m) $\times 2$, Å	1,9497(1)	1,9475(1)	1,9468(1)	1,9509(3)

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
Mn-O2(l) ×2, Å	2,2643(1)	2,0622(1)	2,0186(1)	2,1091(1)
Mn-O2(s) ×2, Å	1,8658(1)	2,0052(1)	1,9413(2)	1,7831(1)
<Mn-O>	2,0266	2,0050	1,9689	1,9477
Mn-O1-Mn ×2, (°)	153,11(2)	149,46(3)	168,52(1)	163,25
Mn-O2-Mn ×4, (°)	154,51(2)	156,07(2)	162,19(1)	165,72
<Mn-O-Mn>	153,81	152,77	165,36	164,49
φ_1 , (°)	13,45	15,27	5,74	8,38
φ_2 , (°)	12,75	11,97	8,91	7,14
W_{Rp} , %	14,2	12,9	14,0	13,2
R_p , %	10,3	10,7	10,5	10,00
χ^2	2,98	3,02	2,33	1,85
R_{Br} , %	5,76	5,5	5,1	8,25
t	0,894	0,892	0,905	0,904
D , %	3,41	2,04	0,102	0,06

Для оценки степени орторомбической деформации D (%) [Knizek et al., 1992] в манганитах по всем кристаллографическим направлениям используют соотношение (3):

$$D = 1/3 \sum_{n=1}^3 |(a_n - \bar{a})/\bar{a}| \times 100, \quad (3)$$

где $a_1 = a$, $a_2 = b$, $a_3 = c/\sqrt{2}$, $\bar{a} = (abc/\sqrt{2})^{1/3}$. Значение D показывает искажение перовскитоподобной структуры по отношению к идеальной и зависит от химического состава манганита, возможного изменения валентности ионов марганца и распределения катионов по определенным позициям. Наибольшую величину искажения демонстрирует исходный манганит — $D = 3,41$, он имеет существенно отличающиеся друг от друга параметры элементарной ячейки (см. табл., рис. 2).

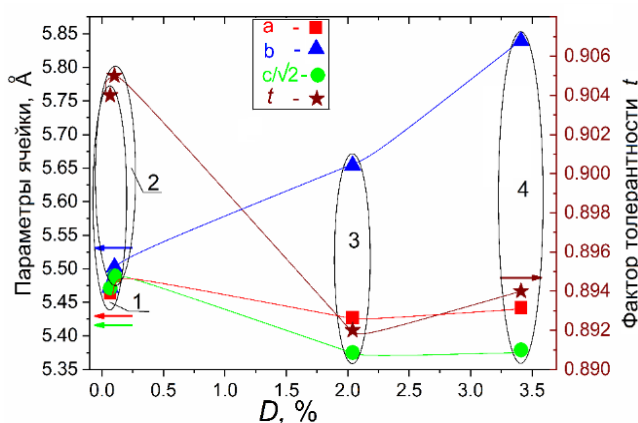


Рис. 2. Зависимость изменения параметров элементарной ячейки и фактора толерантности Гольдшмидта (t) от величины ромбической деформации (D) в манганитах празеодима:
 1 — $(Pr_{0,9}Gd_{0,1})_{0,75}Sr_{0,25}MnO_3$; 2 — $Pr_{0,75}Sr_{0,25}MnO_3$; 3 — $Pr_{0,9}Gd_{0,1}MnO_3$; 4 — $PrMnO_3$

Fig. 2. Dependence of the change in the unit cell parameters and the Goldschmidt tolerance factor (t) on the value of orthorhombic deformation (D) in praseodymium manganites:
 1— $(Pr_{0,9}Gd_{0,1})_{0,75}Sr_{0,25}MnO_3$; 2— $Pr_{0,75}Sr_{0,25}MnO_3$; 3— $Pr_{0,9}Gd_{0,1}MnO_3$; 4— $PrMnO_3$

Изовалентное замещение части ионов Pr на ионы Gd ($Pr_{0,9}Gd_{0,1}MnO_3$) не приводит к изменению валентности ионов марганца в В-подрешетке, но понижает $\langle r_A \rangle$. Искажение решетки должно повышаться,

однако мы наблюдаем некоторое сближение параметров ячейки и снижение величины орторомбической деформации ($D = 2,04$). Вероятной причиной является случайное расположение ионов редкоземельных элементов в А-подрешетке, а также их конкуренция, что может привести к компенсации искажения. В манганите, замещенном стронцием ($\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$), степень искажения кристаллической решетки исходного манганита существенно снижается до $D = 0,102$. Манганит, комплексно замещенный Gd и Sr, имеет самое низкое значение $D = 0,06$. Это может свидетельствовать о некотором синергетическом эффекте замещения, т. е. усилении влияния каждого из ионов заместителей Gd и Sr на общее снижение искажения структуры. Эффект проявился в изменении соотношения параметров элементарной ячейки, которое свидетельствует о снятии искажений Яна — Теллера и формировании О-фазы.

Для определения влияния замещения на величину наклона октаэдров MnO_6 рассмотрим изменение длин связей Mn-O- и углов Mn-O-Mn, значения которых указаны в таблице. Ян-теллеровские искажения кислородных октаэдров MnO_6 приводят к образованию трех разновеликих длин связей Mn-O: длинного (l), короткого (s) и среднего (m). Средние значения длин связей $\langle \text{Mn-O} \rangle$ уменьшаются при замещении (рис. 3, а). Наибольшее уменьшение $\langle \text{Mn-O} \rangle$ демонстрирует образец $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$, где наибольшее количество ионов Pr замещено. Наименьшее снижение значения $\langle \text{Mn-O} \rangle$ установлено в образце $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$, в котором использован самый низкий уровень замещения. Однако стоит заметить, что вариативность замещения не столь заметно изменяет апикальные связи Mn-O1(m) в октаэдрах MnO_6 , которые лежат в плоскости *c*, по сравнению со связями Mn-O2(l) и Mn-O2(s), расположенными в горизонтальной плоскости, направления *ab* (см. табл.). Этот факт указывает на большее искажение октаэдров в горизонтальной плоскости. Схематичное изображение расположения связей Mn-O и углов Mn-O-Mn в элементарной ячейке представлено на рис. 3, б на примере манганита $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$.

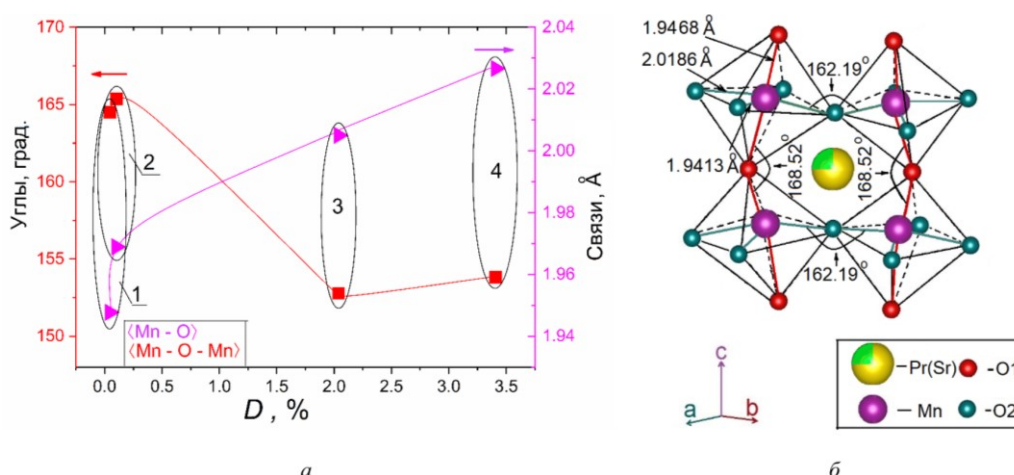


Рис. 3. Зависимость изменения в манганитах празеодима средних значений углов $\langle \text{Mn-O-Mn} \rangle$ и связей $\langle \text{Mn-O} \rangle$ от величины ромбической деформации (D) — а. Схематичное изображение элементарной ячейки манганита $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ — б: 1 — $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 2 — $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 3 — $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$; 4 — PrMnO_3

Fig. 3. a) Dependence of the change in the average values of the $\langle \text{Mn-O-Mn} \rangle$ angles and $\langle \text{Mn-O} \rangle$ bonds on the magnitude of the orthorhombic deformation (D) in praseodymium manganites. b) Schematic representation of the unit cell of the $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ manganite: 1— $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 2— $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 3— $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$; 4— PrMnO_3

В идеальной кубической структуре углы Mn-O1-Mn и Mn-O2-Mn равны между собой и составляют 180° . Значение среднего угла ($\langle \text{Mn-O-Mn} \rangle$) исходного манганита PrMnO_3 равно $153,81^\circ$, что значительно меньше идеального (см. рис. 3, а). Замещение исходного манганита Gd усиливает отклонение до значения $152,77^\circ$. Наиболее близкое значение среднего угла к идеальному, равное $165,36^\circ$ показывает образец, замещенный стронцием $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Стоит отметить, что значение среднего угла комплексно замещенного образца $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$ отличается незначительно от такового

для образца, замещенного стронцием $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Это свидетельствует о том, что основной вклад в снятие искажения кристаллической структуры исходного манганита вносит гетеровалентное замещение празеодима стронцием. В этом случае совокупность двух факторов оказывает влияние на искажение: уменьшение количества ян-теллеровских ионов Mn^{3+} и увеличение $\langle r_A \rangle$.

Рисунок 4 наглядно демонстрирует влияние вариативности замещения иона Pr на отклонение от вертикальной (φ_1) и горизонтальной (φ_2) плоскостей марганец-кислородных октаэдров в кристаллической структуре манганитов празеодима.

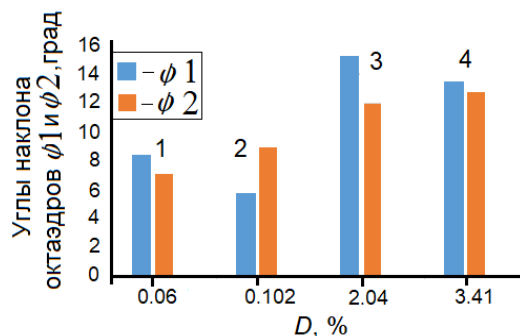


Рис. 4. Эволюция наклона октаэдров MnO_6 кристаллической структуры манганитов празеодима от степени искажения D:
1 — $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 2 — $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 3 — $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$; 4 — PrMnO_3

Fig. 4. Evolution of the tilt of the MnO_6 octahedra of the crystal structure of praseodymium manganites on the degree of distortion D:
1— $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 2— $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$; 3— $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$; 4— PrMnO_3

Исходный манганит PrMnO_3 показывает отклонения октаэдров MnO_6 в обеих плоскостях примерно на равную величину. Замещение Pr/Gd приводит к увеличению наклона вдоль вертикальной плоскости и некоторому снижению наклона вдоль горизонтальной плоскости. При замещении Pr/Sr наклон октаэдров уменьшается в обеих плоскостях, причем вдоль вертикальной плоскости он снижается более существенно. Комплексное замещение Gd и Sr приводит к уменьшению наклона октаэдров в обеих плоскостях по сравнению с исходным манганитом. Однако в сравнении с манганитом, замещенным Sr, наклон октаэдров увеличивается в вертикальной плоскости, но снижается в горизонтальной. Это приводит к усреднению наклона в обеих плоскостях и в целом к снижению искажения элементарной ячейки манганита $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$.

Ян-теллеровский переход от орбитально упорядоченного (O' -фаза) к орбитально неупорядоченному (O -фаза) состоянию может быть вызван изменением химического состава оксида, что мы наблюдаем в комплексно замещенном образце $(\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1})_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Другим фактором влияния может быть воздействие температуры. Температурная эволюция структуры и фазовых превращений манганитов празеодима изучена методом высокотемпературной рентгенографии (рис. 5). Ян-теллеровский переход зафиксирован для исходного образца и замещенных $\text{Pr}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{MnO}_3$ и $\text{Pr}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{MnO}_3$. Для образцов исходного и замещенного Gd (см. рис. 5, а, б) с ростом температуры наблюдается заметное уменьшение параметра b . Параметр a изменяется незначительно, при этом параметр $c/\sqrt{2}$ растет. При превышении значения параметра $c/\sqrt{2}$ над значением параметра a , устанавливается температура начала ЯТ перехода (T^*). В температурном диапазоне от комнатной до температуры T^* на дифрактограммах фиксируются только рефлексы, соответствующие O' -фазе, с характерным соотношением параметров элементарной ячейки (закрытые символы). Последующее повышение температуры приводит к снижению интенсивности рефлексов O' -фазы, наряду с которыми появляются рефлексы, соответствующие O -фазе (открытые символы). Эта температурная область сосуществования обеих фаз (O' и O). Температура окончания ян-теллеровского перехода ($T_{\text{ЯТ}}$) устанавливается, когда на дифрактограмме отсутствуют рефлексы O' -фазы и регистрируются только рефлексы O -фазы с соответствующим соотношением параметров элементарной ячейки.

Изменение объема элементарной ячейки в области ЯТ перехода (см. рис. 5, *a–в*) указывает на фазовый переход первого рода. Образец, замещенный стронцием ($\text{Pr}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{MnO}_3$), имеет менее искаженную кристаллическую структуру, близкие друг к другу значения параметров элементарной ячейки, поэтому температурные изменения параметров ячейки в нем менее заметны по сравнению с исходным и замещенным Gd образцами. Температура перехода изменяется в зависимости от состава. Замещение Sr существенно понижает $T_{\text{ЯТ}}$. Это характерно для манганитов, в которых ионы редкоземельных металлов замещают ионами щелочноземельных элементов (Ca, Sr, Ba) [Pollert et al., 1982; Knizek et al., 1992; Vedmid' et al., 2022; Vedmid' et al., 2023; Vedmid' et al., 2024; Vedmid' et al., 2024; Vedmid' et al., 2025]. Замещение Gd (см. рис. 5, *б*) также приводит к снижению $T_{\text{ЯТ}}$, но температура перехода менее заметно смещается в область низких температур. Дальнейшее повышение температуры приводит к структурному переходу в фазу с соотношением параметров ячейки, близким к псевдотетрагональной фазе ($a = c/\sqrt{2} < b$), температура перехода обозначена как T_{T} . Этот переход зафиксирован для исходного манганита (PrMnO_3) и замещенного стронцием ($\text{Pr}_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{MnO}_3$). Внедрение иона Gd в подрешетку Pr не приводит к такому структурному переходу при нагреве до температуры до 1200 °С. Для комплексно замещенного образца ($\text{Pr}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}$) $_{0.75}\text{Sr}_{0.25}\text{MnO}_3$, имеющего орбитально неупорядоченную (*O*-фаза) кристаллическую структуру, наблюдается монотонный рост параметров ячейки, вызванный температурным расширением (см. рис. 5, *з*).

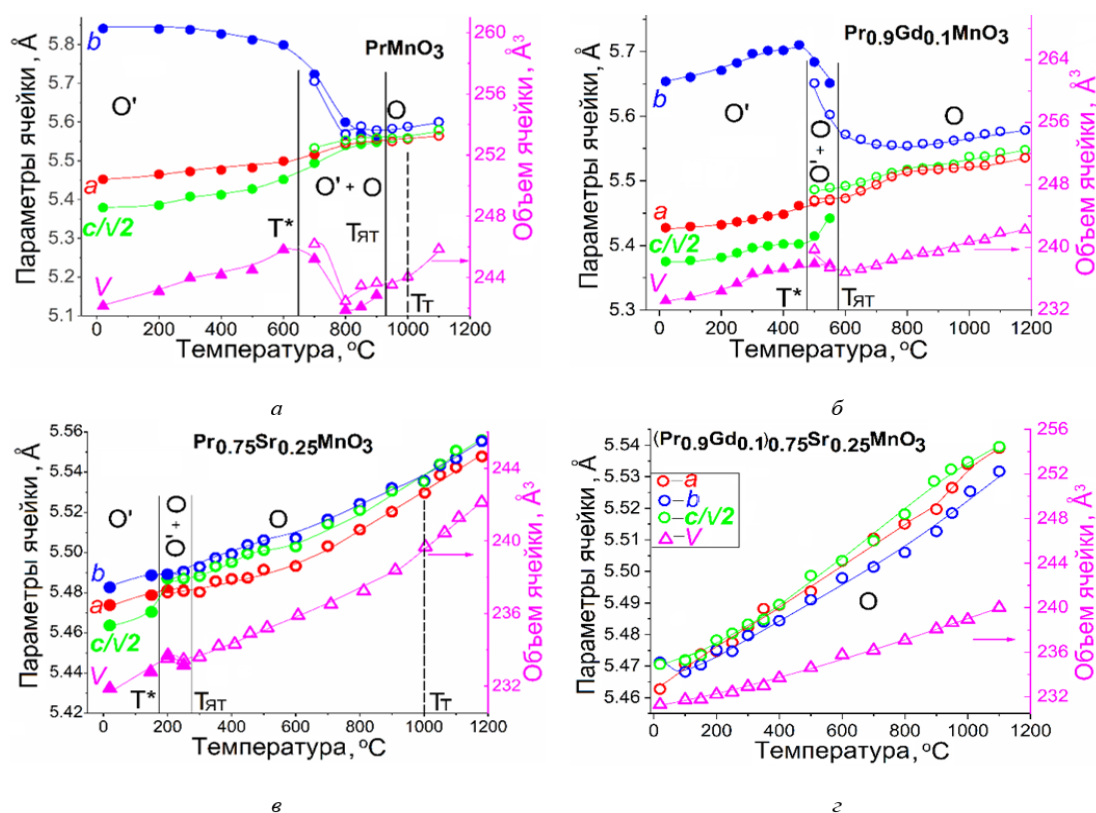


Рис. 5. Температурные зависимости параметров кристаллической решетки (a , b , $c/\sqrt{2}$) и объема элементарной ячейки (V) манганитов празеодима. Обозначения: параметры решетки O' -фазы (закрытые символы) и O -фазы (открытые символы); T^* и $T_{\text{ЯТ}}$ — температуры начала и конца ЯТ-перехода соответственно; T_{T} — температура перехода в псевдотетрагональную фазу. Ошибки в данных не превышают размера символов на графиках

Fig. 5. Temperature dependences of the crystal lattice parameters (a , b , $c/\sqrt{2}$) and the unit cell volume (V) of praseodymium manganites. Designations: lattice parameters of the O' phase (closed symbols) and O phase (open symbols); T^* and $T_{\text{ЯТ}}$ are the temperatures of the beginning and end of the JT transition, respectively, T_{T} is the temperature of the transition to the pseudotetragonal phase. Data errors do not exceed the size of the symbols on the graphs

Выводы

Исследована эволюция кристаллической структуры манганитов $(\text{Pr}_{1-y}\text{Gd}_y)_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ для $x = (0; 0,25)$ и $y = (0; 0,1)$ в диапазоне температур от комнатной до 1200 °С. Установлено, что комплексное замещение Pr/(Gd, Sr) приводит к снятию структурных искажений исходного манганита и переходу кристаллической структуры от орбитально упорядоченного (O' -фаза) к орбитально неупорядоченному (O -фаза) состоянию. Для образцов при замещении Pr/Gd и Pr/Sr подобный переход $O' \rightarrow O$ зафиксирован при нагревании. Определены температурные интервалы перехода и диапазоны термической устойчивости кристаллической структуры высокотемпературной (O) фазы образцов. Эволюция кристаллической структуры манганитов объясняется совместным влиянием изменения среднего ионного радиуса манганитов в А-подрешетке и степени ян-теллеровского искажения при замещении.

Список источников

- Ben Jazia Kharrat A., Khirouni K., Boujelben W.* Electrical and optical analysis of $\text{Pr}_{0,5-x}\text{Gd}_x\text{Sr}_{0,5}\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0,05, \text{ and } 0,1$) manganite compounds prepared via solid-state process // *Ionics*. 2024. Vol. 30. P. 1209–1222.
- Consistency between theoretical conduction models and experimental conductivity measurements of strontium-doped lanthanum manganite / W. Hizi [et al.] // J. Alloys Compd.* 2023. Vol. 957. P. 170418.
- Correlation of structural, magnetic and transport properties with the tolerance factor in a low-doped $\text{La}_{0,875}\text{Sr}_{0,125-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, ($0 \leq x \leq 0,125$) system: cross-over from Mott to Shklovskii–Efros variable range hopping conduction / E. Bose [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter.* 2007. Vol. 19. P. 266218.
- Detailed study of the structural and magnetic transitions in $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ single crystals ($0,48 \leq x \leq 0,57$) / E. Pollert [et al.] // J. Magn. Magn. Mater.* 2002. Vol. 246. P. 290–296.
- Effect of Gd doping on structural, electrical, magnetic, and thermal properties of $\text{La}_{0,7-x}\text{Gd}_x\text{Ba}_{0,3}\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0,1, 0,3, \text{ and } 0,5$) / N. Bhutia [et al.] // J. Alloys Compd.* 2025. Vol. 1044. P. 184224.
- Effect of low level doping with strontium on structure, magnetism and electron states in SmMnO_3 manganite / L. Vedmid [et al.] // J. Supercond. Novel Magn.* 2024. Vol. 37. P. 1429–1432.
- Gadolinium manganites substituted with barium $\text{Gd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0,0, 0,15, 0,18, 0,25$): Structural transitions, microstructure, magnetic and electrical properties / L. Vedmid' [et al.] // J. Alloys Compd.* 2023. Vol. 953. P. 170155.
- Goldschmidt V. M.* Die Gesetze der Krystallochemie // *Naturwissenschaften*. 1926. Vol. 14. P. 477–485.
- Goodenough J. B.* Electronic and ionic transport properties and other physical aspects of perovskites // *Rep. Prog. Phys.* 2004. Vol. 67. P. 1915–1993.
- Influence of low-level substitution Pr/(Sr or Ba) in PrMnO_3 on structure distortions, magnetic transitions, and surface evolution / L. Vedmid' [et al.] // J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 2024. Vol. 35. P. 1369.
- Karmakar A., Majumdar S., Giri S.* Tuning A-site ionic size in $\text{R}_{0,5}\text{Ca}_{0,5}\text{MnO}_3$ ($R = \text{Pr, Nd and Sm}$): robust modulation in dc and ac transport behavior // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2011. Vol. 23. P. 495902.
- Kharrat A. B., Khirouni K., Boujelben W.* Improving the physical properties of polycrystalline deficient $\text{Pr}_{0,8}\text{Sr}_{0,2-x}\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,2$) compounds for electronic devices // *J. Mater Sci: Mater Electron.* 2022. Vol. 33. P. 18632–18657.
- Knizek K., Jirak Z., Pollert E., Zounova F., Vraislav S.* Structure and magnetic properties of $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ perovskite // *J. Solid State Chem.* 1992. Vol. 100. P. 292–306.
- Kostoglou G. Ch., Vasilakos N., Ftikos Ch.* Preparation and characterization of $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3 \pm \delta}$ ($x = 0, 0,15, 0,3, 0,4, 0,5$) as a potential SOFC cathode material operating at intermediate temperatures (500–700 °C) // *J. Eur. Ceram. Soc.* 1997. Vol. 17. P. 1513–1521.
- Maris G., Volotchaev V., Palstra T. T. M.* Effect of ionic size on the orbital ordering transition in RMnO_{3-d} // *New J. Phys.* 2004. Vol. 6. P. 153–163.
- Mixed oxides of the $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($0,1 \leq x \leq 0,5$) system synthesized by a chemical route: Structural, electric and magnetic characterization / C. J. Aguilar [et al.] // J. Alloys Compd.* 2022. Vol. 899. P. 163291.
- Nagaev E. L.* Colossal-magnetoresistance materials: manganites and conventional ferromagnetic semiconductors // *Phys. Rep.* 2001. Vol. 346. P. 387–531.
- Nakajima T., Yoshizawa H., Ueda Y.* A-site randomness effect on structural and physical properties of Ba-based perovskite manganites // *J. Phys. Soc. Japan.* 2004. Vol. 73. P. 2283–2291.
- Pal A., Nagaraja B. S., Rachana K. J., Supriya K. V., Kekuda D., Rao A., Li Chia-Ruei, Kuo Y.-K.* Enhancement of temperature coefficient of resistance (TCR) and magnetoresistance (MR) of $\text{La}_{0,67-x}\text{RE}_x\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0,1$; RE = Gd, Nd, Sm) system via rare-earth substitution // *Mater. Res. Express.* 2020. Vol. 7. P. 036102.
- Pollert E., Krupička S., Kijzmičová E.* Structural study of $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ and $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ perovskites // *J. Phys. Chem. Solids.* 1982. Vol. 43(12). P. 1137–1145.

- Salamon M. B., Jaime M.* The physics of manganites: Structure and transport // *Modern Phys.* 2001. Vol. 73 (3). P. 583–628.
- Shannon R. D.* Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Cryst. A.* 1976. Vol. 32. P. 751–767.
- Size mismatch, grain boundary and bandwidth effects on structural, magnetic and electrical properties of Pr_{0.67}Ba_{0.33}MnO₃ and Pr_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ perovskites / S. Hcini [et al.] // *J. Alloys Comp.* 2011. Vol. 509. P. 1394–1400.*
- Sr-doped SmMnO₃ perovskites for high-performance near-isothermal solar thermochemical CO₂-to-fuel conversion / K. Gao [et al.] // *Sustain. Energy Fuels.* 2021. Vol. 5. P. 4295.*
- Structural and magnetic characteristics of gadolinium manganite modified with barium Gd_{0.9}Ba_{0.1}MnO₃ / L. Vedmid' [et al.] // *J. Supercond. Nov. Magn.* 2022. Vol. 35. P. 1141–1150.*
- The effect of structure evolution induced by Sr substitution on the properties of gadolinium manganite / W. Wu [et al.] // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 2025. Vol. 36. P. 1066.*
- Toby B. H.* EXPGUI, a graphical user interface for GSAS // *J. Appl. Crystallogr.* 2001. Vol. 34. P. 210–213.
- Tokura Y.* Critical features of colossal magnetoresistive manganites // *Rep. Prog. Phys.* 2006. Vol. 69. P. 797–851.
- Tsipis E. V., Kharton V. V.* Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review: I Electrochemical behavior vs. materials science aspects // *J. Solid State Electrochem.* 2008. Vol. 12. P. 1367–1391.
- Vedmid' L., Fedorova O., Belyakov S., Balakireva V., Sterkhov E., Uporov S.,* Effect of substitution in A and B sublattices on the structural, magnetic, electrical properties and microstructure of EuMnO₃ // *Emergent Materials.* 2025. Vol. 8. P. 4843–4861.
- Vedmid' L. B., Fedorova O. M., Balakireva V. B., Vorotnikov V. A., Balakirev V. F.* Structure and electrical conductivity of the perovskites Pr_{1-x}Sr_xMnO₃ (x = 0, 0.15, or 0.25) // *Phys. Solid State.* 2021. Vol. 63 (4). P. 556–561.
- Zener C.* Interaction between the d-Shells in the Transition Metals. II. Ferromagnetic Compounds of Manganese with Perovskite Structure // *Phys. Rev.* 1951. Vol. 82 (3). P. 403–405.
- Žužić A., Ressler A., Macan J.* Perovskite oxides as active materials in novel alternatives to well-known technologies: a review // *Ceram. Int.* 2022. Vol. 48. P. 27240–27261.

References

- Aguilar C. J., Diosa J. E., Mosquera E., Pérez Alcázar G. A., Rodríguez-Páez J. E., Bolaños G.* Mixed oxides of the Pr_{1-x}Sr_xMnO₃ (0.1 ≤ x ≤ 0.5) system synthesized by a chemical route: Structural, electric and magnetic characterization. *J. Alloys Compd.*, 2022, No. 899, 163291.
- Ben Jazia Kharrat A., Khirouni K., Boujelben W.* Electrical and optical analysis of Pr_{0.5-x}Gd_xSr_{0.5}MnO₃ (x = 0, 0.05, and 0.1) manganite compounds prepared via solid-state process. *Ionics*, 2024, No. 30, pp. 1209–1222.
- Bhutia N., He Y.-H., Kuo Y.-K., Rao A., P. Poonesh, Sunil D., Saravanan A., Deka U.* Effect of Gd doping on structural, electrical, magnetic, and thermal properties of La_{0.7-x}Gd_xBa_{0.3}MnO₃ (x = 0, 0.1, 0.3, and 0.5). *J. Alloys Compd.*, 2025, No. 1044, 184224.
- Bose E., Karmakar S., Chaudhuri B. K., Pal S., Martin C., Hébert S., Maignan A.* Correlation of structural, magnetic and transport properties with the tolerance factor in a low-doped La_{0.875}Sr_{0.125-x}Ca_xMnO₃, (0 ≤ x ≤ 0.125) system: cross-over from Mott to Shklovskii–Efros variable range hopping conduction. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2007, No. 19, 266218.
- Gao K., Liu X., Wang T., Zhu Z., Li P., Zheng H., Song C., Xuan Y., Li Y., Ding Y.* Sr-doped SmMnO₃ perovskites for high-performance near-isothermal solar thermochemical CO₂-to-fuel conversion. *Sustain. Energy Fuels*, 2021, No. 5, p. 4295.
- Goldschmidt V. M.* Die Gesetze der Krystallochemie. *Naturwissenschaften*, 1926, No. 14, pp. 477–485.
- Goodenough J. B.* Electronic and ionic transport properties and other physical aspects of perovskites. *Rep. Prog. Phys.*, 2004, No. 67, pp. 1915–1993.
- Hcini S., Zemni S., Triki A., Rahmouni H., Boudard M.* Size mismatch, grain boundary and bandwidth effects on structural, magnetic and electrical properties of Pr_{0.67}Ba_{0.33}MnO₃ and Pr_{0.67}Sr_{0.33}MnO₃ perovskites. *J. Alloys Compd.*, 2011, No. 509, pp. 1394–1400.
- Hizi W., Rahmouni H., Khirouni K., Dhahri E.* Consistency between theoretical conduction models and experimental conductivity measurements of strontium-doped lanthanum manganite. *J. Alloys Compd.*, 2023, No. 957, p. 170418.
- Karmakar A., Majumdar S., Giri S.* Tuning A-site ionic size in R_{0.5}Ca_{0.5}MnO₃ (R = Pr, Nd and Sm): robust modulation in dc and ac transport behavior. *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2011, No. 23, 495902.
- Kharrat A. B., Khirouni K., Boujelben W.* Improving the physical properties of polycrystalline deficient Pr_{0.8}Sr_{0.2-x}MnO₃ (0 ≤ x ≤ 0.2) compounds for electronic devices. *J. Mater Sci: Mater Electron.*, 2022, No. 33, pp. 18632–18657.
- Knizek K., Jirak Z., Pollert E., Zounova F., Vraislav S.* Structure and magnetic properties of Pr_{1-x}Sr_xMnO₃ perovskite. *J. Solid State Chem.*, 1992, No. 100, pp. 292–306.

Kostoglou G. Ch., Vasilakos N., Ftikos Ch. Preparation and characterization of $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_{3\pm\delta}$ ($x = 0, 0.15, 0.3, 0.4, 0.5$) as a potential SOFC cathode material operating at intermediate temperatures (500–700 °C). *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1997, No. 17, pp. 1513–1521.

Maris G., Volotchaev V., Palstra T. T. M. Effect of ionic size on the orbital ordering transition in RMnO_{3-d} . *New J. Phys.*, 2004, No. 6, pp. 153–163.

Nagaev E. L. Colossal-magnetoresistance materials: manganites and conventional ferromagnetic semiconductors. *Phys. Rep.*, 2001, No. 346, pp. 387–531.

Nakajima T., Yoshizawa H., Ueda Y. A-site randomness effect on structural and physical properties of Ba-based perovskite manganites. *J. Phys. Soc. Japan*, 2004, No. 73, pp. 2283–2291.

Pal A., Nagaraja B. S., Rachana K. J., Supriya K. V., Kekuda D., Rao A., Li Chia-Ruei, Kuo Y.-K. Enhancement of temperature coefficient of resistance (TCR) and magnetoresistance (MR) of $\text{La}_{0.67-x}\text{RE}_x\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0.1$; RE = Gd, Nd, Sm) system via rare-earth substitution. *Mater. Res. Express*, 2020, No. 7, 036102.

Pollert E., Jiráček Z., Hejtmánek J., Strejček A., Kužel R., Hardy V. Detailed study of the structural and magnetic transitions in $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ single crystals ($0.48 \leq x \leq 0.57$). *J. Magn. Magn. Mater.*, 2002, No. 246, pp. 290–296.

Pollert E., Krupička S., Kijzmičová E. Structural study of $\text{Pr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ and $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ perovskites. *J. Phys. Chem. Solids*, 1982, No. 43 (12), pp. 1137–1145.

Salamon M. B., Jaime M. The physics of manganites: Structure and transport. *Modern Phys.*, 2001, No. 73 (3), pp. 583–628.

Shannon R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst. A*, 1976, No. 32, pp. 751–767.

Toby B. H. EXPGUI, a graphical user interface for GSAS. *J. Appl. Crystallogr.*, 2001, No. 34, pp. 210–213.

Tokura Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites. *Rep. Prog. Phys.*, 2006, No. 69, pp. 797–851.

Tsipis E. V., Kharton V. V. Electrode materials and reaction mechanisms in solid oxide fuel cells: a brief review: I Electrochemical behavior vs. materials science aspects. *J. Solid State Electrochem.*, 2008, No. 12, pp. 1367–1391.

Vedmid L., Fedorova O., Fetisov A., Uporov S. Effect of low level doping with strontium on structure, magnetism and electron states in SmMnO_3 manganite. *J. Supercond. Novel Magn.*, 2024, No. 37, pp. 1429–1432.

Vedmid' L., Fedorova O., Balakireva V., Uporov S., Sterkhov E., Belyakov S. Gadolinium manganites substituted with barium $\text{Gd}_{1-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.0, 0.15, 0.18, 0.25$): Structural transitions, microstructure, magnetic and electrical properties. *J. Alloys Compd.*, 2023, No. 953, 170155.

Vedmid' L., Fedorova O., Belyakov S., Balakireva V., Sterkhov E., Uporov S. Effect of substitution in A and B sublattices on the structural, magnetic, electrical properties and microstructure of EuMnO_3 . *Emergent Materials*, 2025, No. 8, pp. 4843–4861.

Vedmid' L., Fedorova O., Fetisov A., Konysheva E., Uporov S. Influence of low-level substitution Pr/(Sr or Ba) in PrMnO_3 on structure distortions, magnetic transitions, and surface evolution. *J. Mater. Sci: Mater. Electron*, 2024, No. 35, 1369.

Vedmid' L., Fedorova O., Uporov S., Sterkhov E. Structural and magnetic characteristics of gadolinium manganite modified with barium $\text{Gd}_{0.9}\text{Ba}_{0.1}\text{MnO}_3$. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 2022, No. 35, pp. 1141–1150.

Vedmid' L. B., Fedorova O. M., Balakireva V. B., Vorotnikov V. A., Balakirev V. F. Structure and electrical conductivity of the perovskites $\text{Pr}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0.15, \text{ or } 0.25$). *Phys. Solid State*, 2021, No. 63 (4), pp. 556–561.

Wu W., Zhang S. L., Dai H. Y., Li T., Chen Z. P., Yan F. F. The effect of structure evolution induced by Sr substitution on the properties of gadolinium manganite. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.*, 2025, No. 36, 1066.

Zener C. Interaction between the d-Shells in the Transition Metals. II. Ferromagnetic Compounds of Manganese with Perovskite Structure. *Phys. Rev.*, 1951, No. 82 (3), pp. 403–405.

Žužić A., Ressler A., Macan J. Perovskite oxides as active materials in novel alternatives to well-known technologies: a review. *Ceram. Int.*, 2022, No. 48, pp. 27240–27261.

Информация об авторах

Л. Б. Ведмидь — кандидат химических наук, старший научный сотрудник;

О. М. Федорова — кандидат химических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

L. B. Vedmid' — PhD (Chemistry), Senior Researcher;

O. M. Fedorova — PhD (Chemistry), Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 18.02.2026; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 24.02.2026.
The article was submitted 18.02.2026; approved after reviewing 24.02.2026; accepted for publication 24.02.2026.

Научная статья
УДК 542.943-92
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.006

ОКИСЛИТЕЛЬНО-ДЕСТРУКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ С УЧАСТИЕМ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА В ПРИСУТСТВИИ МАГНИЙСИЛИКАТОВ

Елена Анатольевна Гудкова¹, Мария Николаевна Устинова², Ольга Евгеньевна Лебедева³

^{1, 2, 3}*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
(НИУ «БелГУ»), Белгород, Россия*

¹*gudkova@bsuedu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0734-5327>*

²*<https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>*

³*<https://orcid.org/0000-0002-5021-028X>*

Аннотация

В работе провели подбор химических экспресс-тестов для оценки свободнорадикальной активности материалов. Для этого были использованы 3 образца природных магнийсиликатов с различной структурой: крокидолит, хризотил и лизардит. В качестве тестовой была использована реакция окисления 2,4-динитрофенола. У обеих изученных тест-систем выявлены свои достоинства и недостатки. Достоверную информацию о способности материала генерировать высокоактивные свободные радикалы дают обе системы, однако выполнить сопоставление материалов в большей степени удается при использовании обеих систем в совокупности.

Ключевые слова:

магнийсиликаты, деструкция, пероксид водорода

Для цитирования:

Гудкова Е. А., Устинова М. Н., Лебедева О. Е. Окислительно-деструктивные процессы с участием пероксида водорода в присутствии магнийсиликатов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 52–58. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.006.

Original article

OXIDATIVE-DESTRUCTIVE PROCESSES INVOLVING HYDROGEN PEROXIDE IN THE PRESENCE OF MAGNESIUM SILICATES

Elena A. Gudkova¹, Maria N. Ustinova², Olga E. Lebedeva³

^{1, 2, 3}*Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia*

¹*gudkova@bsuedu.ru, <https://orcid.org/0009-0003-0734-5327>*

²*<https://orcid.org/0000-0001-5739-5339>*

³*<https://orcid.org/0000-0002-5021-028X>*

Abstract

The work was carried out selection of chemical express tests for the assessment of free-radical activity of materials. For this purpose, 3 samples of natural magnesium silicates with different structure (croquidolite, chrysotile and lizardite) were used. The oxidation reaction of 2,4-dinitrophenol was used as a test. Both studied test systems have their own advantages and disadvantages. Both systems provide reliable information about the material's ability to generate highly active free radicals, but it is more effective to compare materials using both systems together.

Keywords:

magnesium silicates, destruction, hydrogen peroxide

For citation:

Gudkova E. A., Ustinova M. N., Lebedeva O. E. Oxidative-destructive processes involving hydrogen peroxide in the presence of magnesium silicates // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 52–58. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.006.

Введение

Способность ионов железа генерировать свободные радикалы из пероксида водорода (процесс Фентона) известна более ста лет [Fenton, 1896]. Однако только в конце XX в. сложилось представление о том, что ряд патологических процессов в организме человека вызывается действием свободных кислородсодержащих радикалов по фентоноподобному механизму. Многие авторы полагают, что именно такие процессы отвечают за канцерогенность асбеста. Так, в работе [Weitzman et al., 1984]

было показано, что асбест способен генерировать гидроксидные радикалы из пероксида водорода; это свойство авторы связали с наличием железа в структуре асбеста. Роль свободных радикалов в патологических процессах, вызываемых асбестом, подробно рассмотрена в [Kamp et al., 1992]. Авторы [Henle, Linn, 1997] указывают на повреждения ДНК, вызываемые свободными радикалами; авторы [Xu et al., 2002] подтверждают связь генотоксичности крокидолита с его активностью в генерировании кислородсодержащих радикальных частиц. В работах [Turci et al., 2012] и [Pociask et al., 2004] обсуждаются механизмы действия асбеста на живые организмы: процессы, вызванные радикалами, изучаются на клеточном и молекулярном уровнях соответственно.

В то же время не все силикаты, содержащие железо, обладают канцерогенной, мутагенной и другой патологической активностью. Существует мнение, что необходимым условием для генерирования свободнорадикальных частиц из пероксида водорода является специфическое строение силикатов, обеспечивающее необходимую координацию ионов железа. В этом отношении интересна публикация [Ruda, Dutta, 2005], где авторы сравнивают два типа природных алюмосиликатов-цеолитов: канцерогенный эрионит и относительно безвредный морденит.

Оценка воздействия материалов на биологические системы представляет собой сложную экспериментальную задачу. В то же время химические процессы с участием радикалов, генерированных из пероксида водорода, хорошо изучены в растворах многих различных субстратов. Например, удобным объектом для изучения процесса Фентона считаются нитрофенолы [Solov'ev et al., 2007]. Применение химических тестов для оценки потенциальной опасности материалов для здоровья человека весьма облегчило бы задачу.

Целью настоящей работы являлся подбор химических экспресс-тестов для оценки свободнорадикальной активности материалов.

Материалы и методы

В работе использованы 3 образца природных магнийсиликатов с различной структурой (табл. 1). Крокидолит относится к группе амфиболовых гидросиликатов, а хризотил и лизардит — к серпентиновым. Крокидолит и хризотил являются канцерогенными, лизардит таких свойств не проявляет.

Содержание железа (см. табл. 1) в образцах оценивали методом рентгеновского энергодисперсионного анализа с использованием сканирующего электронного микроскопа QUANTA 3D.

Таблица 1

Характеристика исследуемых материалов

Characteristics of the studied materials

Образец	Химический состав	Кристаллическая структура	Массовая доля железа, %
Крокидолит	$\text{Na}_2\text{Mg}_3^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{OH})_2[\text{Si}_8\text{O}_{22}]$	Слоистый	8,4–46,9*
Хризотил	$\text{Mg}_6(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	Волокнистый	3,9
Лизардит	$\text{Mg}_6(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	Зернистая форма кристаллов	4,3

* Разброс значений в различных точках образца.

В качестве тестовой была использована реакция окисления 2,4-динитрофенола. Окислительную деструкцию 2,4-динитрофенола изучали в растворе объемом 25 мл с концентрацией 0,25 ммоль/л. В раствор добавляли расчетное количество пероксида водорода и вводили 0,1 г магнийсиликата. Полученную смесь перемешивали и выдерживали заданное время при комнатной температуре (24–27 °С). За изменением оптической плотности раствора 2,4-ДНФ следили с помощью спектрофотометра Sperecord при длине волны 365 нм относительно воды в кювете толщиной 1 см. Измерения продолжали в течение нескольких суток, периодически отбирая пробы для фотометрических измерений. Для учета адсорбции 2,4-динитрофенола на поверхности образцов параллельно проводили эксперимент без пероксида водорода.

Способность образцов вызывать свободнорадикальный распад пероксида водорода также изучали по авторской методике [Способ определения..., 2014] с помощью второй тестовой системы, состоящей из навески образца, пероксида водорода, раствора люминола. Люминол (3-аминофталевый гидразид) растворяли в 0,5М растворе гидроксида натрия; в готовый раствор вводили пероксид водорода и навеску образца. Изменения, происходящие в тестовой системе в присутствии образца, регистрировали методом хемилюминесценции на универсальном анализаторе Флюорат 02 АБЛФ-Т в течение 125 мин.

Результаты и обсуждение

Первоначальные эксперименты подтвердили, что 2,4-динитрофенол в растворе не разлагается пероксидом водорода, количество динитрофенола не изменяется в течение нескольких суток.

Было установлено, что при введении в раствор оксида железа (II) оптическая плотность раствора снижается за счет уменьшения pH раствора, но концентрация динитрофенола с течением времени не изменяется, окисление не происходит. Также не происходит окислительная деструкция динитрофенола и в присутствии оксида железа (III).

Иначе обстоит дело в случае хризотила. Введение этого образца в раствор, содержащий динитрофенол и пероксид водорода, вызывает постепенное снижение концентрации динитрофенола и, соответственно, рост его степени превращения (рис. 1). На 4-е сут степень превращения динитрофенола (F) превышала 50 %. Адсорбция 2,4-динитрофенола на хризотиле при данном соотношении реагентов оказалась незначительной, поэтому здесь и в последующих экспериментах ее не учитывали.

Необходимо было выявить и исключить другие возможные пути деструкции динитрофенола. Так, достаточно распространенными являются фотохимические процессы с участием пероксида водорода. В специальных экспериментах было показано, что превращение в системе 2,4-динитрофенол — пероксид водорода — хризотил протекает практически одинаково в темноте и на свету (рис. 2), то есть процесс фотохимическим не является.

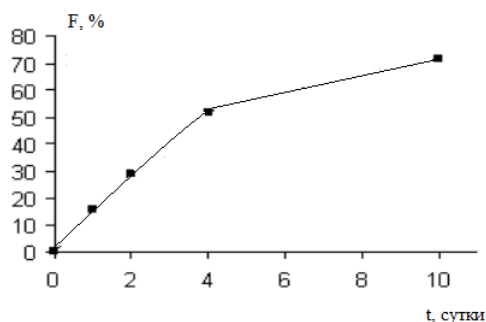


Рис. 1. Окисление 2,4-динитрофенола пероксидом водорода (0,413 моль/л) в присутствии хризотила

Fig. 1. Oxidation of 2,4-dinitrophenol with hydrogen peroxide (0.413 mol/l) in the presence of chrysotile

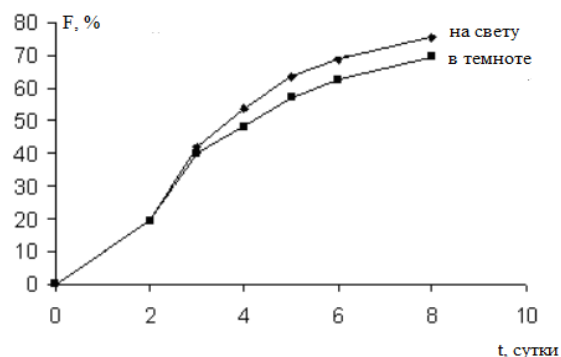


Рис. 2. Зависимость степени превращения 2,4-динитрофенола в присутствии пероксида водорода и хризотила от освещенности

Fig. 2. Dependence of the degree of conversion of 2,4-dinitrophenol in the presence of hydrogen peroxide and chrysotile on illumination

Принципиальным является вопрос, относится ли данный процесс к гомогенным либо к гетерогенным. Скорость истинного гетерогенного процесса зависит от перемешивания, но в нашем случае такая зависимость отсутствует. Результаты эксперимента, выполненного для оценки влияния перемешивания на протекание изучаемого процесса, представлены на рис. 3.

При исследовании окисления динитрофенола пероксидом водорода в присутствии твердых источников железа иногда процесс осуществляется в результате перехода части железа в раствор, как

это наблюдали, например, авторы [Li et al., 1999] при введении в раствор железосодержащего шлака. В нашем случае простая качественная реакция на железо (реакция с роданидом аммония) не обнаружила переход ионов железа в раствор. Кроме того, результаты рентгеновского энергодисперсионного анализа образцов после эксперимента с динитрофенолом позволяют утверждать, что содержание железа после процессов окисления не уменьшилось. Возможно, мы имеем дело с гомогенно-гетерогенным процессом: генерирование радикальных частиц протекает на поверхности хризотила, а окисление динитрофенола этими радикалами — в объеме.

Скорость процесса и глубина превращения динитрофенола зависят от pH раствора. Для подтверждения этого проводили эксперимент, в котором раствор подкисляли несколькими каплями ортофосфорной кислоты до pH = 3,5–4. При подкислении скорость процесса существенно возрастала и степень превращения увеличивалась более чем на 40 % (рис. 4).

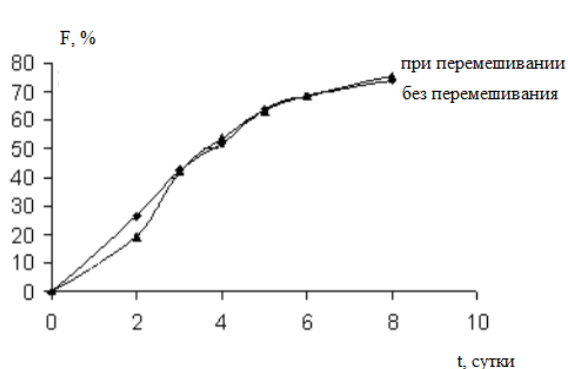


Рис. 3. Влияние перемешивания на окислительный процесс в системе динитрофенол — пероксид водорода — хризотил

Fig. 3. The effect of stirring on the oxidation process in the dinitrophenol—hydrogen peroxide—chrysotile system

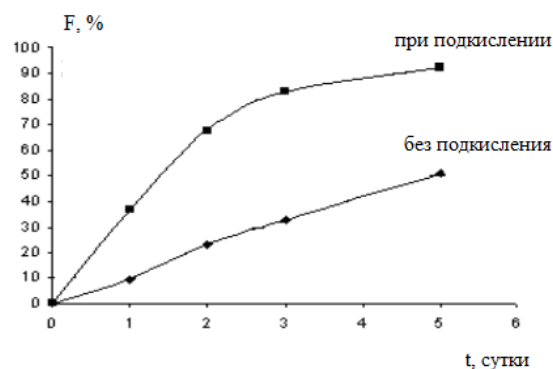


Рис. 4. Влияние подкисления на окислительный процесс в системе динитрофенол — пероксид водорода — хризотил

Fig. 4. The effect of acidification on the oxidation process in the dinitrophenol—hydrogen peroxide—chrysotile system

Концентрация пероксида водорода также оказывает заметное влияние на скорость деструкции 2,4-динитрофенола. Как видно из данных, представленных на рис. 5, с увеличением содержания пероксида монотонно растет степень превращения динитрофенола.

При низких концентрациях пероксида водорода в системе даже на пятые сутки степень превращения динитрофенола не достигает и 50 %. Оптимальной является концентрация пероксида водорода 0,413 моль/л. Ее и использовали в дальнейших экспериментах.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют о способности хризотила инициировать окислительно-деструктивные процессы в системе, содержащей пероксид водорода и 2,4-динитрофенол. Можно было ожидать, что эту реакцию удастся использовать как модельную для сравнения свободнорадикальной активности различных магнийсиликатных материалов.

Было изучено поведение в модельной реакции нескольких образцов магнийсиликатов, имеющих принципиально различное строение и содержание железа. Предполагалось, что они будут оказывать различное воздействие на раствор 2,4-динитрофенола в присутствии пероксида водорода. Как и в предыдущих экспериментах, к раствору динитрофенола добавляли равные навески исследуемых образцов и пероксид водорода концентрации 0,413 моль/л.

На рисунке 6 представлены кинетические кривые окисления динитрофенола в присутствии крокидолита, лизардита и хризотила. Можно видеть, что крокидолит вызывает наиболее глубокое окисление динитрофенола, хризотил с ним сопоставим, а реакционная способность лизардита гораздо ниже.

При анализе результатов, полученных с использованием различных силикатных материалов, можно отметить, что в целом они соответствуют существующим представлениям о свободнорадикальной

активности магнийсиликатов. Однако следует отметить, что лизардит, как не относящийся к волокнистым материалам, считают неспособным генерировать свободные радикалы. Тем не менее в наших экспериментах активность лизардита составляла около половины от активности хризотила.

Выше отмечалась зависимость результатов окисления от pH раствора. Этот факт мог оказаться полезным для разрешения возникших противоречий, поэтому было выполнено сравнение значений pH в изучаемых растворах. Данные представлены в табл. 2.

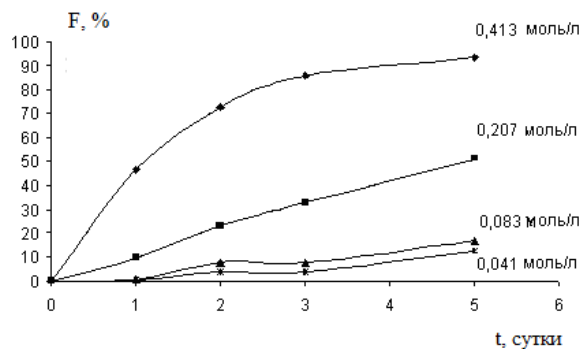


Рис. 5. Зависимость степени превращения 2,4-динитрофенола от концентрации пероксида водорода в присутствии хризотила

Fig. 5. Dependence of the degree of conversion of 2,4-dinitrophenol on the concentration of hydrogen peroxide in the presence of chrysotile

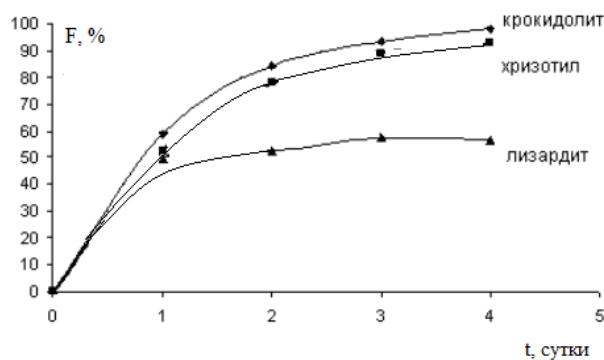


Рис. 6. Степень превращения 2,4-динитрофенола в присутствии пероксида водорода и различных образцов магнийсиликатов

Fig. 6. The degree of conversion of 2,4-dinitrophenol in the presence of hydrogen peroxide and various samples of magnesium silicates

Таблица 2

pH растворов 2,4-динитрофенола после окисления в присутствии различных магнийсиликатов и хемилюминесцентная активность образцов в тесте с люминолом

pH of 2,4-dinitrophenol solutions after oxidation in the presence of various magnesium silicates and chemiluminescent activity of samples in a luminol test

Образец	pH раствора динитрофенола на 4-е сут	Суммарная хемилюминесценция люминола за 125 мин, условные единицы
Крокидолит	5,82	207000 ± 19000
Хризотил	7,70	74000 ± 7000
Лизардит	4,29	62000 ± 11000

При сравнении образцов была отмечена видимая разница в значениях pH, наиболее кислыми оказались системы с участием лизардита. Интересно, что и вид кривой, отражающей поведение хризотила в окислительном процессе, отличается от двух других: уже через сутки кривая выходит на стационар (см. рис. 6). Отметим, что pK_a для 2,4-динитрофенола составляет 3,7; значения pH в растворе в присутствии лизардита близки к этой величине. Не исключено, что в ходе эксперимента часть динитрофенола могла изменить окраску, но не подвергнуться деструкции.

По-видимому, окисление 2,4-динитрофенола пероксидом водорода в присутствии магнийсиликатов может служить тестовой реакцией на радикальную активность последних, однако зависимость результатов от pH осложняет корректное сравнение образцов между собой.

Вторая тестовая система, использованная в настоящей работе, функционирует несколько иначе. Люминол является химическим активатором хемилюминесценции, под действием гидроксидных радикалов он образует продукт в возбужденном состоянии. Переход продукта в основное состояние сопровождается излучением кванта света. Значение хемилюминесценции коррелирует с концентрацией

радикальных частиц в системе. Три образца магнийсиликатов были изучены этим методом. Сравнительная характеристика значений хемилюминесценции приведена в табл. 2.

Данные табл. 2 подтверждают способность лизардита генерировать свободные радикалы. В то же время вторая тест-система позволяет дифференцировать крокидолит и хризотил: хорошо видно, что люминесценция в случае крокидолита значительно выше, что свидетельствует о большем количестве свободных радикалов, участвующих в процессе.

Заключение

Таким образом, у обеих изученных тест-систем выявлены свои достоинства и недостатки. Достоверную информацию о способности материала генерировать высокоактивные свободные радикалы дают обе системы, однако выполнить сопоставление материалов в большей степени удается при использовании обеих систем в совокупности.

Список источников

Способ определения свободнорадикальной активности твердых материалов. Патент РФ № 2535950 / Гудкова Е. А., Тарасенко Е. А.; опубл. 20.12.2014 Бюл. № 35.

Fenton H. J. H. Oxidation of tartaric acid in presence of iron // *J. Chem. Soc., Trans.* 1894. Vol. 65. P. 899–910.

Henle E. S., Linn S. Formation, Prevention, and Repair of DNA Damage by Iron/Hydrogen Peroxide // *Journal of Biological Chemistry.* 1997. Vol. 272. P. 19095–19098. DOI: 10.1074/jbc.272.31.19095.

Kamp D. W., Graceffa P., Pryor W. A., Weitzman S. A. The Role of Free-Radicals in Asbestos-Induced Diseases // *Free Radical Biology and Medicine.* 1992. Vol. 12 (4). P. 293–315. DOI: 10.1016/0891-5849(92)90117-Y.

Li Y.-S., You Y.-H., Lien E.-H. Oxidation of 2,4-Dinitrophenol by Hydrogen Peroxide in the Presence of Basic Oxygen Furnace Slag // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1999. Vol. 37. P. 427–433.

Mechanisms of the genotoxicity of crocidolite asbestos in mammalian cells: implications from mutation patterns induced by reactive oxygen species / A. Xu [et al.] // *Environmental Health Perspectives.* 2002. Vol. 110, No. 10. P. 1003–1008.

Pociask D. A., Sime P. J., Brody A. R. Asbestos-derived reactive oxygen species activate TGF- β_1 // *Laboratory Investigations.* 2004. Vol. 84. P. 1013–1023.

Ruda T. A., Dutta P. K. Fenton chemistry of Fe(III)-exchanged zeolitic minerals treated with antioxidants // *Environ. Sci. Technol.* 2005. Vol. 39 (16). P. 6147–6152.

Solov'ev A. A., Pashina M. A., Lebedeva O. E. Oxidative destruction of dinitrophenols by Fenton's reagent in the presence of inorganic salts // *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. No. 2. P. 275–278. DOI: 10.1134/S1070427207020218.

Surface reactivity and cell responses to chrysotile asbestos nanofibers / F. Turci [et al.] // *Chem Res Toxicol.* 2012. Vol. 25. P. 884–894.

Weitzman S. A., Graceffa P. Asbestos catalyzes hydroxyl and superoxide radical generation from hydrogen peroxide // *Archives of Biochemistry and Biophysics.* 1984. Vol. 228 (1). P. 373–376.

References

Fenton H. J. H. J. Oxidation of tartaric acid in presence of iron. *Chem. Soc., Trans.*, 1894, Vol. 65, pp. 899–910.

Henle E. S., Linn S. Formation, Prevention, and Repair of DNA Damage by Iron/Hydrogen Peroxide. *Journal of Biological Chemistry.* 1997, Vol. 272, pp. 19095–19098. DOI: 10.1074/jbc.272.31.19095.

Kamp D. W., Graceffa P., Pryor W. A., Weitzman S. A. The Role of Free-Radicals in Asbestos-Induced Diseases. *Free Radical Biology and Medicine.* 1992, Vol. 12 (4), pp. 293–315. DOI: 10.1016/0891-5849(92)90117-Y.

Li Y.-S., You Y.-H., Lien E.-H. Oxidation of 2,4-Dinitrophenol by Hydrogen Peroxide in the Presence of Basic Oxygen Furnace Slag. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 1999, Vol. 37, pp. 427–433.

Pociask D. A., Sime P. J., Brody A. R. Asbestos-derived reactive oxygen species activate TGF- β_1 . *Laboratory Investigations*, 2004, Vol. 84, pp. 1013–1023.

Ruda T. A., Dutta P. K. Fenton chemistry of Fe(III)-exchanged zeolitic minerals treated with antioxidants. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, Vol. 39 (16), pp. 6147–6152.

Solov'ev A. A., Pashina M. A., Lebedeva O. E. Oxidative destruction of dinitrophenols by Fenton's reagent in the presence of inorganic salts. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2007, No. 2, pp. 275–278. DOI: 10.1134/S1070427207020218.

Sposob opredeleniya svobodnoradikal'noj aktivnosti tverdykh materialov [A method for determining the free-radical activity of solid materials]. *Patent* RF No. 2535950, Gudkova E. A., Tarasenko E. A. Published on December 20, 2014, Bulletin No. 35. (In Russ.).

Turci F., Colonna M., Tomatis M., Mantegna S., Cravotto G., Gulino G., et al. Surface reactivity and cell responses to chrysotile asbestos nanofibers. *Chem Res Toxicol.*, 2012, Vol. 25, pp. 884–894.

Weitzman S. A., Graceffa P. Asbestos catalyzes hydroxyl and superoxide radical generation from hydrogen peroxide. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1984, Vol. 228 (1), pp. 373–376.

Xu A., Zhou H., Yu D. Z., Hei T. K. Mechanisms of the genotoxicity of crocidolite asbestos in mammalian cells: implications from mutation patterns induced by reactive oxygen species. *Environmental Health Perspectives*, 2002, Vol. 110, No. 10, pp. 1003–1008.

Информация об авторах

Е. А. Гудкова — кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии;

М. Н. Устинова — кандидат химических наук, доцент кафедры общей химии;

О. Е. Лебедева — доктор химических наук, профессор кафедры общей химии.

Information about the authors

E. A. Gudkova — PhD, Associate Professor, Department of General Chemistry;

M. N. Ustinova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, Department of General Chemistry;

O. E. Lebedeva — DSc, Professor, Department of General Chemistry.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Научная статья
УДК 620.9
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.007

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Николай Матвеевич Кузнецов

*Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия, n.kuznetsov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9440-8677>*

Аннотация

В статье рассматривается состояние теплоснабжающих систем в Мурманской области на современном этапе развития. Показана структура расхода топлива на генерацию электроэнергии и теплоэнергии. Основными видами топлива для Мурманской области являются мазут и уголь. Высокая транспортная составляющая в их стоимости приводит к необходимости предоставления теплогенерирующим организациям субсидии на компенсацию недополученных доходов. Замещение неэффективной мазутной и угольной генерации тепловой энергии источниками производства теплоэнергии с использованием природного газа, электроэнергии, возобновляемых источников поможет повысить энергетическую эффективность производства и потребления тепловой энергии и снизить энергоёмкость, уменьшить негативное воздействие на окружающую среду.

Ключевые слова:

Мурманская область, топливо, электроэнергия, тепловая энергия, источники тепловой энергии, тепловые сети

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2025-0057).

Для цитирования:

Кузнецов Н. М., Теплоснабжение потребителей Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 59–72. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.007.

ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING

Original article

HEAT SUPPLY TO CONSUMERS IN THE MURMANSK REGION

Nikolai M. Kuznetsov

*Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, n.kuznetsov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9440-8677>*

Abstract

The article examines the state of heating systems in the Murmansk region at the current stage of development. It shows the structure of fuel consumption for generating electricity and heat energy. The main fuels for the Murmansk region are fuel oil and coal. The high transportation component in the cost of coal and fuel oil leads to the need to provide subsidies to heat-generating organizations to compensate for lost revenues. Replacing inefficient fuel oil and coal-fired thermal energy generation with thermal energy production sources using natural gas, electricity, and renewable energy sources will help increase the energy efficiency of thermal energy production and consumption, reduce energy intensity, and mitigate the negative impact on the environment.

Keywords:

Murmansk region, fuel, electricity, thermal energy, thermal energy sources, thermal networks

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2025-0057).

For citation:

Kuznetsov N. M., Heat supply to consumers in the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 59–72. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.007.

Введение

Развитие российского топливно-энергетического комплекса по сценарию ускоренного энергетического перехода предполагает возвращение к более быстрым темпам декарбонизации энергетики на основе возобновляемых источников энергии [Энергетическая стратегия..., 2025]. В условиях энергетического перехода [Холкин, Чаусов, 2020] важными направлениями развития энергоснабжающих систем являются: переход от принципов пассивного качественного управления к идеологии активного количественного регулирования отпуска энергии; разделение систем теплопотребления, тепловых систем и источников на независимые контуры с помощью установки теплообменников, что обеспечивает регулирование температуры в помещениях и повышает надежность и качество теплоснабжения [Стенников, 2023].

Условия развития теплоэнергетики в настоящее время изменились: значительно большее внимание уделяется экологическим проблемам, появляются перспективы строительства атомных станций малой мощности и мини-ТЭЦ с газотурбинными установками, развивается распределенная энергетика с использованием возобновляемых источников энергии, совершенствуется оборудование и инфраструктура в сфере производства, передачи и потребления энергии [Макаров и др., 2024].

Важными задачами развития теплоснабжающих систем арктических территорий Российской Федерации являются преодоление транспортных и энергетических ограничений [Лексин, Порфирьев, 2015; Nalivaychenko, Volkov, 2020], препятствующих повышению темпов экономического развития Арктики, стимулирование приоритетной разработки и внедрения энергосберегающих и энергоэффективных технологий, перевод отопительных котельных в удаленных северных регионах в режим когенерации [Губий, 2025].

Основными направлениями развития и модернизации теплоснабжающих систем в Мурманской области являются совершенствование энергетической инфраструктуры, замена оборудования мазутной и угольной теплогенерации на оборудование, использующее возобновляемые источники энергии [Коновалова, Кузнецов, 2018; Кириллов и др., 2025], электроэнергию [Кузнецов, Лазарев, 2023] и биотопливо [Кузнецов, Морозов, 2023].

Топливоснабжение

Основным видом топлива для Мурманской области является мазут [Прогнозный..., 2025], его доля в структуре расхода топлива составляет более 70 % (рис. 1).

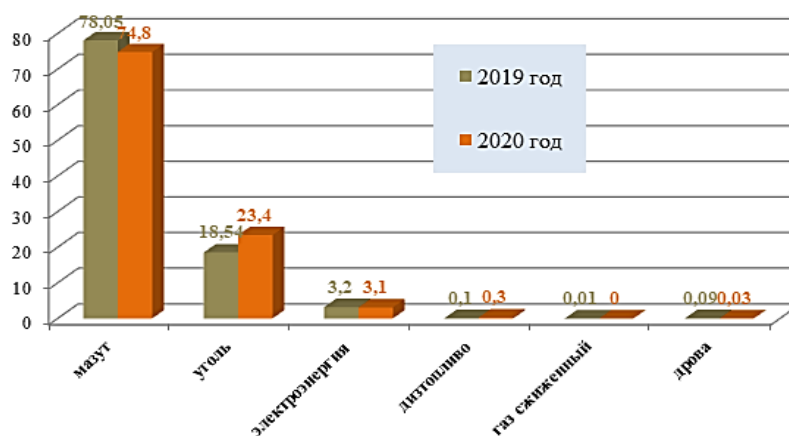


Рис. 1. Структура расхода топлива на генерацию электроэнергии и теплоэнергии, %

Fig. 1. Structure of fuel consumption for electricity and heat generation, %

Каменный уголь. Доставка угля в Мурманскую область для источников теплоснабжения производится железнодорожным транспортом на расстояние более 5000 км. Выгрузка каменного угля из вагонов осуществляется в городах (рис. 2), которые имеют железнодорожные пути необщего пользования.

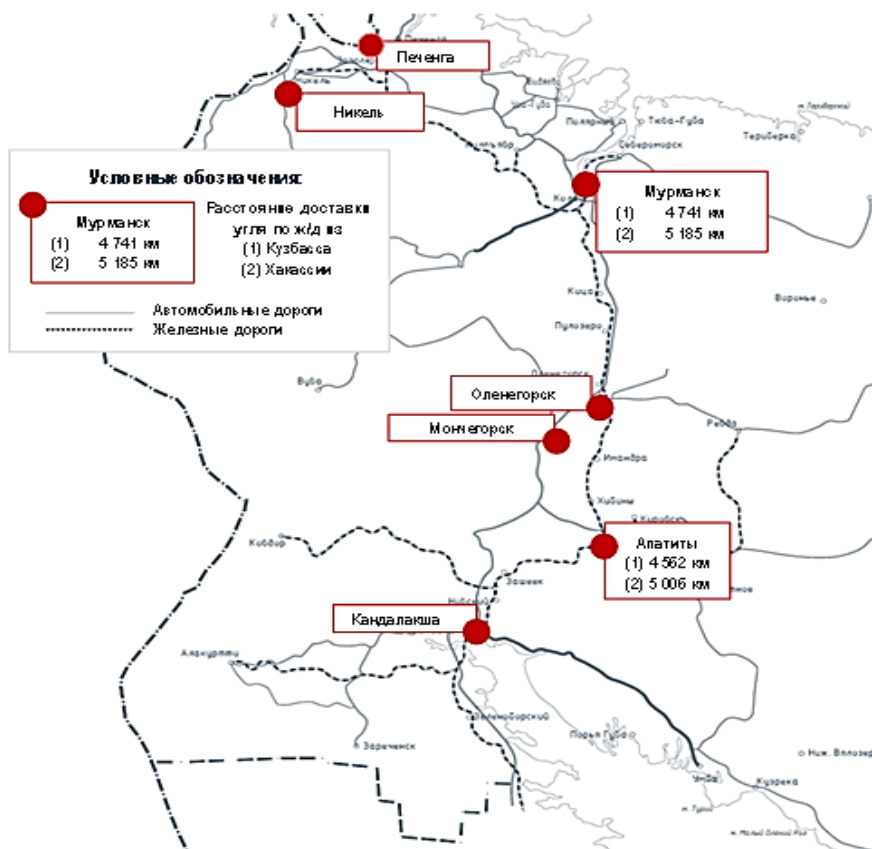


Рис. 2. Пункты разгрузки каменного угля в Мурманской области
Fig. 2. Coal unloading points in the Murmansk region

С пунктов разгрузки вагонов каменного угля на железнодорожных станциях уголь по автомобильным дорогам автотранспортом доставляется на котельные населенных пунктов Мурманской области. На рис. 3 и 4 приведены расстояния доставки угля автомобильным транспортом от железнодорожных станций Кандалакша и Мурманск до котельных в населенных пунктах более 100 км.

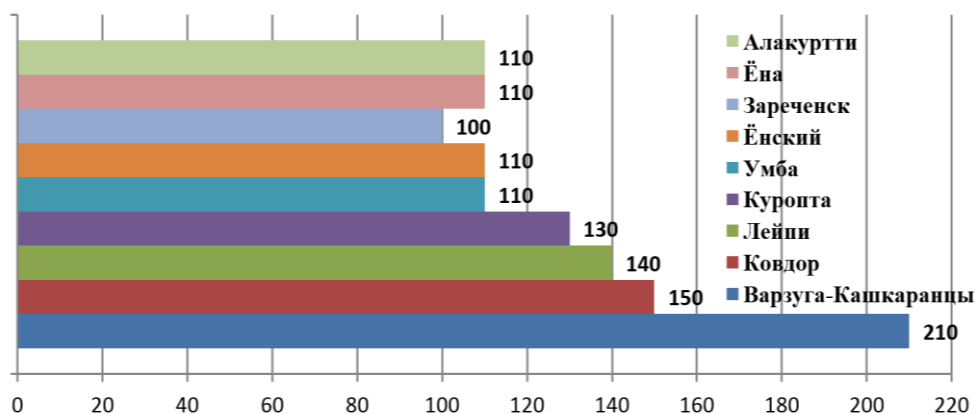


Рис. 3. Расстояние доставки каменного угля от железнодорожной станции Кандалакша, км
Fig. 3. Delivery distance of coal from the Kandalaksha railway station, km

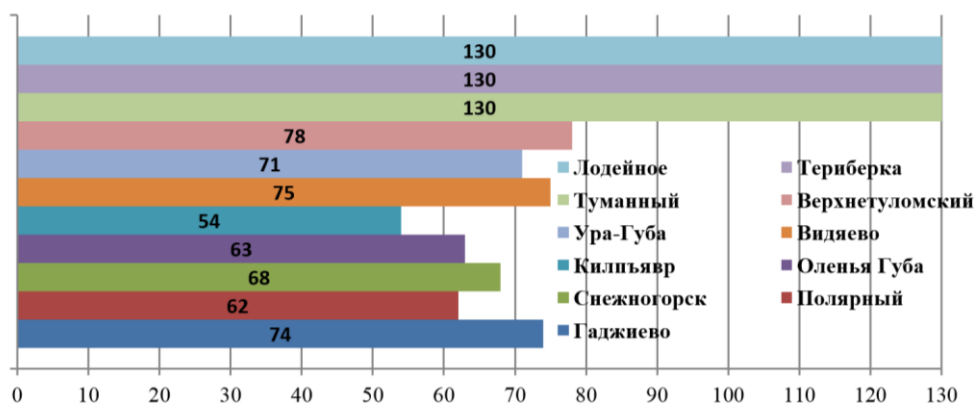


Рис. 4. Расстояние доставки каменного угля от железнодорожной станции Мурманск, км

Fig. 4. Distance of coal delivery from the Murmansk railway station, km

Топливный мазут. Мазут в Мурманскую область на пункты разгрузки доставляется в цистернах железнодорожным транспортом (рис. 5).

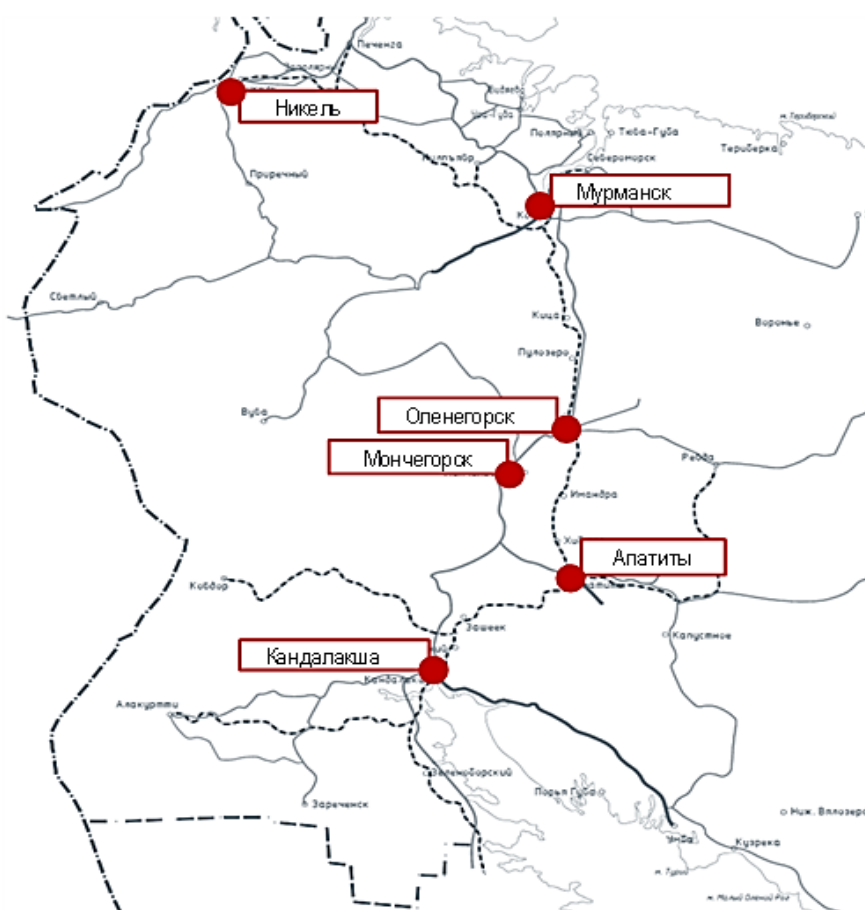


Рис. 5. Пункты разгрузки мазута в Мурманской области

Fig. 5. Fuel oil unloading points in the Murmansk region

После разгрузки топлива в пунктах разгрузки на железнодорожных станциях топочный мазут доставляется автоцистернами до котельных населенных пунктов.

На долю крупнейшего потребителя мазута среди источников теплоснабжения (Мурманская ТЭЦ) приходится 22 % всех объемов потребляемого мазута. На части источников системы теплоснабжения также используется дизельное топливо.

Высокая транспортная составляющая в стоимости угля и мазута приводит к необходимости предоставлять теплогенерирующим организациям субсидии на компенсацию недополученных доходов.

Торф. Запасы торфа в Мурманской области велики. Если ориентироваться на 100-летний период эксплуатации торфяных месторождений, то его можно добывать по 3 млн т. у. т. в год. Это соответствует годовому потреблению котельно-печного топлива области в настоящее время. По условиям торфонакопления территория области подразделяется на два основных торфяно-болотных района: район Тундровых месторождений, Кольско-Карельский торфяно-болотный район. Район Тундровых месторождений занимает северную и северо-восточную части Кольского полуострова. Кольско-Карельский торфяно-болотный район занимает южную часть территории области. По ряду природных особенностей для промышленного освоения наиболее благоприятны характеристики Кольско-Карельского торфяно-болотного района. В зависимости от характеристик торфа выделяют три основные разновидности месторождений: верховые, низинные и переходные. В качестве топлива чаще всего применяется верховой торф, в то время как низинный торф главным образом используется в качестве удобрения в сельском хозяйстве. По запасам торфа в области наибольшее распространение имеют торфяные месторождения низинного типа. Запасы торфа верхового и переходного типов не превышают в общей сложности 20 %. В настоящее время промышленная добыча торфа не производится, при этом выдано две лицензии ООО «Каскад-Агро»: на геологическое изучение месторождения «Шомба» и разведку и добычу месторождения «Катка-2». Оба месторождения расположены в Терском районе, на юге Мурманской области.

Основными факторами, препятствующими промышленной добыче торфа, являются природно-климатические условия: 1) продолжительность светового дня в летний период дает возможность вести добычу торфа почти круглосуточно, короткий световой день и полярная ночь с учетом суровых климатических условий центральной части Кольского полуострова делает почти невозможным проведение подготовительных работ, как это предусмотрено в районах с более мягким климатом; 2) меньшее количество солнечной радиации с учетом повышенной влажности воздуха усложняет технологию сушки торфа; 3) короткая продолжительность безморозного периода (60–120 дней).

Недостаточно исследований экологического характера, посвященных оценке влияния широкомасштабной добычи торфа на окружающую среду.

Разрабатывался ряд проектов по использованию торфа в Мурманской области как топлива в теплоснабжении. Бизнес-план проекта по организации добычи фрезерного и кускового торфа на месторождениях «Катка-2» и «Шомба» (220 тыс. тонн торфа в год) ООО «Каскад-Агро» предполагает производство торфяных и торфо-древесных гранул и брикетов (44 тыс. тонн в год) для организации снабжения котельных в Мурманской области. Проведенные испытания проб торфа месторождения «Катка» подтвердили пригодность торфа для использования в качестве коммунально-бытового топлива. Низшая теплота сгорания торфа принята в соответствии с данными по месторождению «Катка» и составляет 2795 ккал/кг для фрезерного торфа и 3250 ккал/кг для кускового торфа.

Биотопливо. Перевод угольной и дизельной генерации на биотопливо путем строительства и реконструкции двух действующих котельных в микрорайоне Дровяное и котельной в н. п. 25 км г. Мончегорска ведется с 2024 г. в рамках концессионного соглашения. Стоимость мероприятий составляет 102,8 млн руб. Реализация проекта обеспечит надежность теплоснабжения около 1000 человек.

Использование электроэнергии для теплоснабжения

Внедрение электрообогрева позволяет уменьшить затраты по сравнению с проектированием и монтажом системы теплоснабжения с газовым отоплением (особенно на негазифицированных удаленных территориях) [Белозеров и др., 2017], обеспечивает высокоэффективную работу

электрокотельных во всем диапазоне изменения производимой тепловой энергии [Торопов, 2022] с сокращением капитальных и эксплуатационных расходов и снижением выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду [Ibrahim et al., 2014; Schoeneberger et al., 2022].

Электрические котлы имеют быстрое время выхода на рабочий режим, что может приносить дополнительную экономическую эффективность при использовании избыточной электроэнергии по низким ценам на электроэнергию [Yilmaz et al., 2018]. Использование электроэнергии в системах централизованного теплоснабжения при изменении структуры тарифов может стимулировать увеличение инвестиций в возобновляемую энергетику [Sandberg et al., 2019].

Интеграция локальных систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии для теплоснабжения потребителей определяет необходимость повышения гибкости электроэнергетической системы [Schweiger et al., 2017] при изменении нагрузки потребителей (управление спросом). Электрокотельные с накопителями тепловой энергии позволяют повысить гибкость системы электроснабжения и увеличить потенциал преобразования электроэнергии в тепловую энергию.

Структура производства электроэнергии (рис. 6) в Мурманской области [Кузнецов, Коновалова, 2021] имеет благоприятные предпосылки для инвестирования финансовых средств в распределенную генерацию и управление спросом на электроэнергию с использованием возобновляемых источников энергии.

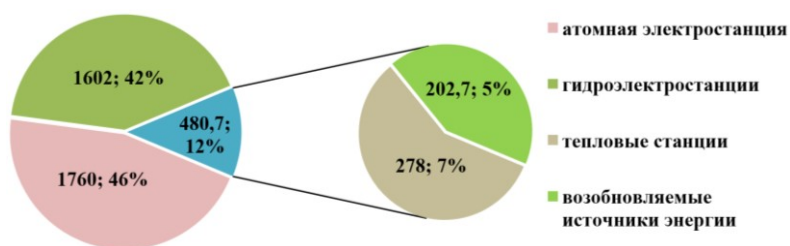


Рис. 6. Установленная мощность электростанций по типам энергоносителей, МВт

Fig. 6. Installed capacity of power plants by type of energy carrier, MW

Приоритетом инвестиционных предложений по модернизации систем теплоснабжения Мурманской области является минимизация экономически обоснованного тарифа. Для повышения эффективности объектов тепловой генерации принято повышение доли электроэнергии в структуре установленной тепловой мощности, разработан перечень инвестиционных предложений по модернизации котельных в населенных пунктах, подключенных к электросетям высокого напряжения.

Учитывая, что 80 % генерации тепловой энергии в регионе производится на мазуте [Прогнозный..., 2025], 16 % — на угле (рис. 7), при расчетах межтопливной конкуренции необходимо рассматривать варианты перевода источников теплоэнергии с мазута и угля на другие виды энергоресурсов.

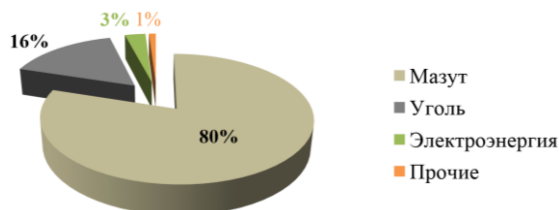


Рис. 7. Структура энергоресурсов для генерации тепловой энергии

Fig. 7. Structure of energy resources for thermal energy generation

Производство тепловой энергии на электрокотельных возможно при цене на электрическую энергию ниже цен на другие энергоресурсы, которые используются для производства тепловой энергии.

Для экономических расчетов межтопливной конкуренции на муниципальном уровне можно использовать приведенные цены на основные энергетические ресурсы, применяемые в хозяйственном обороте Мурманской области (рис. 8).

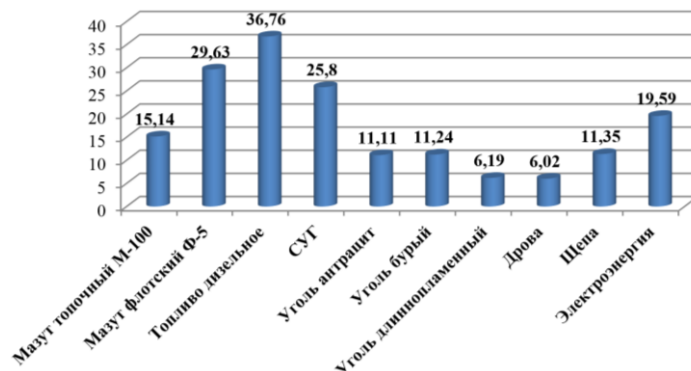


Рис. 8. Цены на энергетические ресурсы в Мурманской области, тыс. руб/т. у. т.

Fig. 8. Prices for energy resources in the Murmansk region, thousands rubles per ton of fuel oil

Перевод котельных, работающих на флотском мазуте и дизельном топливе, при наличии технических условий подключения к электросетям является экономически выгодным. При этом практически полностью исключаются вредные выбросы в окружающую среду и сокращаются затраты на обслуживание котельных. Сжиженные углеводороды в Мурманской области используются в основном населением.

Перспективы развития электроэнергетического комплекса Мурманской области в основном связаны с развитием атомной энергетики и гидроэнергетики. В энергосистеме области нет ограничений на распределение электроэнергии ее существующим потребителям. Установленная мощность Кольской АЭС и гидроэлектростанций позволяет увеличивать долю электрической энергии, используемой для нужд отопления, но для этого необходимо строительство электроэнергетических сетей разного напряжения, которое надо рассматривать одновременно на межрегиональном и межмуниципальном уровнях с учетом размещения генерирующих мощностей [Лаженцев, 2021].

В Мурманской области реализованы проекты по преобразованию электроэнергии в тепловую энергию, которые в основном связаны с инвестициями в системы теплоснабжения. В регионе для обеспечения тепловой энергией потребителей работает более 30 электродкотельных.

На мазутной котельной АТЭС-Полярные Зори в качестве топлива используется топочный мазут марки М-100 (3 % малозольный, 0,52 % серы) от двух емкостей объемом 1000 м³, угольная котельная Африканда-1 работает на каменном угле. Наибольший удельный вес (69,6 %) в структуре условного топлива имеет электроэнергия (рис. 9).

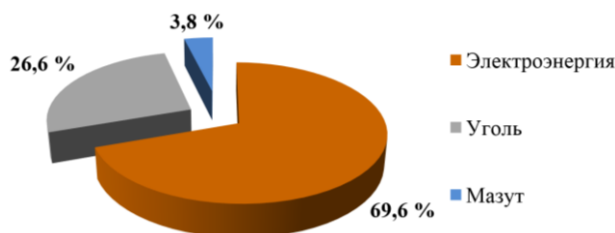


Рис. 9. Структура используемого топлива на котельных МО г. Полярные Зори

Fig. 9. Structure of fuel used in the boiler houses of the municipality of Polyarnye Zori

В эксплуатационную зону АТЭС-Полярные Зори входят два источника тепловой энергии: электродкотельная 2002 г. ввода в эксплуатацию (установленная мощность 48,16 Гкал/час), мазутная

котельная 1969 г. ввода в эксплуатацию (установленная мощность 79,7 Гкал/час). Котельные расположены в г. Полярные Зори и представляют собой единый технологический комплекс. Необходимо отметить, что мазутная котельная используется в основном для покрытия пиковых нагрузок в периоды наиболее низких температур наружного воздуха. Кроме того, мазутная котельная производит подготовку и транспортировку питательной воды для выработки пара электрокотлами. Теплоэнергия поставляется для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения потребителям г. Полярные Зори и населенного пункта Зашеек.

МУП «Энергия» эксплуатирует три источника тепловой энергии: электрокотельную в населенном пункте Африканда-2 (1988 г.), в населенном пункте Африканда — электробойлерную (1999 г.) и угольную котельную (1967 г.). Отпуск тепловой энергии потребителям, присоединенным к котельным, осуществляется по температурному графику 95/70 °С. Метод регулирования отпуска тепловой энергии в тепловую сеть центральный качественный, по открытой схеме теплоснабжения потребителей и зависимой схеме присоединения. Среднегодовая загрузка оборудования рассматриваемых котельных находится в пределах 20,91 %. Данное обстоятельство обусловлено тем, что все котлы на каждом из источников тепла работают одновременно только в условиях температурного минимума наружного воздуха.

В электрокотельных г. Полярные Зори и Африканда-2 аккумуляция горячей воды для подпитки тепловой сети происходит в баках-аккумуляторах. Для схемы нагрева обратной сетевой воды при работе по интервалам тарифных зон суток на котельной Африканда-2 дополнительно установлены бак аккумуляции тепловой энергии, теплообменник и сетевые насосы. Нагрев теплоносителя происходит преимущественно в ночное время с последующей подачей потребителям, что позволяет осуществлять выравнивание графика потребления электроэнергии.

В зоне действия котельных муниципального образования города Полярные Зори с 2024 г. выполняется перевод потребителей тепловой энергии с открытой системы горячего водоснабжения на закрытые системы с установкой индивидуальных тепловых пунктов (ИТП). Установка автоматизированных блочных тепловых пунктов уменьшит расход теплоносителя на отопление и горячее водоснабжение, исключит перетопы в помещениях зданий, улучшит качество теплоснабжения потребителей.

Общий объем требуемых капитальных вложений для развития систем теплоснабжения МО г. Полярные Зори с подведомственной территорией составляет около 1 млрд рублей с учетом НДС (объем собственных средств теплоснабжающих организаций составляет 8 %, привлеченные средства — 92 %) [Схема теплоснабжения..., 2022].

В г. Островной с 2005 по 2009 г. выполнен перевод системы отопления и горячего водоснабжения от мазутных котельных на автономные внутридомовые электрические котлы «Невский» мощностью от 45 до 100 кВт и «Интойс» мощностью от 27 до 45 кВт.

С декабря 2014 г. теплоснабжение и горячее водоснабжение поселка Коашва производится от электрической блочно-модульной котельной (БМК) [Схема теплоснабжения..., 2023]. Отопление и горячее водоснабжение до строительства электрокотельной производилось от промышленной котельной рудника «Восточный» (в качестве топлива использовался мазут), основным потребителем которой являлись объекты промышленной площадки Восточного рудника. Выработка тепловой энергии блочно-модульной электрокотельной и структура теплопотребления представлена на рис. 10.

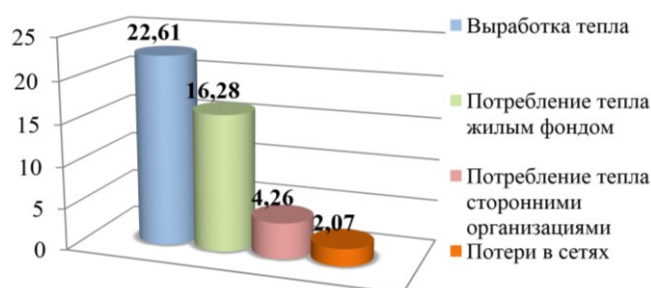


Рис. 10. Выработка тепловой энергии БМК и теплопотребление, тыс. Гкал/год

Fig. 10. Thermal energy generation by the block-modular boiler house and heat consumption, thousands Gcal/year

Установленная тепловая мощность электростанции составляет 5,97 Гкал/ч, присоединенная расчетная тепловая нагрузка — 5,38 Гкал/ч. Расчетные нормативные тепловые потери при температуре наружного воздуха -30°C в тепловых сетях составляют 0,75 Гкал/ч. С учетом тепловых потерь в сетях котельная имеет дефицит мощности в размере 0,16 Гкал/ч. Температурный график качественного отпуска тепловой энергии с электрической блочно-модульной котельной 105/70 $^{\circ}\text{C}$, со срезкой по горячему водоснабжению — до 65 $^{\circ}\text{C}$.

Эффективный радиус теплоснабжения блочно-модульной котельной н. п. Коашва 1,44 км. Радиус эффективного теплоснабжения позволяет определить условия, при которых подключение новых или увеличивающих тепловую нагрузку теплопотребляющих установок к системе теплоснабжения нецелесообразно вследствие увеличения совокупных расходов на единицу тепловой мощности.

В поселке Килпъявр компанией «АРХПРОМКОМПЛЕКТ» на базе котлов ZOTA реализован проект по теплоснабжению потребителей поселка стоимостью 57 млн рублей в рамках контракта жизненного цикла (оказание услуг технического обслуживания). Осуществлена поставка и сборка индивидуальных домовых электростанций, выполнены работы по подключению к сетям электроснабжения, водо-теплоснабжения и канализации зданий, а также заземление электростанций. Электростанции установлены в многоквартирных домах, школе и детском саду. Для установки котельных построены две линии электропередачи и трансформаторная подстанция. Бюджет инфраструктурных работ составил 14,5 млн рублей.

В рамках Комплексного инвестиционного проекта модернизации системы теплоснабжения Мурманской области выполняется модернизация энергетической инфраструктуры и топливного баланса региона, производится перевод котельных на использование электроэнергии по высокому уровню напряжения, а также замена мазута углем. На рис. 11 показано изменение структуры использования энергоресурсов на выработку тепловой энергии в регионе до 2030 г. Доля электроэнергии повысится с 3 до 6 %. В качестве доминирующего вида топлива на выработку тепловой энергии предполагается уголь.

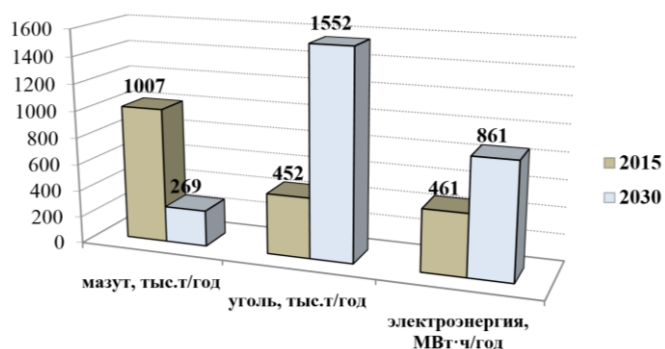


Рис. 11. Использование энергоресурсов на выработку тепловой энергии

Fig. 11. The use of energy resources for generating thermal energy

При оценке конкурентоспособности различных видов топлива на источниках, вырабатывающих тепловую энергию для промышленных предприятий и населения, необходимо учитывать стоимость энергоносителей и их технологические эксплуатационные и экологические свойства. Перевод источников теплоснабжения с угля и мазута на электроэнергию позволит значительно сократить загрязнение атмосферного воздуха продуктами сгорания органического топлива.

Источники тепловой энергии и тепловые сети

Существующие системы теплоснабжения спроектированы для обеспечения теплоэнергией с учетом увеличения численности населения и наращивания производственно-хозяйственной деятельности, поэтому источники теплоснабжения муниципальных образований оказались избыточными по установленной тепловой мощности.

К проблемам систем теплоснабжения Мурманской области относятся высокий уровень морального и физического износа оборудования источников и сетей теплоснабжения (рис. 12), низкая эффективность использования топлива.

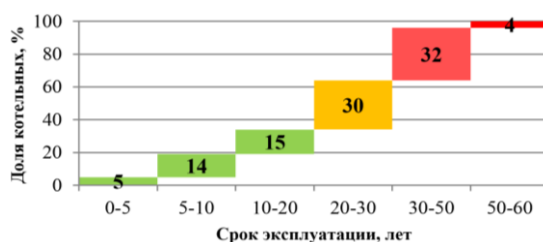


Рис. 12. Срок эксплуатации котлоагрегатов источников теплоснабжения

Fig. 12. Service life of boiler units in heat supply sources

Решение указанных проблем возможно при комплексной модернизации систем теплоснабжения и теплоснабжающих предприятий в целях оптимизации структуры топливного баланса области и снижения муниципальных бюджетных расходов на их содержание.

Потребление тепловой энергии

Основными потребителями теплоты являются жилищно-коммунальные хозяйства городов. Структура потребления тепловой энергии населением, бюджетными организациями и промышленными предприятиями в городах и поселках [Кузнецов, 2020] показана на рис. 13.

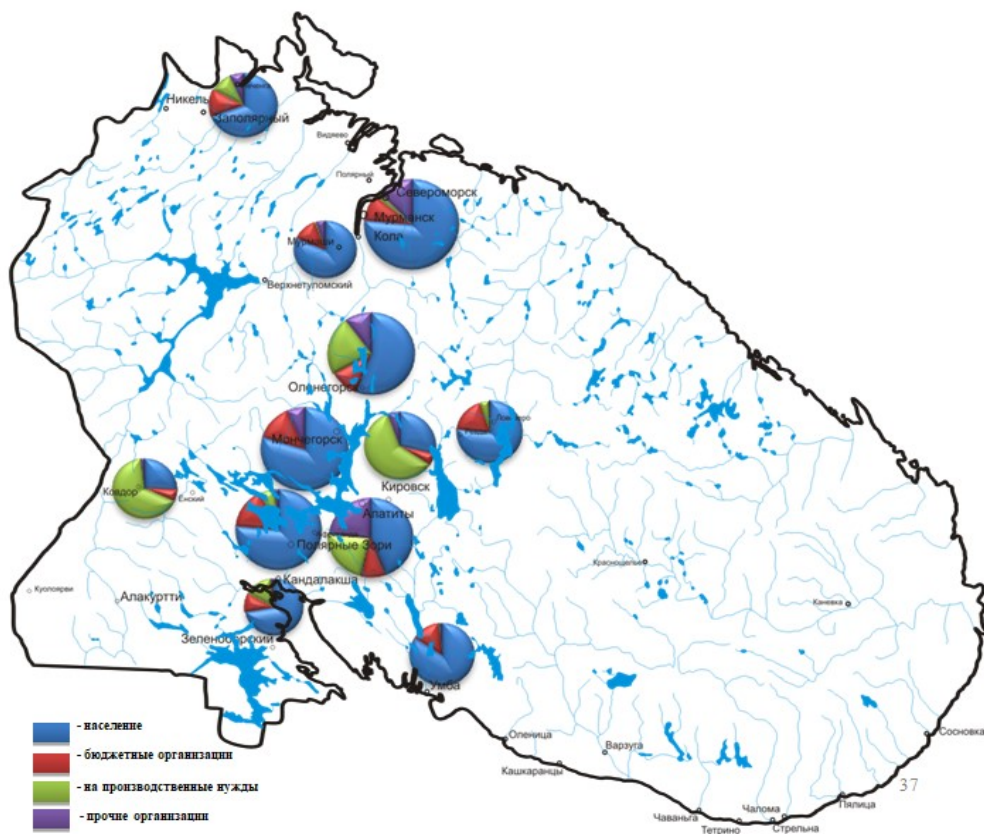


Рис. 13. Структура потребления теплоэнергии в населенных пунктах

Fig. 13. Structure of heat energy consumption in settlements

Отсутствие приборного учета (рис. 14) и регулирования потребления тепловой энергии определяет низкую эффективность потребляемой тепловой энергии в сфере жилищно-коммунального хозяйства Мурманской области.

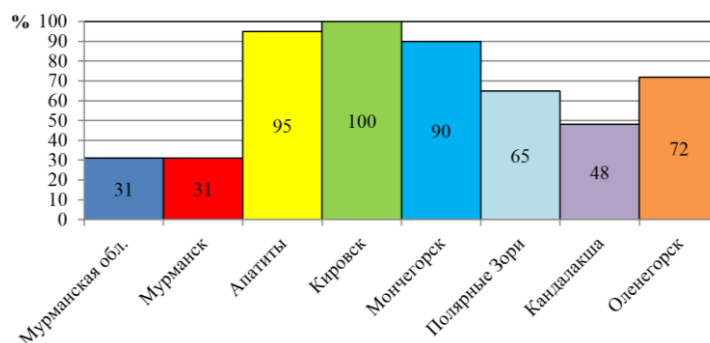


Рис. 14. Оснащенность приборами учета теплоэнергии в многоквартирных домах, % (2025 г.) [Мониторинг..., 2025]

Fig. 14. Equipping apartment buildings with heat energy metering devices, % (2025) [Monitoring..., 2025]

Повышение уровня энергетической эффективности в сфере теплоснабжения муниципальных образований области должно определяться внедрением энергосберегающих мероприятий при разработке комплексных программ развития коммунальной инфраструктуры.

Выбросы от стационарных источников

Выбросы основных загрязняющих веществ в атмосферный воздух Мурманской области от стационарных источников в 2023 г. составили 147,022 тыс. т. Наибольший объем выбросов основных загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух зафиксирован на территории города Мурманска — 28,2 тыс. т. (2022 г. — 24,8 тыс. т.) и Кандалакшского района — 22,7 тыс. т. (2022 г. — 16,6 тыс. т.). Распределение выбросов основных загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух по муниципальным районам и городским округам Мурманской области в 2023 г. [Схема теплоснабжения..., 2025] представлено на рис. 15.

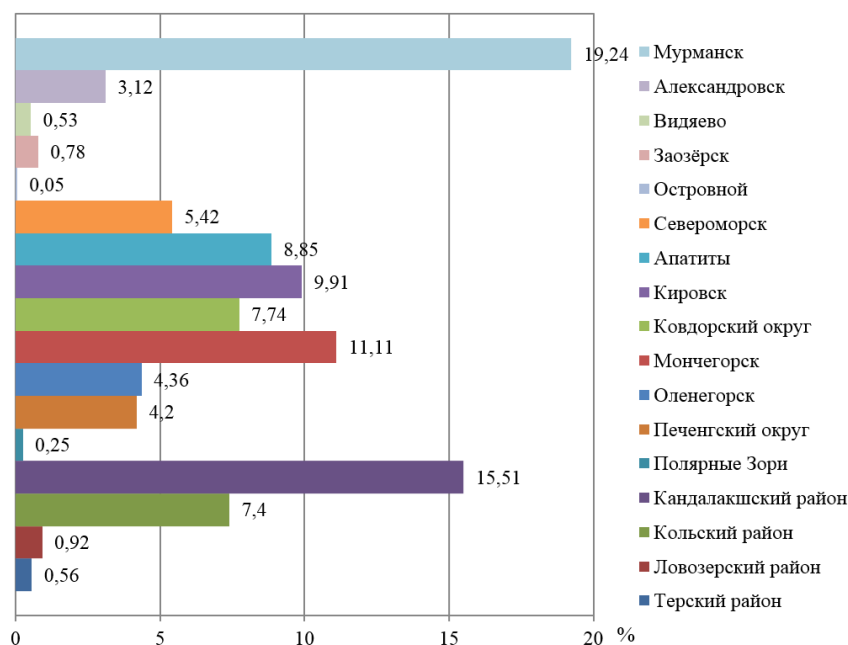


Рис. 15. Выбросы основных загрязняющих веществ, %

Fig. 15. Emissions of major pollutants, %

Объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными и передвижными источниками в 2023 г. уменьшились по сравнению с 2022 г.

Заключение

Основными направлениями развития и модернизации теплоснабжающих систем в Мурманской области являются: 1) развитие энергетической инфраструктуры, замена оборудования мазутной и угольной теплогенерации на оборудование, использующее природный газ, электроэнергию, возобновляемые источники энергии и биотопливо; 2) перевод отопительных котельных в режим когенерации; 3) разделение систем теплопотребления, тепловых систем и источников на независимые контуры с помощью установки теплообменников, что обеспечит регулирование температуры в помещениях и повысит надежность и качество теплоснабжения; 4) стимулирование внедрения энергосберегающих и энергоэффективных технологий.

Список источников

- Белозеров В. В., Долаков Т. Б., Белозеров В. В. О безопасности и перспективах электрообогрева в индивидуальных жилых домах // Современные наукоёмкие технологии. 2017. № 11. С. 7–13. EDN: ZWJSUP.
- Губий Е. В. Оценка эффективности когенерационных энергоустановок в Арктике и северных регионах России // Арктика и Север. 2025. № 58. С. 23–37. doi:10.37482/issn2221-2698.2025.58.23. EDN: RQMAUV.
- Коновалова О. Е., Кузнецов Н. М. Возобновляемые источники энергии в Мурманской области // Промышленная энергетика. 2018. № 9. С. 51–56. EDN: YOGUDJ.
- Кузнецов Н. М. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны Российской Федерации. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2020. 92 с.
- Кузнецов Н. М., Коновалова О. Е. Развитие распределенной энергетики в Мурманской области // Фундаментальные исследования. 2021. № 5. С. 122–127. doi:10.17513/fr.43049.
- Кузнецов Н. М., Лазарев Н. И. Экологические и экономические аспекты использования электроэнергии для теплоснабжения в Мурманской области // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. № 6. С. 45–50. EDN: WEATYW.
- Кузнецов Н. М., Морозов И. Н. Современное состояние топливно-энергетического комплекса Мурманской области // Современные наукоёмкие технологии. 2023. № 6. С. 56–61. doi:10.17513/snt.39631. EDN: DANQCR.
- Лажнецов В. Н. Арктика и Север в контексте пространственного развития России // Экономика региона. 2021. Т. 17, вып. 3. С. 737–754. doi:10.17059/ekon.reg.2021-3-2.
- Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н. Переосвоение российской Арктики как предмет системного исследования и государственного программно-целевого управления: вопросы методологии // Экономика региона. 2015. № 4. С. 9–20. doi:10.17059/2015-4-1. EDN: UYGGVH.
- Мониторинг состояния ОДПУ за II кв. 2025 г. URL: https://www.aemo.ru/predostavlenie_e/monitoring_uchef (дата обращения: 08.10.2025).
- Прогноз развития энергетики мира и России 2024 / под ред. А. А. Макарова [и др.]. М.: ИНЭИ РАН, 2024. 208 с.
- Прогнозный топливно-энергетический баланс Мурманской области до 2030 года. URL: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/> (дата обращения: 16.04.2025).
- Солнечная энергетика для энергоснабжения удаленных потребителей в Арктической зоне / И. Е. Кириллов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 1. С. 48–58. doi:10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58. EDN: RNPVKQ.
- Стенников В. Устойчивое развитие энергетики: тенденции и вызовы // Энергетическая политика. 2023. № 2 (180). С. 32–39. doi:10.46920/2409-5516_2023_2180_32. EDN: SAWIDW.
- Схема теплоснабжения муниципального образования город Кировск с подведомственной территорией на период до 2034 года (на 2020 год). URL: <https://kirovsk.ru/files/docs/ukgh/2019/2019%20Утверждаемая%20часть%20Схема%20ТС%20Кировск%20ПС.pdf> (дата обращения: 13.04.2023).
- Схема теплоснабжения муниципального образования город Полярные Зори с подведомственной территорией (актуализация на период 2023–2036 годов). URL: <http://www.pz-city.ru/index.php/skhema-teplosnabzheniya-munitsipalnogo-obrazovaniya-gorod-polyarnye-zori-s-podvedomstvennoj-territoriej> (дата обращения: 13.04.2023).
- Схема теплоснабжения муниципального образования городское поселение Зеленоборский Кандалакшского района Мурманской области до 2031 года (актуализация на 2025 год). Обосновывающие материалы. Книга первая. Зеленоборский, 2024 г. URL: <https://zelenoborskiy.ucoz.ru/index/skhemy/0-213> (дата обращения: 08.10.2025).
- Торопов А. Л. К вопросу о перспективах развития электрического поквартирного теплоснабжения // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2022. Т. 8, № 2. С. 9–18. EDN: WPIUJE.

Холкин Д., Чаусов И. Новая формула энергетического перехода // Энергетическая политика. 2020. № 12 (154). С. 40–53. doi:10.46920/2409-5516_2020_12154_40. EDN: IJQNAQ.

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. I. Общие положения. URL: <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYIA60.pdf> (дата обращения: 29.10.2025).

Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system / H. Ü. Yilmaz [et al.] // Energy Strategy Reviews. 2018. Vol. 20. P. 6–19. doi:10.1016/j.esr.2017.12.009.

Electrification potential of U. S. industrial boilers and assessment of the GHG emissions impact / C. Schoeneberger [et al.] // Advances in Applied Energy. 2022. Vol. 5. 100089. doi:10.1016/j.adapen.2022.100089.

Energy system impacts of grid tariff structures for flexible power-to-district heat / E. Sandberg [et al.] // Energy. 2019. Vol. 168. P. 772–781. doi:10.1016/j.energy.2018.11.035.

Nalivaychenko E., Volkov A., Tishkov S. Fuel and energy complex of the Arctic zone of Russia and its transport infrastructure // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 918. 012238. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012238.

Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects / O. Ibrahim [et al.] // Building and Environment. 2014. Vol. 72. P. 259–286. doi:10.1016/j.buildenv.2013.09.006.

The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems / G. Schweiger [et al.] // Energy. 2017. Vol. 137. P. 661–669. doi:10.1016/j.energy.2017.02.075.

References

Belozеров V. V., Dolakov T. B., Belozеров V. V. O bezopasnosti i perspektivakh elektroobogreva v individual'nykh zhilykh domakh [About the safety and prospects of electrical heating in individual residential buildings]. *Sovremennyye naukoymkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2017, No. 11, pp. 7–13. (In Russ.). EDN: ZWJSUP.

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2050 года. I. Общие положения [Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2050. I. General provisions]. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/LWYfSENa10uBrrBoyLQqAAOj5eJYIA60.pdf> (accessed 29.10.2025).

Gubiy E. V. Otsenka effektivnosti kogeneratsionnykh energoustanovok v Arktike i severnykh regionakh Rossii [Assessing the efficiency of cogeneration power plants in the Arctic and northern regions of Russia]. *Arktika i Sever* [The Arctic and the North], 2025, No. 58, pp. 23–37. (In Russ.). doi:10.37482/issn2221-2698.2025.58.23. EDN: RQMAUV.

Ibrahim O., Fardoun F., Younes R., Louahlia-Gualous H. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. *Building and Environment*, 2014, Vol. 72, pp. 259–286. doi:10.1016/j.buildenv.2013.09.006.

Kholkin D., Chausov I. Novaya formula energeticheskogo perekhoda [The new formula of energy transition]. *Энергетическая политика* [Energy policy], 2020, No. 12 (154), pp. 40–53. (In Russ.). doi:10.46920/2409-5516_2020_12154_40. EDN: IJQNAQ.

Kirillov I. E., Kuznetsov N. M., Lazarev N. I., Morozov I. N. Solnechnaya energetika dlya energosnabzheniya udalennykh potrebiteley v Arkticheskoy zone [Solar energy for power supply of remote consumers in the Arctic zone]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Proceedings of higher educational institutions. Power engineering problems], 2025, Vol. 27, No. 1, pp. 48–58. (In Russ.). doi:10.30724/1998-9903-2025-27-1-48-58. EDN: RNPVKQ.

Konovalova O. E., Kuznetsov N. M. Vozobnovlyаемые источники энергии в Мурманской области [Renewable energy sources in the Murmansk region]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2018, No. 9, pp. 51–56. (In Russ.). EDN: YOGUDJ.

Kuznetsov N. M. Upravlenie energoeffektivnost'yu v regionakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Energy efficiency management in the regions of the Arctic zone of the Russian Federation]. Apatity, Publ. KSC RAS, 2020, 92 p. (In Russ.).

Kuznetsov N. M., Konovalova O. E. Razvitie raspredelyonnoy energetiki v Murmanskoy oblasti [Development of distributed energy in the Murmansk region]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2021, No. 5, pp. 122–127. (In Russ.). doi:10.17513/fr.43049.

Kuznetsov N. M., Lazarev N. I. Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty ispol'zovaniya elektroenergii dlya teplosnabzheniya v Murmanskoy oblasti [Environmental and economic aspects of using electricity for heat supply in the Murmansk region]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie* [Energy safety and energy economy], 2023, No. 6, pp. 45–50. (In Russ.). EDN: WEATYW.

Kuznetsov N. M., Morozov I. N. Sovremennoe sostoyanie toplivno-energeticheskogo kompleksa Murmanskoy oblasti [Current state of the fuel and energy complex of the Murmansk region]. *Sovremennyye naukoymkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2023, No. 6, pp. 56–61. (In Russ.). doi:10.17513/snt.39631. EDN: DANQCR.

Lazhentsev V. N. Arktika i Sever v kontekste prostranstvennogo razvitiya Rossii [The Arctic and the North in the context of Russian spatial development]. *Ekonomika regiona* [Economy of the region], 2021, Vol. 17, Is. 3, pp. 737–754. (In Russ.). doi:10.17059/ekon.reg.2021-3-2.

Leksin V. N., Porfiriev B. N. Pereosvoenie rossiyskoy Arktiki kak predmet sistemnogo issledovaniya i gosudarstvennogo programmno-tselevogo upravleniya: voprosy metodologii [Redevelopment of the Arctic area of Russia as an objective of systems research and special-purpose program management methodological issues]. *Ekonomika regiona* [Economy of region], 2015, No. 4, pp. 9–20. (In Russ.). doi:10.17059/2015-4-1. EDN: UYGGVH.

Nalivaychenko E., Volkov A., Tishkov S. Fuel and energy complex of the Arctic zone of Russia and its transport infrastructure. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 918, 012238. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012238.

Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2024 [World and Russian energy development forecast 2024]. Moscow, ERI RAS, 2024, 208 p. (In Russ.).

Prognoznyy toplivno-energeticheskiy balans Murmanskoy oblasti do 2030 goda [Projected fuel and energy balance of the Murmansk region until 2030]. (In Russ.). Available at: <https://minenergo.gov-murman.ru/documents/npa/tek/reg/> (accessed 16.04.2025).

Sandberg E., Kirkerud J. G., Trømborg E., Bolkesjø T. F. Energy system impacts of grid tariff structures for flexible power-to-district heat. *Energy*, 2019, Vol. 168, pp. 772–781. doi:10.1016/j.energy.2018.11.035.

Schoeneberger C., Zhang J., McMillan C., Dunn J. B., Masanet E. Electrification potential of U. S. industrial boilers and assessment of the GHG emissions impact. *Advances in Applied Energy*, 2022, Vol. 5, 100089. doi:10.1016/j.adapen.2022.100089.

Schweiger G., Rantzer J., Ericsson K., Lauenburg P. The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems. *Energy*, 2017, Vol. 137, pp. 661–669. doi:10.1016/j.energy.2017.02.075.

Skhema teplosnabzheniya munitsipal'nogo obrazovaniya gorod Kirovsk s podvedomstvennoy territoriei na period do 2034 goda (na 2020 god) [Heat supply scheme for the municipality of Kirovsk with its subordinate territory for the period up to 2034 (for 2020)]. (In Russ.). Available at: <https://kirovsk.ru/files/docs/ukgh/2019/2019%20Утверждаемая%20часть%20Схема%20ТС%20Кировск%20ПС.pdf> (accessed 13.04.2023).

Skhema teplosnabzheniya munitsipal'nogo obrazovaniya gorod Polyarnye Zori s podvedomstvennoy territoriei (aktualizatsiya na period 2023–2036 godov) [Heat supply scheme for the municipality of Polyarnye Zori with its subordinate territory (updated for the period 2023–2036)]. (In Russ.). Available at: <http://www.pz-city.ru/index.php/skhema-teplosnabzheniya-munitsipalnogo-obrazovaniya-gorod-polyarnye-zori-s-podvedomstvennoj-territoriej> (accessed 13.04.2023).

Stennikov V. Ustoychivoe razvitiye energetiki: tendentsii i vyzovy [Sustainable energy development: trends and challenges]. *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2023, No. 2 (180), pp. 32–39. (In Russ.). doi:10.46920/2409-5516_2023_2180_32. EDN: SAWIDW.

Toropov A. L. K voprosu o perspektivakh razvitiya elektricheskogo pokvartirnogo teplosnabzheniya [On the prospects for the development of electrical apartment heat supply]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Bulletin of science and education of the North-West Russia], 2022, Vol. 8, No. 2, pp. 9–18. (In Russ.). EDN: WPIUJE.

Yilmaz H. Ü., Keles D., Chiodi A., Hartel R., Mikulić M. Analysis of the power-to-heat potential in the European energy system. *Energy Strategy Reviews*, 2018, Vol. 20, pp. 6–19. doi:10.1016/j.esr.2017.12.009.

Monitoring sostoyaniya ODPU za II kv. 2025 g [Monitoring of the state of equipment of houses with metering devices for the 2nd quarter of 2025]. (In Russ.). Available at: https://www.aemo.ru/predostavlenie_e/monitoring_uchef (accessed 08.10.2025).

Skhema teplosnabzheniya munitsipal'nogo obrazovaniya gorodskoe poselenie Zelenoborskiy Kandalakshskogo rayona Murmanskoy oblasti do 2031 goda (aktualizatsiya na 2025 god). Obosnovyvyayushchie materialy. Kniga pervaya [Heat supply scheme for the municipality of the urban settlement of Zelenoborsky of the Kandalaksha district of the Murmansk region until 2031 (updated for 2025). Supporting materials. Book One]. Zelenoborsky, 2024. (In Russ.). Available at: <https://zelenoborskiy.ucoz.ru/index/skhemy/0-213> (accessed 08.10.2025).

Информация об авторе

Н. М. Кузнецов — кандидат технических наук, заведующий лабораторией.

Information about the author

N. M. Kuznetsov — PhD (Engineering), Head of Laboratory.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 15.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 551.594.221
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.008

АНАЛИЗ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ В 2024 г.

Василий Николаевич Селиванов

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5681-065X>

Аннотация

В статье представлены результаты анализа молниевой активности на территории Мурманской области в 2024 г. Приводятся данные о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе молниевых разрядов и их распределении на местности. Исследована статистика аварийных отключений воздушных линий электропередачи, вызванных ударами молний в электрические сети на территории Мурманской области.

Ключевые слова:

молниевая активность, грозопеленгация, Мурманская область

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2025-0057).

Для цитирования:

Селиванов В. Н. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2024 г. // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 73–82. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.008.

Original article

ANALYSIS OF THE 2024 LIGHTNING ACTIVITY IN THE MURMANSK REGION

Vasilii N. Selivanov

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, v.selivanov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5681-065X>

Abstract

The article presents the results of an analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2024. Data on the duration of the thunderstorm season, the number of thunderstorm days, the number of lightning discharges and their distribution over the territory are given. The statistics of emergency failures of overhead power lines caused by lightning strikes in the power grids of the Kola power system are investigated.

Keywords:

lightning activity, lightning location, Murmansk region

Acknowledgments:

This work was carried out as part of a state assignment by the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2025-0057).

For citation:

Selivanov V. N. Analysis of the 2024 lightning activity in the Murmansk region // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 73–82. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.008.

Введение

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН с 2020 г. ежегодно выпускает обзоры молниевой активности на территории Мурманской области [Селиванов и др., 2020; Анализ..., 2022, 2023; Селиванов и др., 2024] на основе данных об ударах молний в землю сети грозопеленгации Blitzortung, находящихся в открытом доступе [Wanke et al., 2016]. В 2024 г. для анализа молниевой активности мы начали использовать данные глобальной сети грозопеленгации WWLLN, также имеющиеся в свободном доступе для скачивания [WWLLN]. Приводятся сведения о длительности грозового сезона, количестве грозовых дней, числе молниевых разрядов и их распределении по территории Мурманской области, а также количестве грозовых отключений воздушных линий электропередачи классов напряжений 35–330 кВ, расположенных в Мурманской области. Для анализа молниевой активности используются программы и базы данных собственной разработки [Программа нахождения..., 2020; Программа расчета..., 2020; Молниевые..., 2023; Программный..., 2024].

Глобальная сеть грозопеленгации WWLLN

Инициатором создания всемирной сети грозопеленгации (WWLLN — World Wide Lightning Location Network) является профессор Ричард Дауден (Richard Dowden), руководитель группы космической физики Университета Отаго в Данидине (Новая Зеландия). Первоначально исследование ставило своей целью изучение спрайтов, однако затем переросло в крупный международный проект с участием более 40 научных организаций по всему миру. В 2002 г. в сети было только 6 приемников, расположенных в Новой Зеландии, Австралии, Японии и Сингапуре [Dowden et al., 2002]. В настоящее время сеть находится в оперативном управлении Вашингтонского университета в Сиэтле (США) и включает более 70 приемников, расположенных по всему миру. На территории России приемники глобальной сети в разное время были установлены в Москве (ИЗМИРАН), Якутске (ИКФИА СО РАН), Горно-Алтайске (ГАГУ), Паратунке (ИКИР ДВО РАН), Владивостоке (ТОИ ДВО РАН) и Брянске (БГТУ).

Приемная станция сети WWLLN включает в себя штыревую антенну длиной 1,5 м с усилителем сигнала, радиоприемник ОНЧ-диапазона (3–30 кГц), приемник сигнала GPS и компьютер для первичной обработки данных и передачи их в центры обработки, расположенные в университетах Отаго и Вашингтона, по сети Интернет. Длинноволновая часть излучения молниевых разрядов — атмосферик — это низкочастотная электромагнитная волна, распространяющаяся в волноводе поверхность Земли — ионосфера на большие расстояния. Молниевые импульсы регистрируются многими приемными станциями, расположенными на расстоянии сотен и тысяч километров друг от друга, которые фиксируют время прихода волны с точностью до нескольких микросекунд. Приемные станции в режиме реального времени передают в центр обработки данных свои координаты и групповое время прихода сигнала.

Для расчета координат молниевых разрядов используется метод TOGA (Time Of Group Arrival) — метод локализации молний, основанный на измерении времени группового прихода волновых пакетов в ОНЧ-диапазоне частот [Dowden et al., 2002]. Групповое время прихода атмосферика рассчитывается компьютером приемной станции на основе амплитудного и фазового спектров атмосферика. В центр обработки данных передаются только координаты приемника и групповое время прихода. Для получения координат молниевых разрядов используют данные как минимум с пяти приемных станций. Погрешность определения группового времени прихода приводит к ошибке определения координат молниевых разрядов около 3 км. Это в три раза меньше точности сетей грозопеленгации, работающих с высокочастотным спектром молниевых разрядов 0,3–3 МГц, но сеть WWLLN, являясь длинноволновой, требует в 100–1000 раз меньшую плотность размещения приемников. Приемники регистрируют молниевые разряды на расстояниях до 10 тыс. км, оптимальным является расстояние 3 тыс. км. Для равномерного покрытия Земли приемными станциями WWLLN с базой 1000 км требуется 500 датчиков, с базой 3000 км — 60 датчиков.

Оператор сети отмечает, что только около 15–30 % разрядов, обнаруженных одним датчиком, обнаруживаются 5 или более датчиками. Сигналы молний с малым током невозможно выделить на фоне белого и импульсного электромагнитных шумов. Эффективность обнаружения разрядов молний с током более 30 кА составляет примерно 30 % [WWLLN].

Для участников сети WWLLN, разместивших приемные станции, организован доступ к архивным и текущим данным регистрации молниевых разрядов. Данные содержат информацию о времени и координатах разряда, ошибке локации, энергии в Джоулях и энергетической неопределенности, а также о количестве приемных станций, данные с которых использовались для расчета. Архивные данные с 15 августа 2004 г. по текущее время доступны для покупки.

В бесплатном доступе на сайте wwlln.net каждые 10 мин размещается файл в формате kmz (архив файла Keyhole Markup Language) с данными о разрядах молний на Земле за час, но с задержкой в 6 часов. Данные предоставляются в усеченном формате: время с точностью до минуты, координаты и ошибка локации, число участвующих приемников.

Для сбора и обработки данных о молниевых разрядах на территории Мурманской области была разработана программа [Программный..., 2024], выполняющая следующие функции: загрузка по расписанию файлов с информацией о молниевых разрядах, зарегистрированных глобальной сетью грозопеленгации WWLLN, ежечасно размещаемых в открытом доступе по адресу <https://wwlln.net/WWLLN.kmz>; фильтрация данных с целью выборки молниевых разрядов, попадающих в диапазон географических координат, относящихся к Мурманской области;

конкатенация часовых файлов, содержащих координаты молниевых разрядов, в суточные в формате kml. Файлы в формате kml можно открыть программой Google Earth. На рис. 1 показан пример отображения молниевых разрядов на территории Мурманской области 1 июня 2024 г. Необходимо еще раз отметить, что сеть WWLLN, в отличие от сети Blitzortung, регистрирует не только разряды облако — земля, но и внутри- и межоблачные разряды.

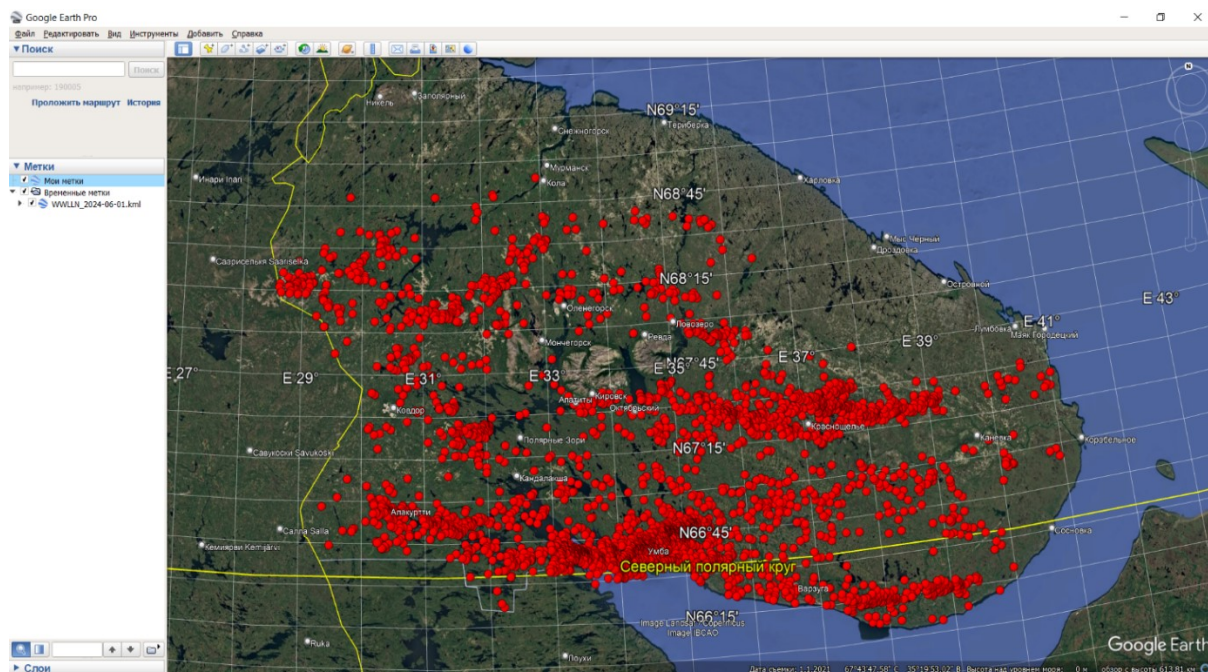


Рис. 1. Молниевые разряды, зарегистрированные сетью грозопеленгации WWLLN на территории Мурманской области 1 июня 2024 г.

Fig. 1. Lightning discharges registered by the WWLLN lightning location network in the Murmansk region on June 1, 2024

Сбор данных был начат в мае 2024 г. и охватил полностью грозовой сезон, что позволило провести совместный анализ и сравнение результатов, полученных двумя системами грозопеленгации.

Анализ молниевой активности в 2024 г.

Первая гроза в 2024 г. на территории Мурманской области случилась 18 мая, что было зафиксировано обеими системами: сеть Blitzortung (далее для краткости Blitz) зафиксировала 6 разрядов, а WWLLN — 11 разрядов. Интересным является тот факт, что в соседних регионах России в этот день гроз не было, грозовым фронт пришел с юго-запада, с территории Швеции, через Финляндию. На севере Республики Карелия первая гроза была зарегистрирована 10 апреля 2024 г.

12 декабря 2024 г. в Мурманске наблюдалась зимняя гроза, причем в результате удара молнии в опору была отключена с успешным автоматическим включением линия электропередачи. Однако сетями грозопеленгации этот разряд не был зарегистрирован.

Последний удар молнии в землю зарегистрирован Blitzortung 16 сентября 2024 г. В этот день зарегистрировано соответственно 26 (Blitz) и 73 (WWLLN) разряда. В период с 31 октября по 3 ноября WWLLN зафиксировала 6 разрядов на побережье Баренцева моря.

В таблице 1 представлены результаты регистрации всех молниевых разрядов. Для целей данной статьи грозовым днем считается день, когда сетью грозопеленгации зарегистрирован хотя бы один удар в землю на территории Мурманской области. Это отличается от стандартного определения понятия, когда грозовые дни считаются по аудиовизуальной регистрации разрядов на расстоянии 10–20 км от точки наблюдения.

Таблица 1

Число разрядов молний, зарегистрированных сетями грозопеленгации в Мурманской области в 2024 г.

The number of lightning strikes registered by lightning location networks in the Murmansk region in 2024

Дата	Разрядов от Blitzortung	Разрядов от WWLLN	Соотношение Blitz/WWLLN, %
2024-05-18	6	11	55
2024-05-19	10	15	67
2024-05-24	0	9	0
2024-05-27	91	209	44
2024-05-28	56	204	27
2024-05-31	80	808	10
2024-06-01	201	2942	7
2024-06-02	5	37	14
2024-06-04	29	108	27
2024-06-08	19	54	35
2024-06-09	66	146	45
2024-06-10	7	20	35
2024-06-11	29	254	11
2024-06-12	13	50	26
2024-06-13	15	52	29
2024-06-14	0	2	0
2024-06-15	2	5	40
2024-06-16	23	141	16
2024-06-24	22	49	45
2024-06-25	4	14	29
2024-06-27	1	25	4
2024-06-28	1	1	100
2024-06-29	103	311	33
2024-07-02	0	3	0
2024-07-04	0	1	0
2024-07-05	4	11	36
2024-07-06	63	534	12
2024-07-09	8	19	42
2024-07-10	30	97	31
2024-07-17	2	1	200
2024-07-18	19	60	32
2024-07-27	112	249	45
2024-07-28	3	19	16
2024-08-02	17	80	21
2024-08-10	2	1	200
2024-08-11	4	11	36
2024-08-12	7	15	47
2024-08-13	26	37	70
2024-08-19	1	1	100
2024-08-20	0	1	0
2024-08-26	0	1	0
2024-08-31	11	32	34
2024-09-01	20	52	38
2024-09-03	1	1	100
2024-09-07	144	327	44
2024-09-16	26	73	36
2024-10-31	0	1	0
2024-11-01	0	4	0
2024-11-03	0	1	0
<i>Итого</i>	40 дней 1283 разрядов	49 дней 7099 разрядов	18

По данным WWLLN, всего в 2024 г. было 49 грозовых дней, причем 10 дней были с единственным молниевым разрядом и 4 дня с числом разрядов от 2 до 5. Так как эффективность сетей грозопеленгации не превышает 30 %, можно полагать, что если зафиксирован хотя бы один молниевый разряд, то этот день достоверно можно считать грозовым.

Как видно из табл. 1, WWLLN зарегистрировала в 5 раз больше разрядов молнии, чем Blitz. Если исходить из того факта, что Blitz регистрирует только удары в землю, то полученный результат укладывается в усредненное для всей Земли соотношение $(IC + CC):CG = 3:1$, где IC (intra-cloud), CC (cloud-to-cloud), CG (cloud-to-ground) — число внутриоблачных, межоблачных и разрядов в землю соответственно. Однако, как показывают исследования [Anderson, Klugmann, 2014], для широт выше 60° это соотношение составляет 1:1, т. е. удары в землю составляют половину от всех разрядов молний, что объясняется более низкой высотой замерзания основания облака. Малое число зарегистрированных разрядов, скорее всего, объясняется более низкой эффективностью сети Blitzortung для нашего региона. Приемники Blitz имеют относительно малый радиус уверенного приема, поэтому покрытие Мурманской области этой сетью слабое из-за малого числа близкорасположенных станций.

На рисунке 2 представлены результаты расчета распределения числа грозовых дней на территории Мурманской области за 2024 г. по данным Blitzortung. Расчеты выполнены для ячеек земной поверхности 20×20 км, что приблизительно соответствует области наблюдения за молниевой деятельностью на расстоянии 10 км с помощью традиционного визуально-слухового метода на гидрометеорологических станциях и постах. Такой размер ячейки вполне оправдан с учетом холмистого рельефа Мурманской области. Максимальное значение — 9 дней — наблюдалось на юго-западе области, а в среднем по территории было 1–3 грозовых дня.

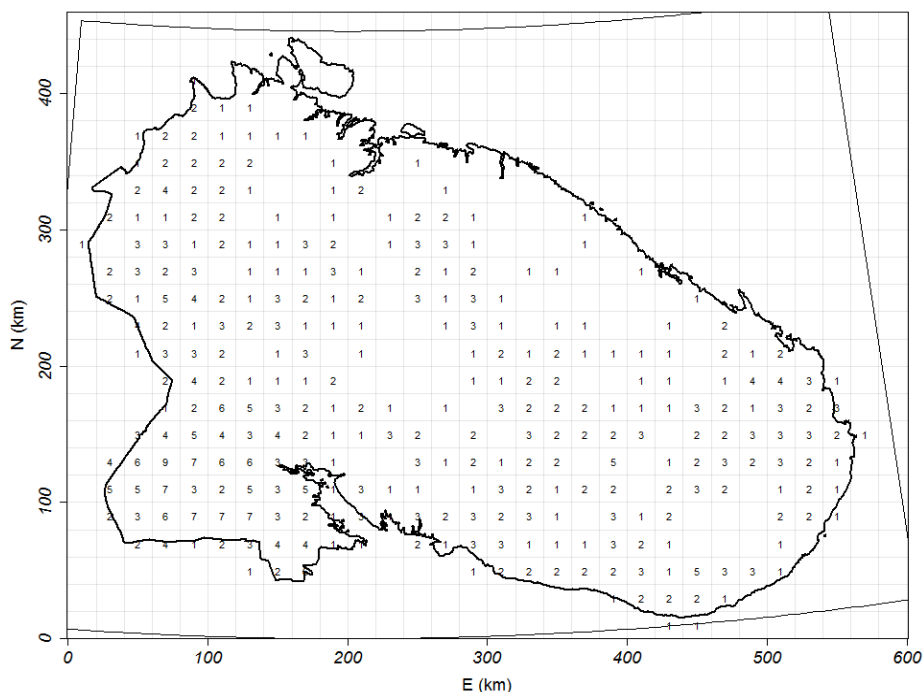


Рис. 2. Суммарное количество грозовых дней в ячейке 20×20 кв. км в Мурманской области в 2024 г.

Fig. 2. Total number of thunderstorm days in a 20×20 square km cell in Murmansk region in 2024

На рисунке 3 отображены результаты регистрации ударов молнии в землю на территории Мурманской области в грозовой сезон 2024 г. Также на карту области нанесены воздушные линии электропередачи классов напряжения 110–330 кВ. Большая часть ударов молнии в землю прилась на неосвоенные территории, вследствие чего аварийность в электрических сетях по причине грозы была относительно низкой. Максимальная плотность разрядов отмечена на юго-западе области.

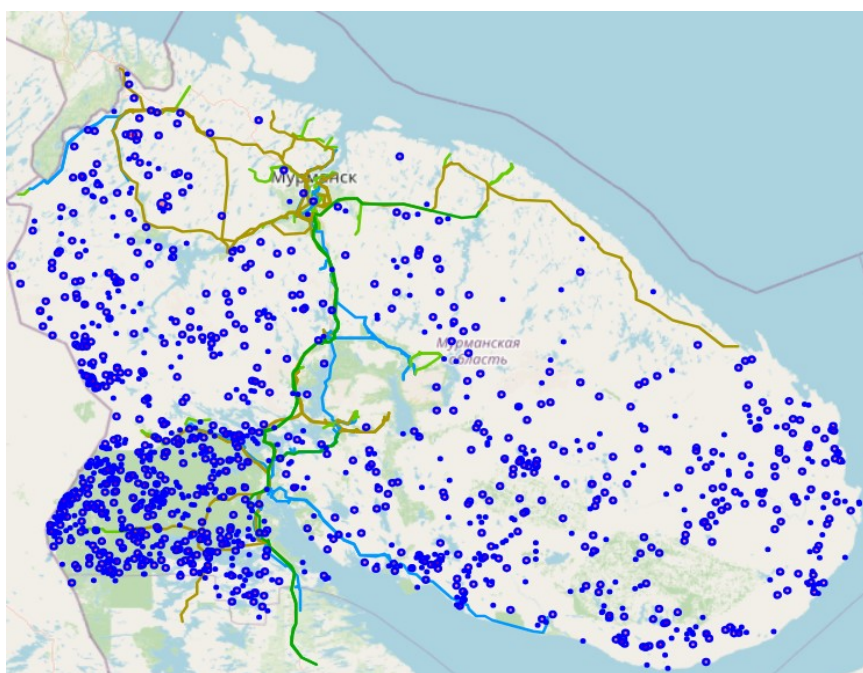


Рис. 3. Молниевые разряды в Мурманской области в 2024 г. по данным сети Blitzortung

Fig. 3. Lightning strikes in the Murmansk region in 2024 according to Blitzortung

В целом грозовой сезон 2024 г. был одним из самых спокойных за последнее десятилетие. Основная активность пришлась на последнюю декаду мая-июнь. По данным Мурманского УГМС, в мае-сентябре 2024 г. средняя температура была значительно выше нормы, что обеспечило теплое и влажное начало лета и жаркий и сухой период в июле-августе. Сентябрь 2024 г. в Мурманской области стал самым теплым за 89-летний период наблюдений, климатическая норма была превышена на 3,0–4,8°, что также способствовало активной циклонической деятельности.

В таблице 2 представлены данные о распределении разрядов по месяцам, а в табл. 3 — показатели молниевой активности на территории Мурманской области за последние 8 лет по данным сети Blitzortung. По числу разрядов 2024 г. можно сравнить с 2020 г., однако в том году основная грозовая деятельность пришлась на июнь-июль, а в мае и сентябре гроз практически не было. Максимальное число разрядов было зарегистрировано 1 июня 2024 г. (см. рис. 1). По данным Blitz, в этот день случилось 16 %, а WWLLN насчитала 41 % от суммарного числа разрядов за весь год!

Таблица 2

Распределение разрядов по месяцам года
 Lightning strikes distribution by months of the year

Год / Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Сумма
2017	0 / 0	5 / 83	19 / 1834	11 / 452	3 / 186	2555
2018	5 / 312	6 / 805	11 / 2922	8 / 3430	2 / 7	7476
2019	3 / 317	10 / 3127	5 / 27	6 / 799	4 / 17	4287
2020	0 / 0	8 / 488	16 / 623	12 / 326	2 / 3	1440
2021	4 / 290	13 / 634	16 / 1351	14 / 669	0 / 0	2944
2022	1 / 1	10 / 1212	24 / 5889	13 / 903	0 / 0	8005
2023	5 / 46	9 / 553	12 / 554	9 / 1096	7 / 78	2327
2024	5 / 243	16 / 540	8 / 241	7 / 68	4 / 191	1283

Примечание. В числителе — число грозовых дней, в знаменателе — количество разрядов в месяце.

Note. Thunderstorm days / discharges per month.

Таблица 3

Показатели молниевой активности на территории Мурманской области

Lightning activity in Murmansk region

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Первая гроза	10.06.17	14.05.18	11.05.19	02.06.20	18.05.21	16.05.22	20.05.23	18.05.24
Последняя гроза	24.09.17	22.09.18	13.09.19	11.09.20	31.08.21	28.08.22	29.09.23	16.09.24
Грозовых дней	38	32	28	38	47	48	42	41
Всего разрядов	2555	7476	4287	1440	2944	8005	2327	1283

Сравнительный анализ молниевой активности по годам для WWLLN не проводился ввиду отсутствия доступа к архивным данным. На рис. 4 в качестве иллюстрации показано распределение разрядов молний, зарегистрированных этой сетью на территории Мурманской области в 2024 г. Рис. 4 закономерно демонстрирует снижение молниевой активности с юга на север и с востока на запад. Интересно отметить низкую молниевую активность в районе Хибинского и Ловозерского горных массивов. Это может быть связано как с направлением движения воздушных масс в предгорьях и особенностями конвекции в горах, так и с тем, что в горной местности значения силы тока молнии ниже, чем на равнине. Это связано как с меньшим расстоянием между облаком и поверхностью земли, так и с высоким удельным сопротивлением скальных пород. Вследствие малых значений токов такие молниевые разряды попросту не регистрируются грозопеленгационными сетями. Например, в работе [Аджиев и др., 2021] для территории Северного Кавказа были получены средние значения токов молний «облако — земля»: 23 кА — для равнинной и степной зон, 14 кА — для горной местности.

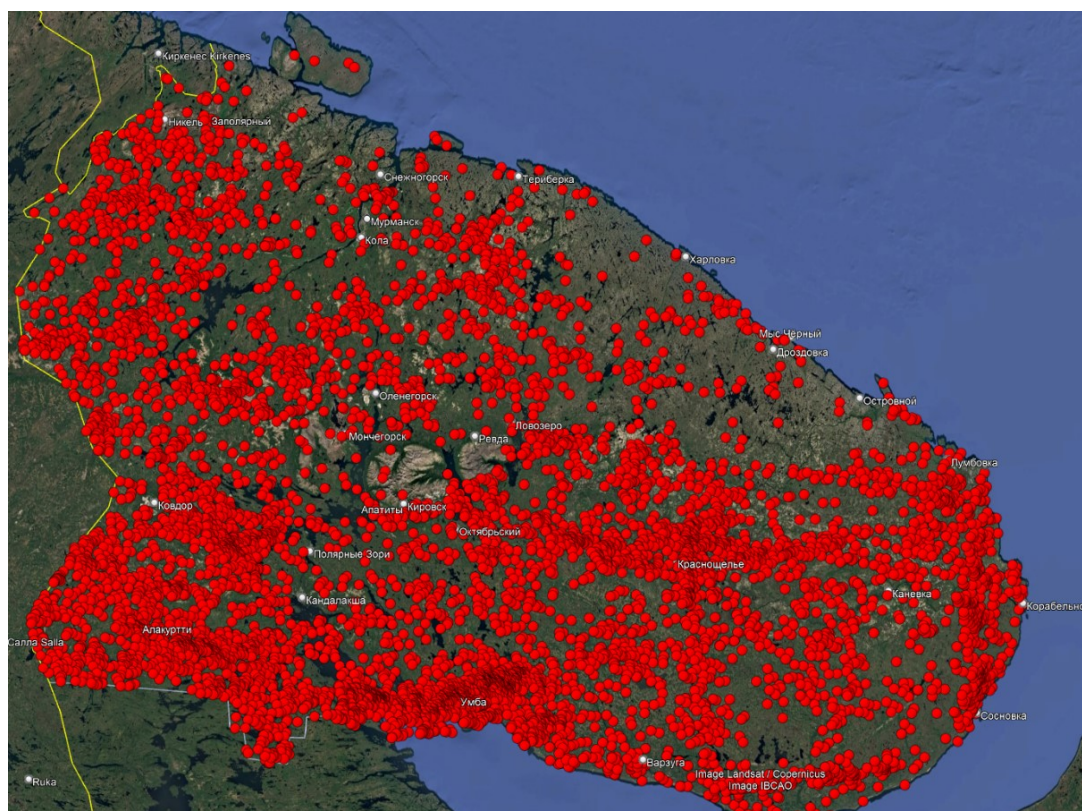


Рис. 4. Молниевые разряды в Мурманской области в 2024 г. по данным сети WWLLN

Fig. 4. Lightning strikes in the Murmansk region in 2024 according to WWLLN

Анализ аварийности в электрических сетях Мурманской области по причине молниевых воздействий

По информации, полученной от служб линий энергетических предприятий Мурманской области, в 2024 г. отключения воздушных линий электропередачи по причине ударов молний произошли 40 раз, что в два раза больше, чем в 2020 г., когда зарегистрированное число разрядов молнии в землю было таким же. В табл. 4 представлены сравнительные данные по молниевой активности и числу отключений за период с 2015 по 2024 г., а на рис. 5 эти же данные проиллюстрированы графиком, который демонстрирует явный периодический характер молниевой активности. Кроме того, начиная с 2017 г. удельная аварийность по причине грозы (отношение числа отключений к числу разрядов молнии в землю) демонстрирует достоверный рост, что показано на рис. 6. Причины этого факта требуют дальнейшего анализа, выводы делать преждевременно.

Таблица 4

Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской области в 2015–2024 гг.

Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2015–2024

Источник	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Число молниевых разрядов в землю	416	8036	2555	7476	4287	1440	2944	8005	2327	1285
Суммарное число отключений ВЛ	9	108	26	120	76	23	50	158	66	40

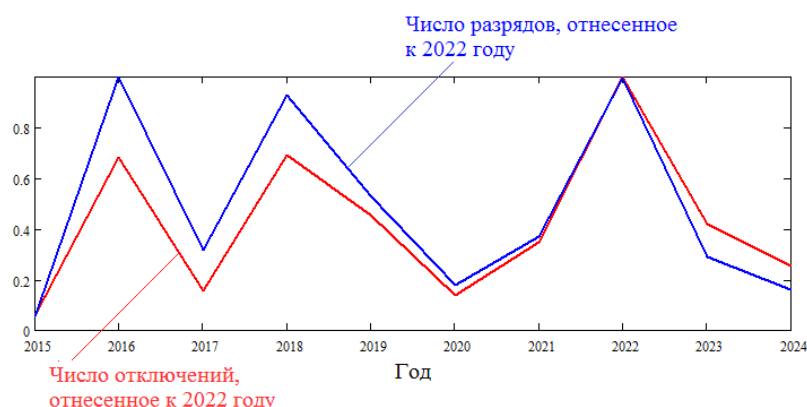


Рис. 5. Молниевая активность и грозовые отключения ВЛ в Мурманской области в 2015–2024 гг.

Fig. 5. Lightning activity and lightning outages in the Murmansk region in 2015–2024

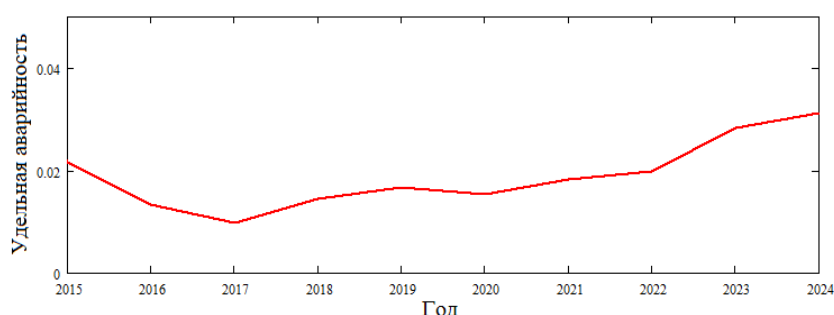


Рис. 6. Удельное число отключений воздушных линий электропередачи по причине грозы в 2015–2024 гг.

Fig. 6. Specific number of overhead power line outages caused by thunderstorms in 2015–2024

Заключение

Развитие инструментальных систем грозопеленгации и вычислительной техники, применение современных методов анализа грозопоражаемости сосредоточенных и протяженных объектов предоставляют возможность для внедрения новых методик анализа аварийности в электрических сетях. Выявление наиболее уязвимых для молний участков воздушных линий в реальном масштабе времени позволяет оперативно находить и устранять повреждения, вызванные разрядами молний, а также оптимизировать молниезащитные мероприятия.

В Арктической зоне Российской Федерации отсутствуют отечественные грозопеленгационные сети, которые позволяли бы определять места ударов молнии в землю и наземную инфраструктуру с высокой эффективностью и точностью. Для выявления характера и распределения атмосферных электромагнитных воздействий на сетевую и транспортную инфраструктуру необходимо создавать региональные системы грозопеленгации.

Список источников

Аджиев А. Х., Кереева З. М., Кузьмин В. А. Определение значений токов наземных молниевых разрядов на Северном Кавказе с использованием грозорегистратора LS 8000 // *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 64. С. 531–543.

Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2021 году / В. Н. Селиванов [и др.] // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2022. Т. 13, № 3. С. 59–67.

Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2022 г. / В. Н. Селиванов [и др.] // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2023. Т. 14, № 6. С. 73–83.

Молниевые разряды в землю на территории Мурманской области за период 2008–2023 гг.: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624577 / В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН № 2023624352; заявл. 28.11.2023; опубл. 12.12.2023, Бюл. № 12. 1 с.

Программа нахождения объекта, попавшего в зону действия грозового разряда, и оповещения пользователя о данном событии: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619102 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН № 2020618392; заявл. 27.07.2020; опубл. 11.08.2020, Бюл. № 8. 1 с.

Программа оценки интенсивности воздействия грозовых разрядов на протяжённые объекты: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021618127 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН № 2021616805; заявл. 04.05.2021; опубл. 24.05.2021, Бюл. № 6. 1 с.

Программа расчета промежуточных географических координат и построения продольного профиля протяженного объекта с заданным шагом: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619255 / А. В. Бурцев, В. Н. Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН № 2020618400; заявл. 27.07.2020; опубл. 13.08.2020, Бюл. № 8. 1 с.

Программный комплекс для сбора и обработки данных о молниевых разрядах на территории Мурманской области: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690684 / В. Н. Селиванов, В. А. Билин; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН № 2024687175; заявл. 12.11.2024; опубл. 17.12.2024, Бюл. № 12. 1 с.

Селиванов В. Н., Бурцев А. В., Колобов В. В. Анализ молниевой активности на Кольском полуострове в 2019–2020 гг. // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 40–52.

Селиванов В. Н., Кизенков А. Н., Сулоев А. А. Анализ молниевой активности в Мурманской области в 2023 г. // *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки*. 2024. Т. 15, № 2. С. 101–110.

Anderson G. Klugmann D. A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014. Vol. 14. P. 815–829.

Dowden R., Brundell J., Rodger C. VLF lightning location by Time of Group Arrival (TOGA) at multiple sites // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2002. Vol. 64. P. 817–830.

Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network. 2016. URL: <http://www.blitzortung.org> (дата обращения: 02.06.2025).

WLLN. World Wide Lightning Location Network. URL: wwlln.net (дата обращения: 02.06.2025).

References

Adjiev A. H., Kerefova Z. M., Kuzmin V. A. Opredelenie znacheniy tokov nazemnykh molnievykh razryadov na Severnom Kavkaze s ispol'zovaniem grozoregistratora LS 8000 [Definition of lightning parameters with the use of thunderstorm registry LS 8000]. *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and ecology], 2021, No. 64, pp. 531–543. (In Russ.).

Anderson G., Klugmann D. A European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2014, Vol. 14, pp. 815–829.

Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma nakhozhdeniya ob"ekta, popavshogo v zonu deystviya grozovogo razryada, i opoveshcheniya pol'zovatelya o dannom sobytii* [A program for finding an object that has fallen within the range of a lightning discharge and notifying the user about this event]. The certificate of state registration of the computer program No. 2020619102, claimed 27.07.2020, published 11.08.2020, bul. No. 8, 1 p. (In Russ.).

Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma otsenki intensivnosti vozdeystviya grozovykh razryadov na protyazhyonnye ob"ekty* [Program for assessing the intensity of the impact of lightning discharges on extended objects]. The certificate of state registration of the computer program No. 2021618127, claimed 04.05.2021, published 24.05.2021, bul. No. 6, 1 p. (In Russ.).

Burtsev A. V., Selivanov V. N. *Programma raschyota promezhutochnykh geograficheskikh koordinat i postroeniya prodol'nogo profilya protyazhyonnogo ob"ekta s zadannym shagom* [Program for estimation of intermediate geographical coordinates and construction of longitudinal profile of an extended object with a set step]. The certificate of state registration of the computer program No. 2020619255, claimed 27.07.2020, published 13.08.2020, bul. No. 8, 1 p. (In Russ.).

Dowden R., Brundell J., Rodger C. VLF lightning location by Time of Group Arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, Vol. 64, pp. 817–830.

Selivanov V. N. *Molnievye razryady v zemlyu na territorii Murmanskoy oblasti za period 2008–2023 gg* [Lightning discharges into the ground in the Murmansk region for the period 2008–2023]. The certificate of state registration of the database No. 2023624577, claimed 28.11.2023, published 12.12.2023, bul. No. 12, 1 p. (In Russ.).

Selivanov V. N., Bilin V. A. *Programmnyy kompleks dlya sbora i obrabotki dannykh o molnievykh razryadakh na territorii Murmanskoy oblasti* [Software package for collecting and processing data on lightning discharges in the Murmansk region]. The certificate of state registration of the computer program No. 2024690684, claimed 12.11.2024, published 17.12.2024, bul. No. 12, 1 p. (In Russ.).

Selivanov V. N., Burtsev A. V., Ivonin V. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoy aktivnosti v Murmanskoy oblasti v 2021 godu [Analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2021]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3. pp. 59–67 (In Russ.).

Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kizenkov A. N., Suloev A. A. Analiz molnievoy aktivnosti v Murmanskoy oblasti v 2022 godu [Analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2022]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2023, Vol. 14, No. 6. pp. 73–83 (In Russ.).

Selivanov V. N., Burtsev A. V., Kolobov V. V. Analiz molnievoy aktivnosti na Kol'skom poluostrove v 2019–2020 gg. [Analysis of lightning activity on the Kola Peninsula in 2019–2020]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 40–52 (In Russ.).

Selivanov V. N., Kizenkov A. N., Suloev A. A. Analiz molnievoy aktivnosti v Murmanskoy oblasti v 2023 godu [Analysis of lightning activity in the Murmansk region in 2023]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2024, Vol. 15, No. 2. pp. 101–110 (In Russ.).

Wanke E., Andersen R., Volgnandt T. World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016. Available at: <http://www.blitzortung.org> (accessed 02.06.2025).

WWLLN. World Wide Lightning Location Network. Available at: wwlln.net (accessed 02.06.2025).

Информация об авторе

В. Н. Селиванов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

V. N. Selivanov — PhD (Engineering), Leading Researcher.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 15.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 621.311
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.009

МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОДСТАНЦИЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ: РОЛЬ СОВРЕМЕННЫХ СТАНДАРТОВ И ПРИБОРОВ

Вера Васильевна Ярошевич¹, Елизавета Игоревна Губская², Алексей Сергеевич Карпов³

^{1, 2, 3}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹v.yaroshevich@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7503-5844>

²e.gubskaya@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3337-0142>

³a.karpov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2218-9145>

Аннотация

Исследование посвящено изучению параметров электроэнергии распределительной сети горнодобывающего предприятия, расположенного в Мурманской области России, с особым вниманием к проблемам качества электроэнергии (КЭ), возникающим преимущественно из-за условий эксплуатации шахтных подъемных установок. Несмотря на соблюдение российских стандартов, касающихся качества электроэнергии, выявлены несоответствия между периодическими результатами измерений в соответствии с требованиями ГОСТ и реально существующими проблемами, такими как выход из строя силовых трансформаторов. В ходе исследования использовались два прибора — «Ресурс-UF2M» и «Metrel MI2892» — для изучения показателей качества электроэнергии с целью сравнить способы обработки данных и точность измерений. Применялись разные интервалы усреднения данных, чтобы оценить влияние разрешения на диагностику качества электроэнергии. Произведен анализ полученных результатов измерений и дана оценка применимости экспериментальных результатов для планирования предупредительных работ и обновления подстанционного оборудования. Работа подчеркивает важность правильного подбора и настройки измерительных приборов для минимизации возмущений качества электроэнергии, предупреждения поломок оборудования и повышения общей надежности энергетических систем на горнодобывающих предприятиях.

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, системы электроснабжения шахт, шахтные подъемные машины, измерение показателей качества электроэнергии, интервалы объединения данных

Благодарности:

работа выполнена в рамках проекта «Разработка рекомендаций по компенсации искаженных показателей качества электроэнергии в высоковольтных сетях предприятий горнодобывающего сектора Мурманской области», финансируемого Министерством образования и науки Мурманской области (приказ № 172 от 10.02.2026).

Для цитирования:

Ярошевич В. В., Губская Е. И., Карпов А. С. Мониторинг качества электроэнергии на подстанциях промышленных предприятий: роль современных стандартов и приборов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 83–93. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.009.

Original article

POWER QUALITY MONITORING AT SUBSTATIONS OF INDUSTRIAL FACILITIES: THE ROLE OF UP-TO-DATE STANDARDS AND INSTRUMENTS

Vera V. Yaroshevich¹, Elizaveta I. Gubskaya², Aleksei S. Karpov³

^{1, 2, 3}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

¹v.yaroshevich@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7503-5844>

²e.gubskaya@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3337-0142>

³a.karpov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2218-9145>

Abstract

This study examines electrical energy parameters of the distribution system of a mining facility located in Murmansk Oblast, Russia, with a particular attention focused on power quality (PQ) issues arising primarily from the operating conditions of mine hoists. Despite compliance with Russian standards on PQ, discrepancies were found between the results of periodical measurement conducted according to the GOST requirements and problems inherent in the power system, such as transformer failures. Two instruments, Resurs-UF2M and Metrel MI2892, were used to analyze power quality indices in order to compare data processing methods and measurement accuracy. Different data aggregation intervals were used to assess the impact of resolution on PQ diagnostics. The article analyzes the measurement data obtained and assesses the applicability of the experimental results for planning preventive

maintenance and upgrading substation equipment. The research highlights the significance of proper selection and configuration of instruments to minimize PQ disturbances, prevent equipment failures, and improve the overall reliability of mining facility power systems.

Keywords:

electromagnetic compatibility, mine power systems, mine hoists, power quality indices measurement, data aggregation time intervals

Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the project "Development of recommendations for compensation of distorted indicators of electricity quality in high-voltage networks of enterprises of the mining sector of the Murmansk region", funded by the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region (Order No. 172 dated 02/10/2026).

For citation:

Yaroshevich V. V., Gubskaya E. I., Karpov A. S. Power quality monitoring at substations of industrial facilities: the role of up-to-date standards and instruments // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 83–93. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.009.

Введение

Электрооборудование является как потенциальным источником нежелательных электромагнитных помех, так и уязвимым элементом, подверженным негативному электромагнитному влиянию других технических устройств. Это обуславливает необходимость принятия мер по обеспечению нормальной работы оборудования в условиях неблагоприятного электромагнитного воздействия. Решение этой задачи осуществляется в рамках теории электромагнитной совместимости (ЭМС). Поэтому для обеспечения ЭМС электрооборудования необходим комплексный анализ качества электроэнергии (КЭ).

КЭ является важнейшим фактором, влияющим на стабильность и эффективность работы промышленных предприятий [Salor et al., 2007; Zhezhelenko et al., 2009; Dheepanchakkravarthy et al., 2019; Sreewirote, Ngaopitakkul, 2020; Karpov et al., 2022; Martinez et al., 2022; Karpov et al., 2023], особенно в таких энергоемких отраслях, как горнодобывающая промышленность [Yaghoobi et al., 2019; Nepsha et al., 2019; Ярошевич и др., 2020; Pichuev et al., 2020; Bebikhov et al., 2020; Sychev, Zimin, 2021; Plashchansky et al., 2022; Do et al., 2023; Semenov, 2024]. Широко признано, что КЭ — решающий фактор эксплуатационной надежности горнодобывающих предприятий, как правило, вследствие проблемы значительного влияния шахтных подъемников и связанного с ними оборудования на других потребителей и непосредственно силовые электроустановки. Предыдущие исследования показали, что искажения КЭ напрямую влияют на эффективность процессов добычи полезных ископаемых, поскольку приводят к сокращению срока службы оборудования и снижению экономических показателей технологических процессов [Siostrzonek et al., 2024]. В работе [Sinchuk et al., 2021] были предложены методы, направленные на улучшение показателей мощности активных выпрямителей для шахтных подъемников, которые являются одними из основных источников искажений КЭ в подземных сетях. Дальнейшие исследования были посвящены фильтрации высших гармоник, генерируемых подъемными машинами с тиристорным управлением, что позволило представить практические решения для снижения уровня искажений в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий [Hyla, 2022; Siostrzonek, 2024]. С целью снижения негативного влияния на других потребителей были также исследованы современные системы компенсации, такие как статические генераторы реактивной мощности, предлагающие эффективные стратегии управления реактивной мощностью и улучшения КЭ в шахтах, оснащенных тиристорными подъемными механизмами [Hyla, Latko, 2024].

Тем не менее приведенные исследования не затрагивают актуальные проблемы, связанные с применением методов измерений, предусмотренных стандартами, что влияет на точность диагностики искажений КЭ и качество экспериментальных данных.

Данная статья посвящена анализу результатов исследования КЭ, проведенного на одной из подстанций, питающих горнодобывающее предприятие, расположенное в Мурманской области. Подстанция была выбрана в связи с нестандартными режимами работы промышленного оборудования. Основными потребителями, подключенными к сети 6 кВ, являются шахтные подъемники. Работа шахтного подъемника характеризуется частыми пусковыми токами и значительными гармоническими искажениями.

Необходимость проведения исследования обусловлена наблюдаемыми расхождениями между результатами измерения КЭ, проведенного аккредитованной внешней лабораторией в соответствии

с российскими стандартами ГОСТ 32144-2013 [ГОСТ 32144-2013, 2014], ГОСТ 33073-2014 [ГОСТ 33073-2014, 2015] и ГОСТ 30804.4.30-2013 [ГОСТ 30804.4.30-2013, 2014] с использованием прибора LPW-30, и реальными проблемами эксплуатации, зафиксированными на подстанции. Протоколы измерений не выявили отклонений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) от нормативных значений, однако наблюдались аварийные ситуации, связанные с перегрузкой изоляции, включая множественные отказы сухих трансформаторов.

В исследовании используются современные приборы, работающие в различных режимах усреднения данных, для оценки достоверности экспериментальных результатов и выявления скрытых проблем, которые могут остаться незамеченными при проведении измерений в строгом соответствии со стандартами. Цели исследования включают в себя как комплексную диагностическую оценку КЭ на подстанции горнодобывающего предприятия, так и разработку усовершенствованных методов измерений для повышения точности диагностики и качества экспериментальных данных. Полученные результаты имеют практическое значение для горнодобывающих предприятий, поскольку выявление источников искажений КЭ и снижение их влияния позволяют предотвращать аварии, снижать эксплуатационные расходы и повышать надежность электрических сетей.

Материалы и методы

Для проведения детального анализа качества электроэнергии была выбрана одна из подстанций горнодобывающего предприятия, расположенного в Мурманской области, схема которой представлена на рис. 1. Подстанция состоит из 4 систем шин 6 кВ, питаемых двумя трансформаторами 35/6/6 кВ с расщепленной обмоткой мощностью 25 МВА каждый. К шинам подключено всего 80 фидеров, 9 из которых на момент измерений находились в резерве. Нагрузка шин следующая: 1 с. ш. — 516 А, 3 с. ш. — 153 А, 2 с. ш. — 650 А, 4 с. ш. — 177 А. Основными потребителями подстанции являются шахтные подъемные машины, использующие асинхронные двигатели и приводы постоянного тока. Частые пуски оборудования и работа с тиристорными мостами создают существенные динамические нагрузки на силовые трансформаторы.

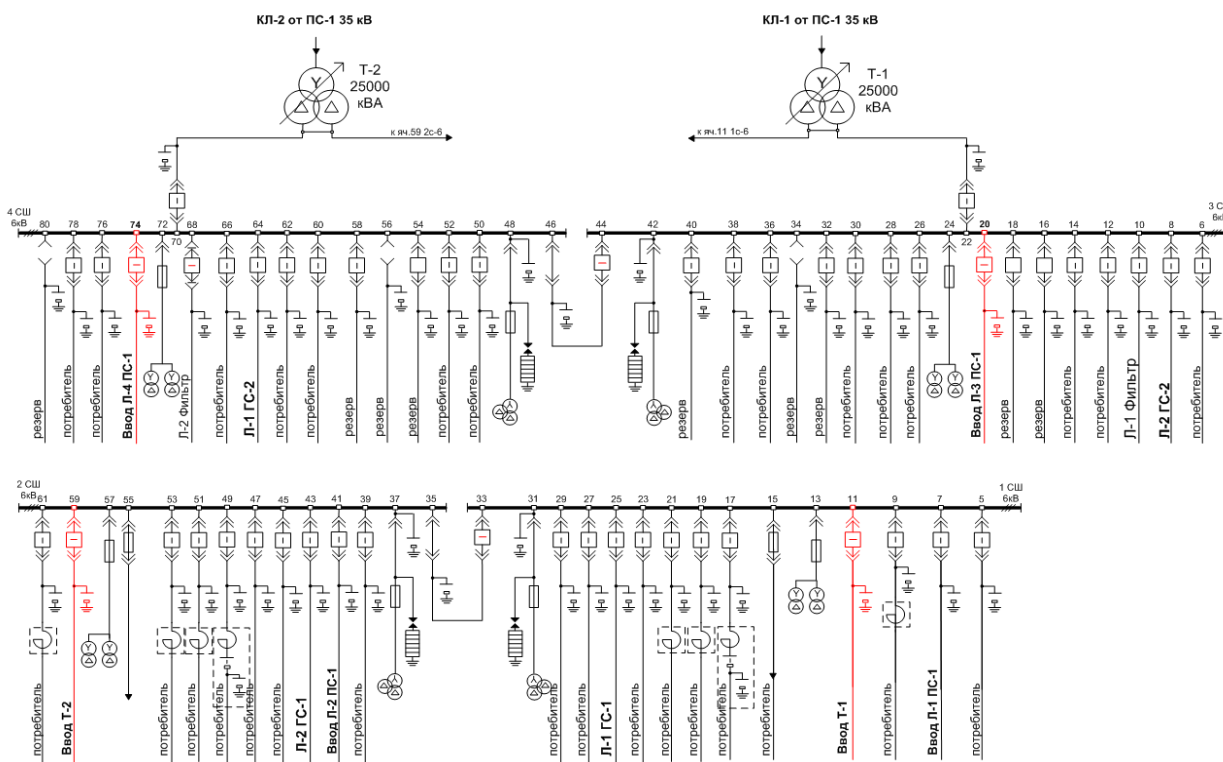


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемой подстанции

Fig. 1. Schematic diagram of the substation under study

Эксперимент был проведен в два этапа. На первом этапе измерение ПКЭ проводилось с помощью двух приборов, регистратора Ресурс-UF2М и анализатора КЭ Metrel MI2892 (относятся к средствам измерения класса А по [ГОСТ 30804.4.30-2013, 2014]), для сравнения полученных данных. Технические характеристики приборов приведены на сайте [Приборы...]. Приборы были подключены параллельно в одной точке.

По результатам регистрации можно сделать следующие выводы:

1. Результаты протоколов регистратора качества электроэнергии Metrel MI2892 более последовательны и наглядны, чем у Ресурс-UF2М.

2. Протоколы Ресурс-UF2М не предназначены для детального анализа. Они дают лишь сопоставительную картину по сравнению с Metrel MI2892.

3. С точки зрения анализа зарегистрированных искажений и выявления причины их возникновения Ресурс-UF2М совершенно не подходит для дальнейшего применения, так как:

а) для анализа предоставляется лишь итоговый протокол измерения без доступа к массиву данных регистрации, что исключает возможность проверки протокольных значений;

б) усреднение значений регистратора Ресурс-UF2М за 1 минуту позволяет производить измерения исключительно в режиме длительного мониторинга без учета «быстрых» процессов, таких как грозовые, коммутационные перенапряжения или иные переходные процессы. Поэтому данный регистратор непригоден для анализа и выявления причин аварийных режимов, следовательно, не информативен.

4. Зафиксированы отличия в зарегистрированных приборами значениях ПКЭ:

а) провал напряжения на фазах: Ресурс-UF2М показывает общее количество провалов (которое отличается от количества, показанного Metrel MI2892) и суммарную продолжительность провалов (что неинформативно без описания предыстории и последствий провалов). Поскольку оба прибора сертифицированы, это объясняется лишь точностью приборов, интервалом усреднения значений и аналитикой при формировании статистических данных для протоколов;

б) по значениям гармонического искажения напряжения также отмечаются существенные расхождения. Например, для 2-й гармоники максимальные значения, зафиксированные прибором Ресурс-UF2М, 0,29/0,25/0,28 (фаза А/фаза В/фаза С), а прибором Metrel MI2892 — 0,13/0,12/0,13, т. е. почти в 2 раза меньше; аналогично для 3-й гармоники Ресурс-UF2М зарегистрированы значения 0,74/0,77/0,53, а прибором Metrel MI2892 — 0,21/0,41/0,30, и здесь разница почти в 2 раза, и т. д.

5. Протоколы по регистрациям прибором Ресурс-UF2М даны за каждые сутки отдельно, а прибором Metrel MI2892 — общие за весь период измерений. Поэтому сравнивать измерения проблематично. Сертифицированные регистраторы качества электроэнергии нормируют лишь процесс регистрации и формат вывода данных, однако некоторые из них не учитывают начальное время регистрации, рассчитывая статистику исключительно с 0 часов, что для этих двух регистраторов стало крайне существенным.

6. В заключении по первичным регистрациям прибором Metrel MI2892 зафиксировано, что качество электроэнергии не соответствует нормам по нескольким показателям, а по протоколам прибора Ресурс-UF2М все показатели соответствуют норме. Таким образом, следует отметить, что прибор Ресурс-UF2М для ведения мониторинговых исследований в высоковольтной сети не отвечает требованиям современности по стремлению к «умной» энергосистеме и выполнению полного цикла: измерение — анализ — модернизация проблемных мест высоковольтной сети — бесперебойная и эффективная работа энергосистемы.

На основе данных сопоставительной и плановых регистраций на этом же объекте был сделан вывод, что не каждый сертифицированный регистратор показателей качества электроэнергии способен объективно оценивать уровень опасности искажений: может фиксироваться полное соответствие нормам ГОСТ. Поэтому потребовалось выполнить регистрации в одной и той же точке при одинаковом режиме работы сети, но при разных интервалах усреднения.

Дальнейший анализ сети производился исключительно по регистрациям прибором Metrel MI2892. На втором этапе были проведены 7-дневные измерения ПКЭ с различными интервалами объединения результатов (10 мин, что соответствует требованиям стандарта [ГОСТ 32144-2013, 2014], 1 мин, 10 с и 1 с) в одной и той же точке при идентичных условиях работы подстанции.

Результаты и обсуждение

Измерения, выполненные с усреднением 10 мин, являются явно недостаточными для выявления «виновника» искажений. Трудно объяснить, почему по более современному ГОСТ 32144-2013 требуется усреднение 10 мин, когда в более раннем стандарте ГОСТ 13109-97 усреднение — 60 с. При 10-минутном усреднении в протокол попадают либо установившиеся значения напряжения (имеющие исключительно систематический характер искажений, который может наблюдаться даже стандартными системами контроля и учета электроэнергии), либо полное отключение участка сети, что будет отмечено диспетчерами подстанций. Таким образом, следует отметить несовершенство нормативной базы в отношении измерения ПКЭ, и именно с этим связано, что протоколы измерений, выполненные аутсорсинговой лабораторией, соответствуют ГОСТ. С одной стороны, требования стандарта по периодичности регистраций выполняются, однако реальные трудности в энергосистеме все же остаются незамеченными.

Для наглядности и сравнения приведем осциллограммы тока и напряжения за один час с усреднением 1 с и 10 мин (рис. 2, 3).

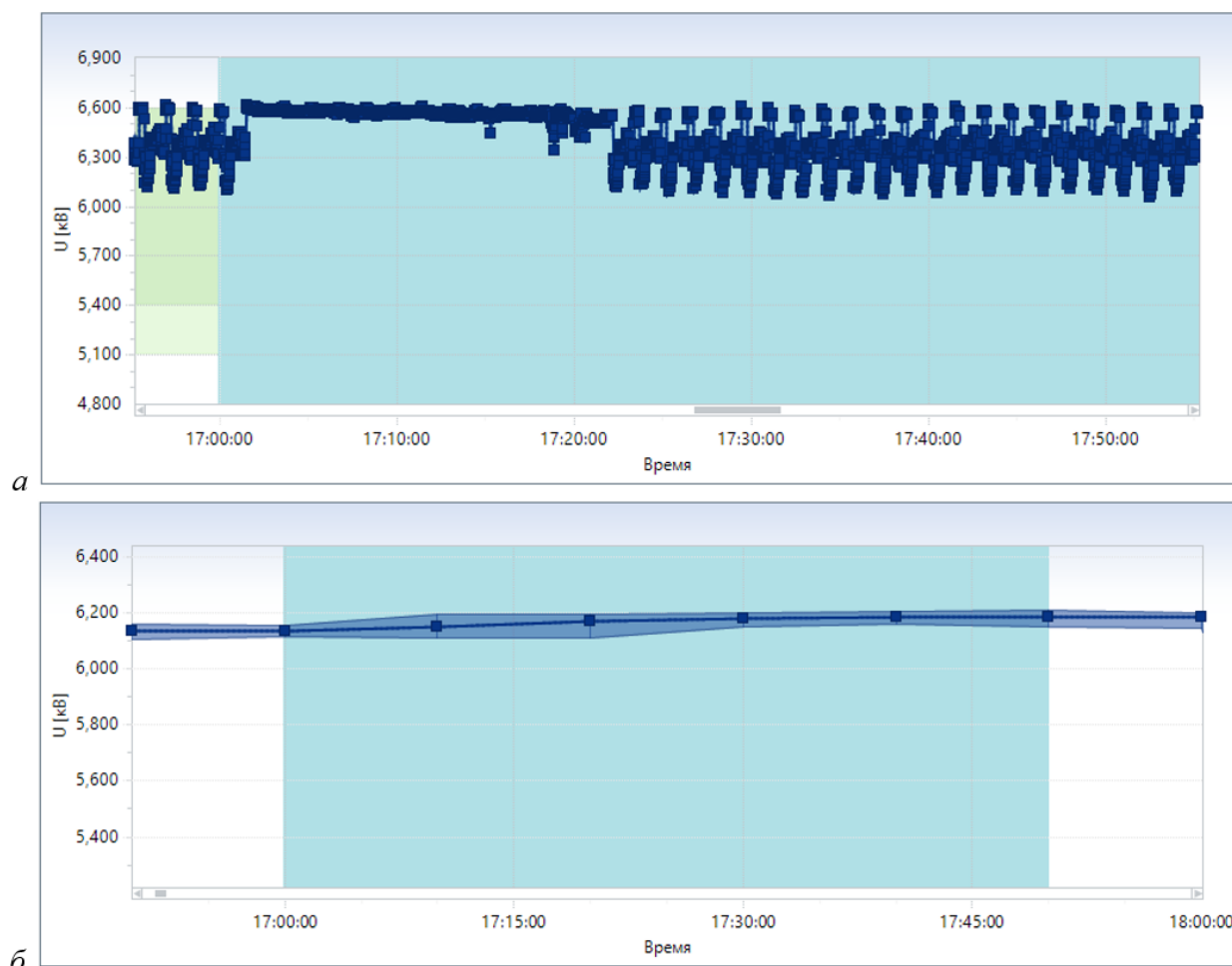


Рис. 2. Осциллограммы напряжения за 1 ч:
а — с усреднением 1 с; б — с усреднением 10 мин

Fig. 2. Voltage oscillograms recorded for 1 hour:
a—with 1 s data aggregation interval used, b—with 10 min data aggregation interval used

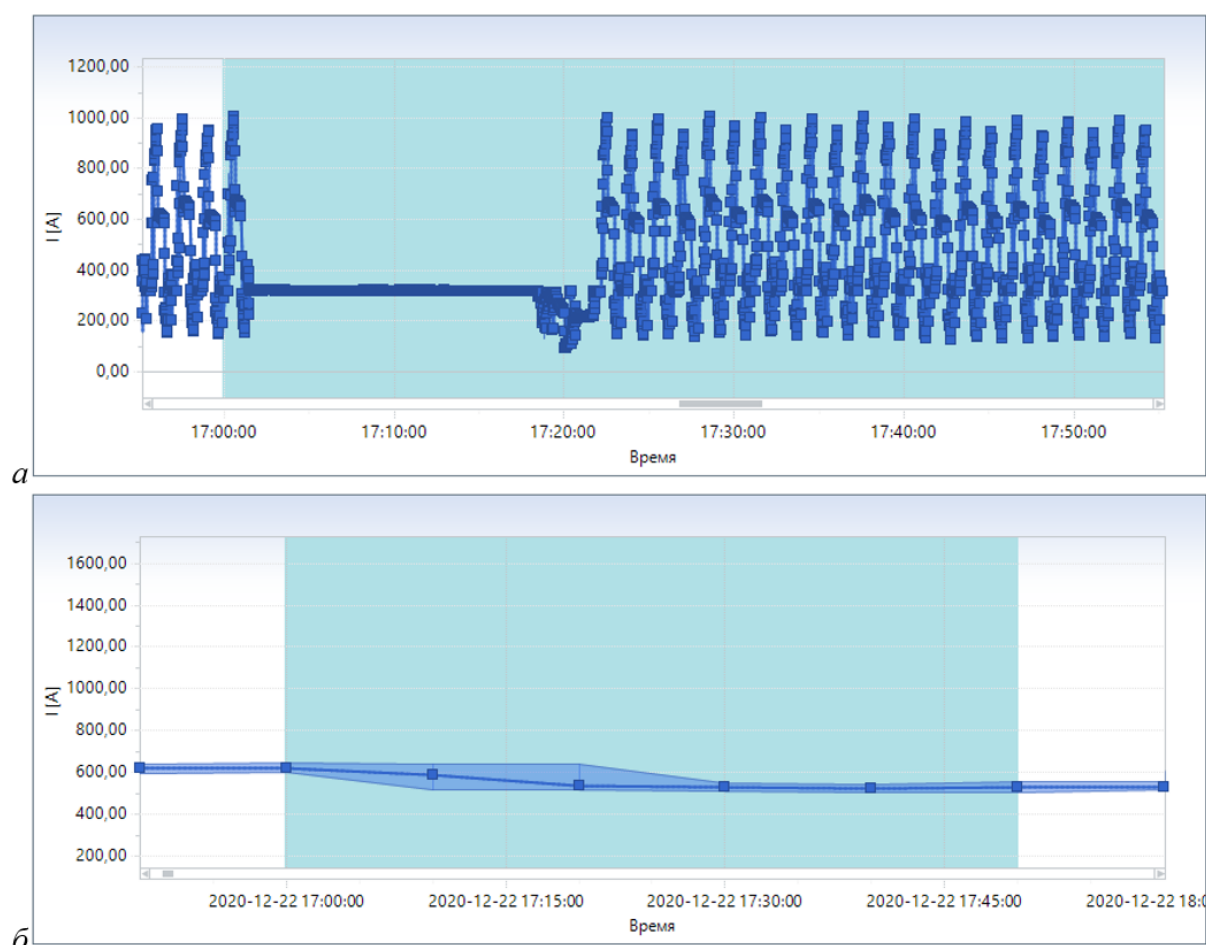


Рис. 3. Осциллограммы тока за 1 ч:
а — с усреднением 1 с; б — с усреднением 10 мин

Fig. 3. Current oscillograms recorded for 1 hour:
a—with 1 s data aggregation interval used, b—with 10 min data aggregation interval used

Из рисунков 2 и 3 видно, что усреднения 10 мин явно недостаточно для полной картины событий в сети, поскольку за час регистрации получается всего 6 точек усредненных значений. И если в отношении напряжения это не критично, то в отношении тока теряется 99 % информации.

Следует отметить, что такие результаты не являются опровержением друг друга, так как все эксперименты выполнены достоверно при одинаковом нормальном режиме работы схемы ПС. Такие регистрации показывают потенциальную возможность манипулирования результатами регистрации, а для регистраций с интервалом усреднения в 10 мин или 1 мин исключают перспективу своевременного выявления проблемных точек в энергосистеме и планирования ремонтных или реорганизационных работ.

При последовательном проведении регистрации на исследуемой подстанции горнодобывающего предприятия были определены ключевые точки сети, где систематически выявляются нештатные ситуации. В исследуемой сети одним из основных потребителей являются шахтные подъемные машины (ШПМ), которые для привода используют асинхронные электродвигатели и электродвигатели постоянного тока. Вследствие сложных режимов работы ШПМ, связанных с перевозкой людей, частыми пусками, изменением направления вращения, величины усилий, скорости движения, электропривод должен обладать высокой надежностью, безопасностью и экономичностью работы, значительной перегрузочной способностью, широким диапазоном регулирования частоты вращения, простотой и удобством управления.

Одним из результатов исследований стала фиксация нарушений ПКЭ по восьми показателям, среди которых нарушения по гармоническому составу напряжения. При анализе мониторинговых данных возникли предположения, что это влияние мощного горного оборудования (скиповой машины, двигателей и т. д.). Подъемные машины имеют тяжелый режим работы из-за частых пусков, изменения направления вращения, скорости движения. Для привода таких машин используют электродвигатели, которые контролируются автоматикой. В случае со скиповой машиной автоматика контролирует скорость вращения, давление, ток якоря и возбуждения и т. д.

Также были получены электрические характеристики скиповой машины. На рис. 4 приведены осциллограммы тока якоря и тока возбуждения. Периодичность тока возбуждения составляет 3 мин. Периодичность колебаний тока якоря такая же, как и у тока, зарегистрированного на 4-й секции шин (рис. 5), и составляет 1,5 мин.



Рис. 4. Зарегистрированные параметры скиповой машины. Выборка 5 мин

Fig. 4. Mine hoist parameters recorded. Sample time is 5 min

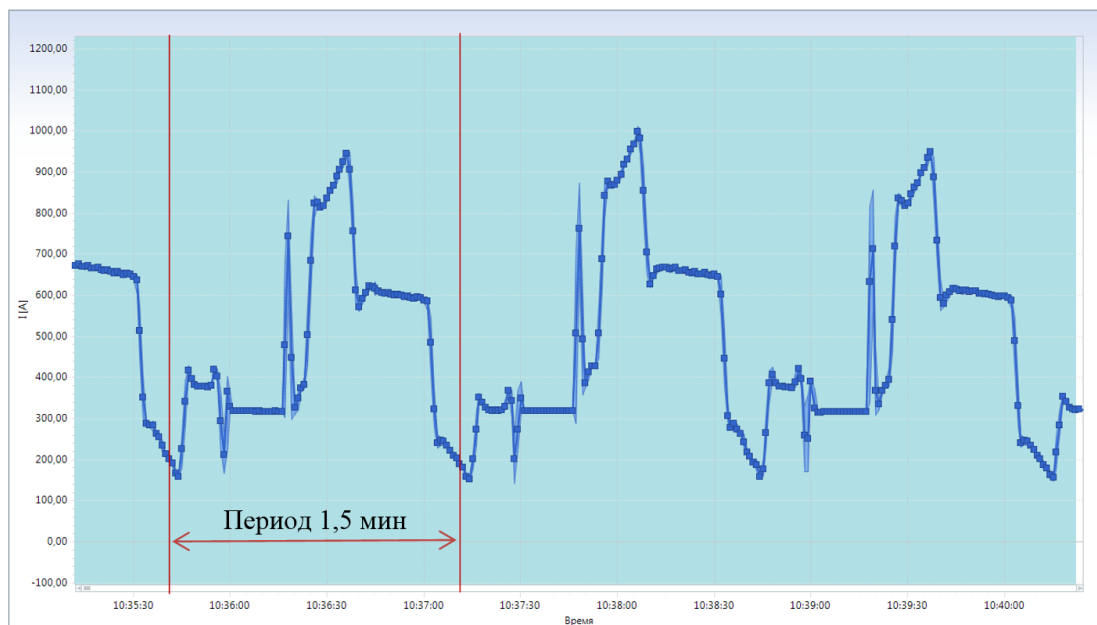


Рис. 5. Осциллограмма тока на 4-й секции шин ПС с усреднением 1 с

Fig. 5. Oscilloscope of current recorded on bus 4 of the substation, 1 s data aggregation method used

Следует отметить, что при этом график тока (см. рис. 5) показывает колебания от 150 до 1050 А. Изменение тока за 1 с почти на 500 А сильно влияет на износ силового оборудования [Techniques..., 2022].

По длительности и амплитуде графики (см. рис. 4 и 5) имеют четко выраженные повторения (режим работы скиповой установки циклический), но по форме есть отличия, которые можно объяснить влиянием другого, менее мощного специфического оборудования горнодобывающего предприятия.

Электрическое оборудование таких предприятий запитывают от подстанций среднего и низкого напряжения по стороне 6/10 кВ, а основную нагрузку составляют электродвигатели электроприводов постоянного тока. Работа таких двигателей контролируется микропроцессорной техникой, которая является не только активным потребителем реактивной энергии, но и источником гармонических искажений.

Одинокные быстрые изменения напряжения вызываются в основном резкими изменениями нагрузки в электроустановках потребителей, переключениями в системе либо неисправностями. Для решения этой проблемы используются тиристорные регуляторы напряжения, которые еще недостаточно популярны и изучены. Однако неизвестно, как сами тиристорные регуляторы повлияют на другие показатели качества электроэнергии. Это необходимо моделировать до проведения исследований в действующих высоковольтных сетях.

Произведя регистрации с 10-минутным и 1-минутным усреднением регистрируемых величин, можно сделать выводы лишь о примерном состоянии исследуемого участка сети. Как указывалось ранее, регистрации с 10-минутным усреднением крайне неинформативны и очень приблизительны, что необходимо отметить в регулирующих данные измерения стандартах ГОСТ или полностью исключить из нормативов, потому что измерения с усреднением более 60 с технически не являются доказательной базой соответствия/несоответствия показателей качества электроэнергии. Однако для предприятий и надзорных органов (например, в России это Роспотребнадзор) такие измерения являются достаточными, чтобы юридически завуалировать трудности с электромагнитной совместимостью в сети.

С позиции обеспечения долгосрочной стабильности электрической сети предприятия, а как следствие, устойчивости всего производственного цикла к отключениям работа по данному направлению является крайне актуальным и правильным мероприятием, что при соответствующей оценке приведет к колоссальному экономическому эффекту в перспективе 5–7 лет (с учетом проведения предупредительных плановых работ на уязвимых узлах сети по итогам произведенного анализа).

Выводы

1. Предметно доказано, что отсутствие искажений в протоколах ПКЭ не означает отсутствие проблем, связанных с параметрами электроэнергии.

2. На основе данных сопоставительной и плановых регистраций сделан вывод, что не каждый сертифицированный регистратор показателей качества электроэнергии способен объективно оценивать уровень опасности искажений: может фиксироваться полное соответствие нормам ГОСТ даже при наличии искажений, что в долгосрочной перспективе является негативным сценарием развития для стабильности работы участка сети и подстанционного оборудования.

3. Аналитическое исследование о перспективах применения стандартизированных регистраций показателей качества электроэнергии выявило, что правильная настройка регистратора и установка в нужной ячейке подстанции показывает, что через стандартизированные методы диагностики можно выявить системные отклонения показателей качества электроэнергии в сети 6 кВ и впоследствии использовать для планирования работ на подстанции. Это позволит избегать аварийных режимов и даже отключений и простоев.

4. Верификация одновременных регистраций показателей качества электроэнергии различными сертифицированными приборами на одном объекте выявляет бесперспективность применения некоторых приборов и является аналитическим обоснованием к пересмотру требований к приборной измерительной базе на законодательном уровне.

Список источников

ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 60 с.

ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

ГОСТ 33073-2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2015. М.: Стандартинформ, 2015. 46 с.

Приборы измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) // Электронприбор. URL: <https://www.electronpribor.ru/catalog/pribory-izmereniya-pokazatelej-kachestva-elektricheskoy-energii-pke/> (дата обращения: 20.11.2025).

Ярошевич В. В., Карпов А. С., Фастий Г. П., Смотров С. В. Электроснабжение высокоэнергоемких потребителей Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 58–66.

Bebikhov Y. V., Egorov A. N., Semenov A. S. How Higher Harmonics Affect the Electrical Facilities in Mining Power Systems // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia. 2020. P. 1–7.

Dheepanchakkravarthy A., Selvan M. P., Moorthi S. Alleviation of Power Quality Issues Caused by Electric Arc Furnace Load in Power Distribution System Using 3-Phase Four-Leg DSTATCOM // J. Inst. Eng. Ser. B. 2019. Vol. 100, No. 1. P. 9–22.

Do N. Y., Ngo X. C., Nguyen T. H. Effect of Power Quality on the Performance of Explosion-Proof Transformers in Mining in Vietnam // J. Polish Miner. Eng. Soc. 2023. Vol. 2. P. 65–69.

Electrical power quality of iron and steel industry in Turkey / O. Salor [et al.] // 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. New Orleans, LA, USA. 2007. P. 404–423.

Hyla M. Higher harmonics filtration in the power supply system of thyristor hoisting machine of shaft transport in a mining plant // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 98, No. 5. P. 43–48.

Hyla M., Latko A. Advanced Static Var Generator in the Reactive Power Automatic Compensation System of an Underground Mine with a Thyristor Hoisting Machine // Energies. 2024. Vol. 17, No. 15. 3628.

Impact of Power Quality on the Efficiency of the Mining Process / T. Siostrzonek [et al.] // Energies. 2024. Vol. 17, No. 22. 5675.

Karpov A. S., Fastiy G. P., Yaroshevich V. V., Ivonin V. V. Fault analysis of the 110 KV power grid with one-way power supply // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 206. 107792.

Karpov A. S., Yaroshevich V. V., Fastiy G. P., Gubskaya E. I. Electrophysical Method for Identifying the Causes of Excessive Hydro Generator Vibration // Appl. Sci. 2023. Vol. 13, No. 16. 9152.

Methods of improving power indices of electric drive active rectifiers for mine hoists / O. Sinchuk [et al.] // E3S Web of Conferences. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. Kryvyi Rih, Ukraine. 2021. Vol. 280. 05014.

Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency / F. Nepsha [et al.] // E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium. Kemerovo, Russia. 2019. Vol. 105. 03026.

Pichuev A., Schevyrev Y., Zaugolnikova E. Ensuring Quality of Electricity in Gold Mines and Mills // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia. 2020. P. 1–5.

Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M.Y. Improvement of the Electric Energy Quality in Underground Electric Networks in Highly Productive Coal Mines // Min. Sci. Technol. 2022. Vol. 7. P. 66–77.

Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry: A Review / J. Yaghoobi [et al.] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 162500–162518.

Semenov A. S. Analyzing Impacts of Higher Harmonics on Electricity Quality Parameters at Mining Facilities // 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russian Federation. 2024. P. 321–325.

Siostrzonek T. The Hoisting Machines as Source of Higher Harmonics in Underground Mines // Power Quality and Harmonics Management in Modern Power Systems. 2024. P. 1–25.

Sreewirote B., Ngaopitakkul A. Power Quality Analysis on Arc Furnace Capacitor Bank System in Thailand // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 541, No. 1. 012010.

Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the Quality of Electricity in the Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex with Hybrid Filter-Compensating Devices // J. Min. Inst. 2021. Vol. 247. P. 132–140.

Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review / R. Martinez [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 12. 7428.

Zhezhenko I. V., Sayenko Y. L., Gorpnich A. V. Electromagnetic Compatibility in the Industrial Electric Power Supply Systems // 2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. Lodz, Poland. 2009. P. 1–6.

References

- Bebikhov Y. V., Egorov A. N., Semenov A. S. How Higher Harmonics Affect the Electrical Facilities in Mining Power Systems. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 2020, pp. 1–7.
- Dheepanchakkravarthy A., Selvan M. P., Moorthi S. Alleviation of Power Quality Issues Caused by Electric Arc Furnace Load in Power Distribution System Using 3-Phase Four-Leg DSTATCOM. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 2019, Vol. 100, No. 1, pp. 9–22.
- Do N. Y., Ngo X. C., Nguyen T. H. Effect of Power Quality on the Performance of Explosion-Proof Transformers in Mining in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2023, Vol. 2, pp. 65–69.
- Hyla M. Higher harmonics filtration in the power supply system of thyristor hoisting machine of shaft transport in a mining plant. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2022, Vol. 98, No. 5, pp. 43–48.
- Hyla M., Latko A. Advanced Static Var Generator in the Reactive Power Automatic Compensation System of an Underground Mine with a Thyristor Hoisting Machine. *Energies*, 2024, Vol. 17, No. 15, 3628.
- Karpov A. S., Fastiy G. P., Yaroshevich V. V., Ivonin V. V. Fault analysis of the 110 KV power grid with one-way power supply. *Electric Power Systems Research*, 2022, Vol. 206, 107792.
- Karpov A. S., Yaroshevich V. V., Fastiy G. P., Gubskaya E. I. Electrophysical Method for Identifying the Causes of Excessive Hydro Generator Vibration. *Applied Sciences*, 2023, Vol. 13, No. 16, 9152.
- Martinez R., Castro P., Arroyo A., Manana M., Galan N., Moreno F. S., Bustamante S., Laso A. Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review. *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 12, 7428.
- Nepsha F., Belyaevsky R., Efremenko V., Varnavskiy K. Modern Problems of Increasing Coal Mines Power Supply Efficiency. *E3S Web of Conferences. IVth International Innovative Mining Symposium*. Kemerovo, Russia, 2019, Vol. 105, 03026.
- Pichuev A., Schevyrev Y., Zaugolnikova E. Ensuring Quality of Electricity in Gold Mines and Mills. *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russia, 2020. P. 1–5.
- Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Y. Improvement of the Electric Energy Quality in Underground Electric Networks in Highly Productive Coal Mines. *Mining Science and Technology*, 2022, Vol. 7, pp. 66–77.
- Pribory izmereniya pokazateley kachestva elektricheskoy energii (PKE) [Instruments for measuring power quality indices (PQI)]. *Elektronpribor* [Electronic device]. (In Russ.) Available at: <https://www.electronpribor.ru/catalog/pribory-izmereniya-pokazatelej-kachestva-elektricheskoy-energii-pke/> (accessed 20.11.2025).
- Salor O., Gultekin B., Buhan S., Boyrazoglu B., Inan T., Atalik T., Acik A., Terciyarli A., Unsar O., Altintas E., Akkaya Y., Ozdemirci E., Cadirci I., Ermis M. Electrical power quality of iron and steel industry in Turkey. *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*. New Orleans, LA, USA, 2007, pp. 404–423.
- Semenov A. S. Analyzing Impacts of Higher Harmonics on Electricity Quality Parameters at Mining Facilities. *2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 321–325.
- Sinchuk O., Filipp Y., Somochkyn A., Strzelecki R., Baranovska M. Methods of improving power indices of electric drive active rectifiers for mine hoists. *E3S Web of Conferences. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters*. Kryvyi Rih, Ukraine, 2021, Vol. 280, 05014.
- Siostrzonek T. The Hoisting Machines as Source of Higher Harmonics in Underground Mines. *Power Quality and Harmonics Management in Modern Power Systems*, 2024, pp. 1–25.
- Siostrzonek T., Wójcik J., Dutka M., Siostrzonek W. Impact of Power Quality on the Efficiency of the Mining Process. *Energies*, 2024, Vol. 17, No. 22, 5675.
- Sreewirote B., Ngaopitakkul A. Power Quality Analysis on Arc Furnace Capacitor Bank System in Thailand. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 541, No. 1, 012010.
- State Standard 30804.4.30-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Metody izmereniy pokazateley kachestva elektricheskoy energii* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Methods of measurement of power quality indices]. Moscow, Standartinform, 2014, 60 p. (In Russ.).
- State Standard 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Standards of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2014, 20 p. (In Russ.).
- State Standard 33073-2014. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Control and monitoring of power quality in general-purpose power supply systems]. Moscow, Standartinform, 2015, 46 p. (In Russ.).

Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the Quality of Electricity in the Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex with Hybrid Filter-Compensating Devices. *Journal of Mining Institute*, 2021, Vol. 247, pp. 132–140.

Yaghoobi J., Abdullah A., Kumar D., Zare F., Soltani H. Power Quality Issues of Distorted and Weak Distribution Networks in Mining Industry: A Review. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 162500–162518.

Yaroshevich V. V., Karpov A. S., Fastiy G. P., Smotrov S. V. Elektrosnabzhenie vysokoenergoyomkikh potrebiteley Murmanskoy oblasti [Power supply for high-energy consumers in the Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 58–66. (In Russ.).

Zhezhelenko I. V., Sayenko Y. L., Gorpinich A. V. Electromagnetic Compatibility in the Industrial Electric Power Supply Systems. *2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Lodz, Poland, 2009, pp. 1–6.

Информация об авторах

В. В. Ярошевич — научный сотрудник;

Е. И. Губская — инженер;

А. С. Карпов — кандидат технических наук, директор.

Information about the authors

V. V. Yaroshevich — Research Associate;

E. I. Gubskaya — Engineer;

A. S. Karpov — PhD (Engineering), Director.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.

The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 15.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 621.319.53; 537.529; 621.926
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.010

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО РАЗРУШЕНИЯ ШЛАКОВ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Андрей Александрович Климов

Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, a.klimov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4640-6930>

Аннотация

Шлаки медно-никелевого передела могут содержать значительные количества включений цветных металлов, доступных для извлечения с целью получения экономической выгоды. Основным составляющим веществом данных шлаков является непроводящая смесь железисто-магнезиальных и кальциевых стёкол. Ценный компонент в такой смеси содержится по большей части в виде включений соединений цветных металлов размерами от 500 до 100 мкм. Было проведено изучение эффективности электроимпульсной дезинтеграции (ЭИД) медно-никелевых шлаков трех производств: конвертерные шлаки комбинатов «Североникель» и «Южуралникель» и гранулированный шлак комбината «Печенганикель». Выявлено, что наиболее перспективными для крупнукусового дробления методом ЭИД являются конвертерные шлаки «Североникель» с показателями энергоёмкости на стадийное разрушение до крупности менее 15 и 5 мм порядка 14 и 22 кВт·ч/т; измельчение до крупности менее 1 мм этим методом целесообразно для гранулированных шлаков «Печенганикель» с показателями энергозатрат в 31 кВт·ч/т и выделением 43 % продукта в полезную фракцию. Разрушение шлаков комбината «Южуралникель» сопровождалось одновременно повышенными энергозатратами и переизмельчением материала, что негативно сказывается на производительности метода.

Ключевые слова:

электроимпульсная дезинтеграция, медно-никелевые шлаки, дробление, измельчение, энергоёмкость разрушения

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2025-0057).

Для цитирования:

Климов А. А. Перспективы электроимпульсного разрушения шлаков медно-никелевых производств для последующей переработки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 94–104. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.010.

Original article

PROSPECTS OF ELECTRIC PULSE FRACTURING OF COPPER-NICKEL PRODUCTION SLAGS FOR FURTHER PROCESSING

Andrey A. Klimov

Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, a.klimov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4640-6930>

Abstract

Copper-nickel refining slags may contain significant amounts of non-ferrous metal inclusions that can be recovered for economic benefit. The main constituent of these slags is a non-conductive mixture of iron-magnesium and calcium silica glasses. The valuable component in such a mixture is mostly contained in the form of inclusions of non-ferrous metal compounds with sizes from 500 to 100 microns. The efficiency of electric pulse disintegration (EPD) of copper-nickel slags from three production facilities was studied: converter slags from «Severonickel» and «Yuzhuralnickel» plants and granulated slag from «Pechenganickel» plant. It was found out that the most promising for coarse lump crushing by EPD method are converter slags of «Severonickel» with energy consumption for stage fracturing to the size less than 15 and 5 mm of about 14 and 22 kWh/t; grinding to the size less than 1 mm by this method is expedient for granulated slags of «Pechenganickel» with energy consumption of 31 kWh/t and separation of 43 % of the product into useful fraction. Fracturing of slags from «Yuzhuralnickel» plant was accompanied by increased energy consumption and overgrinding of the material, which negatively affects the productivity of the method.

Keywords:

electric pulse disintegration, copper-nickel slags, crushing, grinding, fracturing energy consumption

Acknowledgements:

This work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2025-0057).

For citation:

Klimov A. A. Prospects of electric pulse fracturing of copper-nickel production slags for further processing // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 94–104. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.010.

Введение

Исходя из полученных Росстатом данных [Паспорт..., 2025], в 2021 г. на предприятиях цветной металлургии Российской Федерации было образовано 5,8 млн т шлаков, при этом 4,8 млн т из них было использовано (доля использования — 82,8 %). Также указывается, что, по экспертным оценкам, количество образуемых ежегодно шлаков цветной металлургии составляет не менее 9,5 млн т. Образующиеся на предприятиях медно-никелевого производства шлаки с разных этапов передела руд первоначально складываются в отвалы, которые на данный момент могут рассматриваться как техногенные месторождения металлосодержащего сырья. К примеру, отвалы шлаков плавильного цеха комбината «Печенганикель» АО «Кольская ГМК» исследователями оцениваются как месторождение, в котором находится более 45 млн т сырья [Потапов и др., 2013]. Однако складирование шлаков в отвалы и перемещение в пределах полигонов приводит к их выветриванию и постепенному снижению их крупности, что вызывает трудности при вторичном применении. Дополнительно воздействие атмосферных осадков на них приводит к вымыванию токсичных тяжелых металлов и загрязнению подземных вод [Тюкавкина, Гуревич, 2009], из чего следует необходимость переработки таких отходов.

Наиболее дешевыми способами рециклинга медно-никелевых шлаков с их минимальной обработкой являются применение в качестве материала заполнителя при производстве бетонных конструкций [Доманская, Тропников, 2014] и измельчение с последующим введением в роли связующего вещества в состав цементных смесей — шлакопортландцементов [Гуревич, Тюкавкина, 2007; Katsiotis et al., 2015]. Также одним из вариантов прямого применения является дробление шлаков и использование в качестве абразивных порошков купершлака и никельшлака. Проводятся исследования по применению шлаков как химического мелиоранта с водоудерживающими агентами для выращивания растительного покрова, поскольку содержащиеся в их составе компоненты могут выступать в роли медленно выделяющихся питательных микроэлементов [Горбачева и др., 2018; Горбачева и др., 2018]. Основу современной промышленной переработки шлаков медно-никелевых производств составляют методы флотации, пирометаллургии и гидрометаллургии. Авторы работы [Sarfo et al., 2017] приводят данные по карботермическому процессу восстановления металлов из соединений шлака медеплавильного производства, в результате которого получают стальной сплав с высоким содержанием меди и молибдена и вторичный силикатный шлак. Эти продукты могут быть напрямую использованы в металлургии и при изготовлении стёкол и керамики. Гидрометаллургические же методы строятся на применении различных выщелачивающих химических соединений для перевода кремнезема и металлов из шлака в растворы и нерастворимые осадки в зависимости от применяемого реагента [Окорочкова, 2008; Тимошик и др., 2019].

Практически каждому из перечисленных выше методов обычно предшествует стадия механической подготовки сырья, для чего шлаковые отходы подвергают дроблению, измельчению и классификации. Для увеличения эффективности методов необходимо вести измельчение шлаков до крупности менее 500 мкм, при достижении которой начинает происходить раскрытие металлосодержащих компонентов, оставшихся в шлаке после его удаления из расплава. Однако данные в работе [Шадрунова и др., 2013] свидетельствуют, что в шлаках цветных металлов не обнаруживается сложных сростаний рудных минералов со шлакообразующей матрицей. Более того, из соотношений микротвердостей компонентов рассмотренных в работе медно-никелевых шлаков можно сделать вывод, что нерудные компоненты, образующие матрицу шлака, обладают высокой склонностью к хрупкому разрушению, тогда как рудные минералы более подвержены пластической деформации и более стойки к нагружающему воздействию. Поэтому представляется перспективным изучение возможности использования метода электроимпульсной дезинтеграции в жидкости для дробления и измельчения таких техногенных отходов, исходя из доказанной селективности воздействия

высоковольтных разрядов на материалы, состоящие из компонентов с разными прочностными характеристиками. Данные работы [Andres et al., 2001] по разрушению сталеплавильных шлаков показывают большую степень высвобождения железистого компонента практически на всех крупностях продукта при электроимпульсной дезинтеграции, чем при механическом истирании с теми же энергозатратами. В отношении шлаков медно-никелевых производств были проведены исследования [Светлов и др., 2015] по улучшению показателей флотации путем их предварительной электроимпульсной обработки. В исследовании было установлено, что после ЭИД извлечение никеля в концентрат повысилось более чем на 20 %, а извлечение меди — более чем на 15 %.

Однако проводящие свойства, химический состав и структура фаз такого многокомпонентного материала, как шлак, способны очень сильно воздействовать на характер протекания электрического разряда в нем, определяющий эффективность и селективность его электроимпульсной дезинтеграции. Поэтому целью данной работы являлась оценка целесообразности применения ЭИД к данному многокомпонентному сырью и определение значений энергоемкости разрушения шлаков плавления медно-никелевых руд и степени перевода продукта в обогащаемую фракцию.

Экспериментальная часть

Лабораторная электроимпульсная установка

Электроимпульсное воздействие на медно-никелевые шлаки проводилось в лабораторной установке, состоящей из семиступенчатого генератора импульсных напряжений Аркадьева — Маркса с максимальными напряжением и энергией в импульсе 320 кВ и 1400 Дж соответственно (ГИН 320/0,028) и дробильно-измельчительной камеры (ДИК) с электродной системой «потенциальное острие — заземленное чашеобразное сито». Схема генератора и конструкция камеры представлены в работе [Потокин и др., 2022]. В табл. 1 приведены рабочие параметры генератора, использованные в данном исследовании. Амплитуда импульсов в опытах была установлена на уровне 210 кВ исходя из максимальных размеров отдельных образцов шлаков. Длина рабочего искрового промежутка электродной системы настраивалась в пределах от 50 до 25 мм; нижняя граница диапазона была выбрана исходя из минимально необходимых размеров зоны разрушения под потенциальным электродом и соображений снижения эффективности электроимпульсного воздействия при уменьшении длины промежутка. В стадийном разрушении объемных образцов шлаков применялись стальные сита с круглыми отверстиями диаметром 15, 5, 2 и 1 мм для вывода материала из зоны разрушения. Размер ячеек сит определял максимальную крупность продукта на данной стадии. Разделение процесса электроимпульсного дробления для шлаков на 4-й стадии должно было существенно уменьшить выход шламовых фракций и оптимизировать энергозатраты на разрушение. Объемы навесок образцов для фрагментации выбирались таким образом, чтобы рабочий промежуток всегда оставался заполненным; тем самым предотвращалось изменение характера воздействия на электрогидроимпульсное. Все эксперименты проводились в очищенной осмотическим методом воде с удельной проводимостью $\sigma \leq 10$ мкСм/см.

Таблица 1

Рабочие параметры ГИН 320/0,028

Operating parameters of the PVG 320/0.028

Номинальное напряжение разряда, кВ	Емкость в разряде, нФ	Энергия в импульсе, Дж	Длительность фронта импульса, мкс
210	28	630	0,17

Образцы шлаков

Для проведения экспериментов по импульсной обработке высоковольтными разрядами в жидкости были отобраны конвертерные шлаки трех комбинатов по производству меди и никеля. Конвертерные шлаки — продукт продувки кислорода, воздуха или их смеси через расплав сульфидов

металлов (штейн) и взаимодействия расплава с ошлаковывающим кварцевым флюсом. Расплавленная смесь штейна и шлака разделяется в ванне плавильной печи по плотности, при этом конвертерный шлак располагается над штейном. При продувке штейна из него в шлак могут переходить частицы как сульфидов цветных металлов, так и корольки самих металлов.

Электроимпульсное воздействие производилось на следующие шлаки:

1) конвертерный шлак комбината «Североникель» — в основном фракции от 30 до 10 мм (средневзвешенный размер — 24,1 мм). Представляет собой плотный, схожий с горной породой материал коричневого цвета на поверхности, черный и зернистый на изломе со множеством мелких пор;

2) конвертерный шлак комбината «Южуралникель» — фракции от 80 до 20 мм с крупными образцами по большей части (средневзвешенный размер — 48,93 мм). По своим внешнему виду и структуре схож со шлаком комбината «Североникель»;

3) гранулированный шлак комбината «Печенганикель» — фракции от 10 до 1 мм с мелкими частицами в основной части (средневзвешенный размер — 1,77 мм). Представляет собой плотные и прочные гранулы черного цвета с раковистым изломом и стеклянным блеском.

Основным составляющим веществом данных шлаков является смесь железисто-магнезиальных и кальциевых стёкол — алюмосиликатов железа, магния, кальция с оксидами этих металлов. Ценные компоненты в такой смеси могут содержаться в следующем виде: никель — до 50 % включений сульфидов и до 50 % включений оксида; медь — до 65 % распределенных сульфидов и до 35 % включений сульфидов; кобальт — по большей части в виде оксидов [Гальнбек и др., 2002]. Большая часть сульфидов никеля, ферроникеля, сульфидов железа с примесью корольков никеля и сульфидов меди в структуре шлаков имеют размеры от 500 до 100 мкм [Шадрунова и др., 2013]. Химический состав исследованных шлаков представлен в табл. 2.

Таблица 2

Компонентный состав шлаков для электроимпульсного разрушения, %

Component composition of slags for electric pulse fracturing, %

Шлак	SiO ₂	Fe	Co	Cu	Ni	Mg	Ca	Al	S
«Печенганикель»	36,68	25,60	0,09	0,28	0,20	7,18	1,72	3,65	0,76
«Североникель»	36,19	32,30	0,07	0,18	0,11	4,74	2,91	2,71	1,35
«Южуралникель»	30,20	27,50	0,10	0,02	0,50	3,81	6,48	2,36	1,59

Имея достаточно близкий химический состав, эти шлаки всё же отличаются по некоторым физическим свойствам, что обуславливается различными технологическими процессами их образования. Так, конвертерные шлаки комбинатов «Североникель» и «Южуралникель» имеют плотность порядка 3,4–3,7 г/см³, тогда как плотность гранулированного шлака комбината «Печенганикель» составляет приблизительно 2,7 г/см³. Содержание меди в шлаках комбината «Южуралникель» на порядок ниже, чем в других рассматриваемых шлаках, что позволяет считать их практически полностью никеленосными. При приложении измерительных электродов к поверхности образцов не было зафиксировано протекания через них электрического тока. Однако содержащиеся в структуре рассмотренных шлаков включения сульфидов никеля, железа и меди проявляют полупроводниковые свойства. Поэтому предполагалось, что при приложении к образцам высокого напряжения проводимость данных включений будет увеличиваться и разряд будет проходить в основном через них. Но слишком большие скопления таких включений могут, наоборот, препятствовать развитию канала разряда и снижать производительность разрушения, особенно при уменьшении размера измельчаемого материала.

В таблице 3 представлены фракционные распределения исходных образцов по диапазонам размеров. Порошок, содержащий фракцию менее 1 мм, сразу же отделялся от навесок, поскольку не подходил для проведения экспериментов по разрушению.

Таблица 3

Фракционный состав исходных навесок шлаков

Fractional composition of initial slag materials

Шлак «Североникель»		Шлак «Южуралникель»		Шлак «Печенганикель»	
мм	%	мм	%	мм	%
-30 + 20	67,46	-80 + 70	19,04	—	—
-20 + 15	10,35	-70 + 60	14,35	—	—
-15 + 10	10,95	-55 + 50	27,44	—	—
-10 + 5	7,75	-45 + 40	3,94	-10 + 5	1,82
-5 + 4,2	0,81	-35 + 30	10,93	-5 + 4,2	1,46
-4,2 + 3	1,06	-30 + 25	10,49	-4,2 + 3	7,66
-3 + 2	0,53	-25 + 20	8,03	-3 + 2	19,78
-2 + 1	0,35	-20 + 15	5,53	-2 + 1	44,89
-1	0,74	-15 + 10	0,25	-1	24,38

Результаты и обсуждение

Первоначально для подтверждения возможности разрушения шлаков электрическими разрядами был проведен опыт по пробою крупного образца конвертерного шлака комбината «Североникель» в электродной системе «острие-острие» с помощью ГИН 320/0,028.

Иллюстрация эксперимента представлена на рис. 1. Образец располагался в пробойнике с фиксацией между четырьмя остриями, два из которых были вспомогательными и не участвовали в передаче электрического импульса. Расстояние между рабочими электродами составляло порядка 48 мм. Суммарно на образец до разрушения было подано 8 импульсов напряжением 210 кВ с энергией в 630 Дж каждый. Такое большое количество импульсов до разрушения можно обосновать следующим образом: 1) при каждом импульсе происходил сквозной пробой, протекающий по определенным проводящим включениям в непроводящей матрице, однако сопротивление пути было недостаточно высоким для развития полноценного расширяющегося канала разряда; 2) каждый импульс разрушал породу изнутри, формируя пустоты, которые в конечном итоге протянулись от одного электрода до другого; 3) образованное пустое пространство между рабочими электродами заполнилось водой, после чего последние разряды привели к быстрому разогреву воды в пустом пространстве с образованием парогазовой смеси, разорвавшей кусок изнутри.

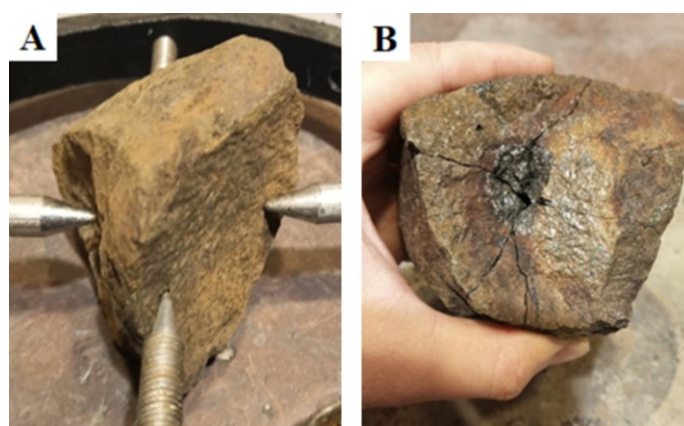


Рис. 1. Пробой крупного образца шлака «Североникель»:

A — фиксация образца в электродной системе; B — входная воронка канала разряда

Fig. 1. Breakdown of a large sample of “Severonickel” slag

A—fixation of the sample in the electrode system; B—inlet funnel of the discharge channel

Можно заметить, что разрушение произошло преимущественно по 4 основным направлениям без образования ветвящихся трещин и кольцевых областей разрушения, как это происходит при избытке энергии в канале разряда. В целом эксперимент показал, что при электроимпульсном воздействии и разрушении шлаки медно-никелевых производств ведут себя как плохо проводящая мелкозернистая горная порода.

С образцами шлаков комбинатов «Североникель» и «Южуралникель» были проведены полные циклы стадийного дробления последовательно на ситах с ячейками 15, 5, 2, 1 мм; из-за малого средневзвешенного размера шлаки «Печенганикель» были измельчены сразу на сите 1 мм. Количество импульсов, поданное на навески каждого вида шлаков, задавалось пропорциональным массе навесок. В табл. 4 приводятся основные статистические показатели процесса дробления всех видов шлаков, а на рис. 2 изображены кумулятивные кривые фракционных составов продуктов со всех стадий. Интегральные кривые показывают, что по большей части массовое распределение частиц по крупности для каждой стадии являлось равномерным. Такой характер является особенностью разрушения шлаков электроимпульсным методом, поскольку для непроводящих материалов чаще всего кривые фракционных составов продуктов ЭИД ближе к распределению Вейбулла.

Таблица 4

Основные сводные показатели ЭИД шлаков

Key summary indicators of slag EPD

Вид шлака	«Североникель»				«Южуралникель»				«Печенганикель»
Размер ячеек сит, мм	15	5	2	1	15	5	2	1	1
Средняя исходная крупность, мм	35,0	11,1	6,0	2,3	53,3	25,6	4,7	2,7	2,2
Средняя крупность недодроба, мм	17,5	10,6	4,4	1,8	47,3	10,0	5,8	3,4	1,6
Средняя крупность продукта, мм	7,6	2,8	1,1	0,5	6,8	2,5	1,0	0,5	0,5
Показатель степени дробления	4,6	4,0	5,5	4,6	7,8	10,3	4,5	5,8	4,0
Затраты энергии к массе полученной фракции, кВт·ч/т	14	22	58	170	34	54	64	90	31

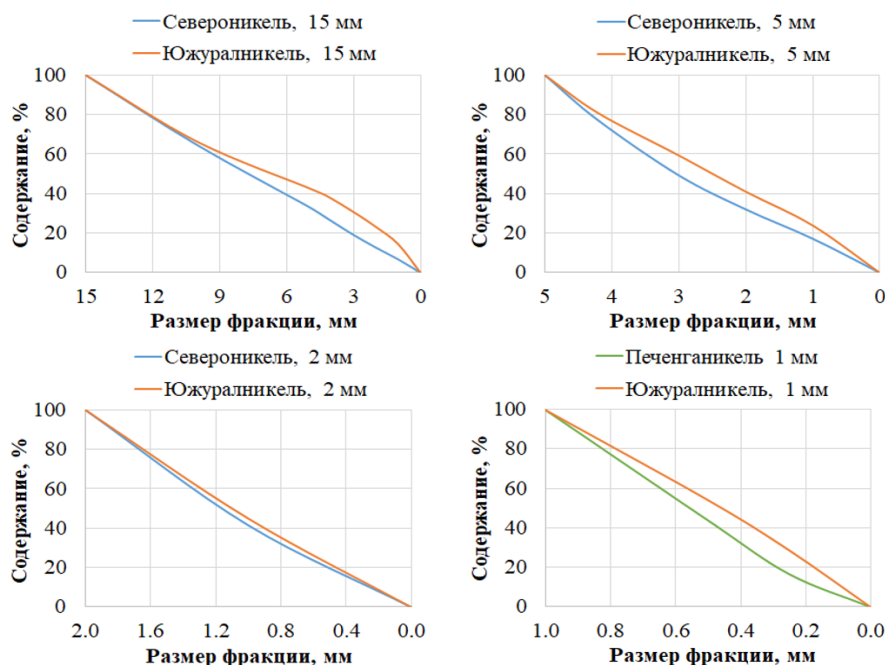


Рис. 2. Интегральные фракционные распределения продуктов фрагментации шлаков на ситах 15, 5, 2 и 1 мм

Fig. 2. Integral fractional distributions of slag fragmentation products on 15, 5, 2 and 1 mm sieves

Статистические данные электроимпульсной дезинтеграции конвертерных шлаков «Североникель» свидетельствуют о том, что их разрушение протекало без заметных особенностей. Степень дробления за стадию оставалась практически одинаковой на всём протяжении экспериментов, и на каждой стадии происходило разрушение в основном сначала крупной фракции. Однако можно отметить очень резкое возрастание энергозатрат при переходе на стадию разрушения до размеров частиц менее 1 мм. Такое увеличение без аномалий в показателях крупности продукта и недодроба в сите может быть объяснено повышением проводимости среды за счет интенсивного преобразования некоторых компонентов шлака разрядами в растворимые соединения. Данное объяснение в некоторой степени подтверждается тем, что при переходе от крупнокускового дробления на сите с ячейками 15 мм к измельчению на сите с ячейками 1 мм значения сопротивлений контура нагрузки изменялись от 14 до 2,8 Ом. Сильное снижение сопротивления свидетельствует об увеличенном растекании токов в рабочей зоне на последней стадии измельчения.

Частично сказанное выше характерно и для процессов электроимпульсного дробления шлаков комбината «Южуралникель». Однако при дроблении данных конвертерных шлаков наблюдались определенные особенности. Можно заметить повышенные значения степеней дробления и довольно большие значения удельных энергозатрат для стадий с ситами 15 и 5 мм по сравнению со шлаками комбината «Североникель», что свидетельствует о переизмельчении рассматриваемого сырья на данных стадиях. Об этом же говорит содержание фракции менее 1 мм по массе в продуктах дробления: для шлака «Североникель» — 6,8 и 17,2 % после сит 15 и 5 мм соответственно, а для шлака «Южуралникель» — 14,5 и 23,9 %. Переизмельчение может коррелировать с самыми высокими содержаниями никеля и кобальта и самым низким содержанием силикатов в составе шлаков комбината «Южуралникель» по сравнению с двумя другими образцами. Также обращает на себя внимание факт превышения средней крупностью нераздробленного материала на ситах с ячейками 2 и 1 мм средней крупности начальных навесок для дробления. Это является следствием прохождения электрических разрядов преимущественно по мелким фракциям на данных стадиях без затрагивания крупных, а также преобладания электрогидравлического механизма разрушения над электроимпульсным. Тенденция к переизмельчению шлаков «Южуралникель» заметна и на кумулятивных кривых фракционных распределений, что выражается в их выгнутости вверх — к меньшему содержанию крупных частиц.

Как можно было увидеть ранее, шлак комбината «Печенганикель» являлся гранулированным и содержал лишь относительно малые по размерам частицы: фракция более 15 мм отсутствовала полностью, фракция более 5 мм представляла собой небольшой процент по массе. В исходном материале содержалось 24 % фракции менее 1 мм, удаление которой отразилось на доступном для измельчения количестве материала. Средний размер доступной для разрушения фракции составил 2,2 мм, что определило проведение опытов только на сите 1 мм, поскольку измельчение на сите 2 мм не предоставило бы значимых результатов. Важно отметить, что гранулированные шлаки показали наименьшую энергоемкость разрушения для данной стадии из трех рассматриваемых видов при схожем показателе степени дробления. В процессе гранулирования шлаков повышается их пористость, а проводящие сульфиды распределяются по объему в виде небольших отдельных округлых включений, в отличие от конвертерных шлаков. Также химический состав этих шлаков свидетельствует о повышенном содержании силикатов магния и железа в них, являющихся непроводящими веществами. Все эти факторы объясняют низкие значения удельных энергозатрат при дроблении. Сравнение фракций продуктов крупностью менее 1 мм дробления шлаков «Печенганикель» и «Южуралникель» показывает, что гранулированные шлаки имеют тенденцию к образованию более крупных частиц, что говорит об их более эффективном разрушении электроимпульсным методом.

В таблице 5 приведены величины содержания обогатимых фракций в продуктах разрушения шлаков до крупности 1 мм. Из полученных результатов можно сделать вывод, что измельчение электроимпульсным методом наиболее целесообразно для гранулированных шлаков «Печенганикель» с показателями энергозатрат в 31 кВт·ч/т на достижение размеров продукта менее 1 мм и выделением 43 % продукта в полезную фракцию.

Таблица 5

Статистические и энергетические показатели измельчения шлаков до 1 мм
 Statistical and energy rates of slag grinding to 1 mm

Вид шлака	«Североникель»	«Южуралникель»	«Печенганикель»
Энергоемкость, кВт·ч/т	170	90	31
Содержание обогатимой фракции менее 0,5 мм, %	50,1	54,2	43,0

Ранее в работе [Климов, Селиванов, 2023] для сравнения эффективности процесса стадийного измельчения различных искусственных и природных материалов было использовано соотношение между максимальным размером продукта и удельными энергозатратами на дезинтеграцию материала на данной стадии, аналогичное моделям «размер — энергия», применяемым в механическом дроблении (модели фон Риттингера, Бонда, Кика — Кирпичёва и др.):

$$E_{ST} = C_1 \left(\frac{C_2}{lk} + 1 \right), \quad (1)$$

где E_{ST} — энергоемкость разрушения материала за стадию; l — диаметр отверстий сита, определяющий максимальный размер получаемого продукта дробления; C_1 , C_2 и k — коэффициенты, зависящие от технологических и энергетических параметров установки.

Построенные в соответствии с выражением (1) кривые энергоемкости для стадийного разрушения шлаков (рис. 3) и приведенные в табл. 6 значения коэффициентов для формул позволяют утверждать, что наиболее перспективными для крупнокускового и среднего дробления методом ЭИД являются конвертерные шлаки «Североникель» с показателями энергозатрат на стадийное разрушение до крупностей менее 15 и 5 мм порядка 14 и 22 кВт·ч/т, что сравнимо с затратами на электроимпульсную дезинтеграцию апатит-нефелиновой руды. Однако высокое значение коэффициента C_2 для данного вида шлака указывает на слишком быстрое возрастание энергозатрат по отношению к крупности продукта и, соответственно, на отсутствие преимуществ у электроимпульсного воздействия перед механическими методами в задаче измельчения этого материала до обогатимых фракций.

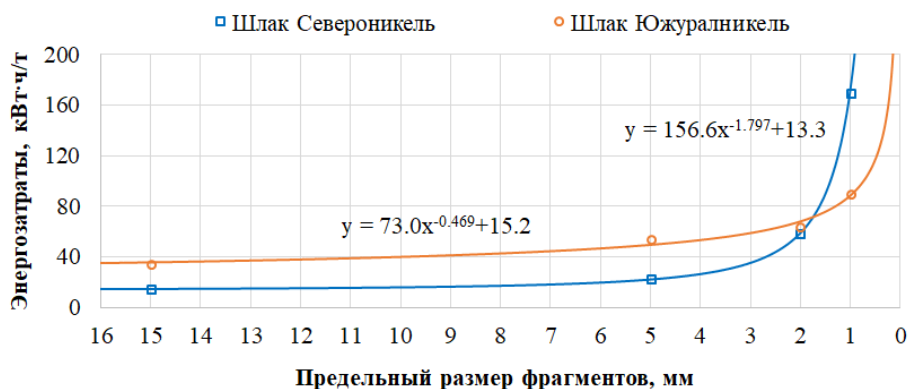


Рис. 3. Кривые удельных энергозатрат при стадийном разрушении медно-никелевых шлаков

Fig. 3. Curves of specific energy consumption during staged fracturing of copper-nickel slags

Таблица 6

Коэффициенты для выражений энергоемкости ЭИД при стадийном разрушении шлаков
 Coefficients for expressions of energy consumption of EPD during staged slag fracturing

Вид шлака	C_1	C_2	k
Североникель	13,3	11,8	1,797
Южуралникель	15,2	4,8	0,469

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования электроимпульсной дезинтеграции трех видов металлургических шлаков медно-никелевых производств выявили определенные особенности разрушения данного техногенного сырья по сравнению с разрушением горных пород и диэлектрических материалов.

Так, обработка разрядами шлаков комбината «Южуралникель» сопровождалась одновременно повышенными энергозатратами на процесс и переизмельчением материала на каждой стадии, что негативно сказывается на производительности метода электроимпульсной дезинтеграции при любой крупности данного шлака. Затраты на среднее дробление до крупности 15 мм и 5 мм для этого вида шлака оказались выше, чем для дробления магнетитовой руды комбината «ОЛКОН» — 34 и 54 кВт·ч/т против 21 и 37 кВт·ч/т соответственно. Объяснением данной особенности может являться очень малый размер частиц соединений цветных металлов, их повышенное содержание в матрице шлака и равномерное распределение по всему объему матрицы, что затрудняет образование устойчивого канала разряда внутри кусков шлака.

Среди рассмотренных образцов шлаков для целей крупного и среднего дробления заслуживают внимания шлаки комбината «Североникель» с их относительно невысокими энергозатратами на электроимпульсное разрушение и отсутствием склонности к образованию большого количества микронных фракций (ошламовыванию). При мелком дроблении до крупности менее 2 мм энергозатраты сравниваются с таковыми для шлаков комбината «Южуралникель», а при достижении крупности в 1 мм превышают их. Необходимо проведение дальнейших исследований для объяснения резкого повышения энергоемкости ЭИД при разрушении мелких фракций шлаков «Североникель».

Гранулированные шлаки комбината «Печенганикель» показали крайне низкие энергозатраты на достижение крупности менее 1 мм методом электроимпульсной дезинтеграции. Это может объясняться их высокой пористостью и хрупкостью стеклянной матрицы. В то же время самым низким оказался и процент образования полезной фракции, что располагает к введению дополнительной стадии электрогидроимпульсного воздействия для повышения высвобождения ценных компонентов.

Список источников

Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Макаров Д. В. Шлаки комбината «Печенганикель» в решении экологических задач // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 425–428.

Горбачева Т. Т., Иванова Л. А., Макаров Д. В. Шлаки комбината «Печенганикель» для создания субстратов-почвозаменителей (результаты опытов по созданию искусственных фитоценозов) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 429–432.

Гуревич Б. И., Тюкавкина В. В. Шлакопортландцемент на основе шлаков комбината «Печенганикель» // Север строительный. 2007. № 1. С. 38–40.

Доманская И. К., Тропников Д. Л. Перспективы применения медных шлаков в качестве заполнителей в составе строительных материалов // Цветные металлы. 2014. № 10. С. 62–65.

Исследование возможности извлечения цветных металлов и производства строительных материалов из шлаков медно-никелевого производства / А. В. Светлов [и др.] // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 335–344.

Климов А. А., Селиванов В. Н. К вопросу об удельных энергозатратах на разрушение материалов естественного и искусственного происхождения электрофизическими методами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 84–92. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

Комбинированный способ комплексной переработки отвального шлака комбината «Печенганикель» / О. А. Тимошик [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 4 (11). С. 69–74.

Окорочкова Е. А. Комплексная переработка отвальных шлаков комбината «Печенганикель» // Север строительный. 2008. № 1–2. С. 12–13.

Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И. В. Шадрюнова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.

Паспорт отраслевой программы «Применение вторичных ресурсов и вторичного сырья из отходов в промышленном производстве»: утв. Правительством РФ 17 ноября 2022 г. № 13493п-П11 // СПС «Гарант». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405781899/> (дата обращения: 26.05.2025).

Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогащенными комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.

Тюкавкина В. В., Гуревич Б. И. Оценка степени изменчивости состава и свойств гранулированных медно-никелевых шлаков в процессе хранения // *Строительные материалы*. 2009. № 10. С. 42–44.

Экспериментальное моделирование процессов выветривания разновозрастных шлаков медно-никелевого производства / Д. С. Потапов [и др.] // *Минералогия техногенеза* — 2013: сборник докладов XIV научного семинара «Минералогия техногенеза», г. Миасс, 20–23 июня 2013 г. Миасс: ИМин УрО РАН, 2013. С. 38–49.

Электроплавка брикетированного сульфидного медно-никелевого сырья / А. А. Гальнбек [и др.]. СПб.: Изд. дом «Руда и металлы», 2002. 90 с.

Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulses / U. Andres [et al.] // *Powder Technology*. 2001. Vol. 114, Is. 1–3. P. 40–50. doi:10.1016/S0032-5910(00)00260-6.

Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag / P. Sarfo [et al.] // *Waste Management*. 2017. Vol. 70. P. 272–281. doi:10.1016/j.wasman.2017.09.024.

Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study / N. S. Katsiotis [et al.] // *Waste and Biomass Valorization*. 2015. Vol. 6, Is. 2. P. 177–189. doi:10.1007/s12649-015-9346-7.

References

Andres U., Timoshkin I., Jirestig J., Stallknecht H. Liberation of valuable inclusions in ores and slags by electrical pulses. *Powder Technology*, 2001, Vol. 114, Is. 1–3, pp. 40–50. doi:10.1016/S0032-5910(00)00260-6.

Domanskaya I. K., Tropnikov D. L. Perspektivy primeneniya mednykh shlakov v kachestve zapolniteley v sostave stroitel'nykh materialov [Prospects for the use of copper slags as aggregates in the composition of building materials]. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2014, No. 10, pp. 62–65. (In Russ.).

Gal'nbek A. A., Beloglazov I. N., Golubev V. O., Kalyukina E. V. *Elektroplavka briketirovannogo sul'fidnogo medno-nikelevogo syr'ya* [Electric smelting of briquetted copper-nickel sulphide feedstock]. Saint Petersburg, Publ. house “Ruda i metally”, 2002, 90 p. (In Russ.).

Gorbacheva T. T., Ivanova L. A., Makarov D. V. Shlaki kombinata “Pechenganikel” v reshenii ekologicheskikh zadach [Slags of “Pechenganickel” plant in solving environmental problems]. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN* [Proceedings of the Fersman scientific session of the GI of the KSC of the RAS], 2018, No. 15, pp. 425–428. (In Russ.).

Gorbacheva T. T., Ivanova L. A., Makarov D. V. Shlaki kombinata “Pechenganikel” dlya sozdaniya substratov-pochvozameniteley (rezul'taty opytov po sozdaniyu iskusstvennykh fitotsenozov) [Slags of “Pechenganickel” plant for creation of soil substitutes (results of experiments on creation of artificial phytocenoses)]. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN* [Proceedings of the Fersman scientific session of the GI of the KSC of the RAS], 2018, No. 15, pp. 429–432. (In Russ.).

Gurevich, B. I., Tyukavkina V. V. Shlakoportlandtsement na osnove shlakov kombinata “Pechenganikel” [Portland slag cement based on slag from “Pechenganickel” plant]. *Sever stroitel'nyy* [The construction North], 2007, No. 1, pp. 38–40. (In Russ.).

Katsiotis N. S., Tsakiridis P. E., Velissariou D., Katsiotis M. S., Alhassan S. M., Beazi M. Utilization of Ferronickel Slag as Additive in Portland Cement: A Hydration Leaching Study. *Waste and Biomass Valorization*, 2015, Vol. 6, Is. 2, pp. 177–189. doi:10.1007/s12649-015-9346-7.

Klimov A. A., Selivanov V. N. K voprosu ob udel'nykh energozatratakh na razrushenie materialov estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya elektrofizicheskimi metodami [To the question of specific energy consumption for the fracture of materials of natural and artificial origin by electrophysical methods] *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2023, Vol. 14, No. 6, pp. 84–92. (In Russ.). doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

Okorochkova E. A. Kompleksnaya pererabotka otval'nykh shlakov kombinata “Pechenganikel” [Complex processing of waste slag of the “Pechenganickel” plant]. *Sever stroitel'nyy* [The construction North], 2008, No. 1–2, pp. 12–13. (In Russ.).

Passport otraslevoy programmy “Primenenie vtorichnykh resursov i vtorichnogo syr'ya iz otkhodov v promyshlennom proizvodstve” [Passport of the industry program “The use of secondary resources and raw materials from waste in industrial production”]. (In Russ.). Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405781899/> (accessed 26.05.2025).

Potapov D. S., Svetlov A. V., Potapov S. S., Men'shikov Yu. P., Nesterov D. P., Makarov D. V. Eksperimental'noe modelirovanie protsessov vyvetrivaniya разновозрастных шлаков медно-никелевого производства [Experimental modeling of weathering processes of mixed-age copper-nickel slags]. *Mineralogiya tekhnogeneza—2013* [Mineralogy of technogenesis—2013]. Miass, IM UB RAS, 2013, pp. 38–49. (In Russ.).

Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Issledovanie gornykh porod s obogatitel'nykh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obraztse elektroimpul'snoy dezintegratsionnoy ustanovki [Research of rocks from mining plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric pulse disintegration installation]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of the RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3, pp. 97–110. (In Russ.). doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.

Sarfo P., Das A., Wyss G., Young C. Recovery of metal values from copper slag and reuse of residual secondary slag. *Waste Management*, 2017, Vol. 70, pp. 272–281. doi:10.1016/j.wasman.2017.09.024.

Shadrunova I. V., Ozhogina E. G., Kolodezhnaya E. V., Gorlova O. E. Otsenka selektivnosti dezintegratsii metallurgicheskikh shlakov [Evaluation of selectivity of metallurgical slag disintegration]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mineral mining], 2013, No. 5, pp. 180–190. (In Russ.).

Svetlov A. V., Potapov S. S., Potapov D. S., Kravchenko E. A., Erohin Yu. V., Potokin A. S., Selivanova E. A., Suvorova O. V., Kumarova V. A., Nesterov D. P., Makarov D. V., Masloboev V. A. Issledovanie vozmozhnosti izvlecheniya tsvetnykh metallov i proizvodstva stroitel'nykh materialov iz shlakov medno-nikelevogo proizvodstva [Investigation of possibility of recovery of nonferrous metals and producing building materials from copper-nickel smelterslag]. *Vestnik MGTU* [Bulletin of MSTU], 2015, Vol. 18, No. 2, pp. 335–344. (In Russ.).

Timoshchik O. A., Shchelokova E. A., Chernousenko E. V., Kasikov A. G. Kombinirovannyi sposob kompleksnoy pererabotki otval'nogo shlaka kombinata “Pechenganikel” [Combined method of complex processing of waste slag of the “Pechenganickel” plant]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Herald of the Kola Science Centre of the RAS], 2019, No. 4 (11), pp. 69–74. (In Russ.).

Tyukavkina V. V., Gurevich B. I. Otsenka stepeni izmenchivosti sostava i svoystv granulirovannykh medno-nikelevykh shlakov v protsesse khraneniya [Estimation of composition and properties variability of granulated copper-nickel slags in the storing process]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2009, No. 10, pp. 42–44. (In Russ.).

Информация об авторе

А. А. Климов — кандидат технических наук, младший научный сотрудник.

Information about the author

A. A. Klimov — PhD (Engineering), Research Assistant.

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 15.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 15.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАТИКА

Обзорная статья

УДК 004.89

doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.011

ТИПОЛОГИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ МНЕНИЙ И ИХ СПЕЦИФИКА В КОНТЕКСТЕ АНАЛИЗА СОЦИАЛЬНЫХ МЕДИА

**Марина Леонидовна Никонорова^{1✉}, Максим Геннадьевич Шишаев²,
Валерий Александрович Штангель³**

^{1, 2}*Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

³*Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия*

¹*m.nikonorova@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4358-2683>*

²*m.shishaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7070-7878>*

³*timetoframe@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4145-2826>*

Аннотация

В настоящее время наблюдается быстрый рост интереса к проблематике извлечения мнений и анализа тональности текстов на естественном языке, при этом существует большое разнообразие различных постановок соответствующих задач и неоднозначность используемой терминологии. Данная работа представляет собой обзор современного состояния области анализа мнений и тональности на основе публикаций в научной печати. Систематизируются основные виды задач анализа мнений, дается их единообразное формальное описание. Рассматриваются специфика решения задач анализа мнений в социальных медиа и основные группы методов, применяемых к анализу мнений. Результаты работы позволяют облегчить интерпретацию прикладных проблем интеллектуального анализа текстов на естественном языке, в частности контента социальных медиа, в задачи извлечения мнений и анализа тональности различных видов.

Ключевые слова:

извлечение мнений, анализ тональности, социальные медиа

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема научно-исследовательской работы «Методы и технологии создания интеллектуальных информационных систем для поддержки развития сложных динамических систем с региональной спецификой в условиях неопределенности и риска» (FMEZ-2025-0053).

Для цитирования:

Никонорова М. Л., Шишаев М. Г., Штангель В. А. Типология задач автоматизированного извлечения мнений и их специфика в контексте анализа социальных медиа // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 105–114. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.011.

INFORMATION TECHNOLOGY AND COMPUTER SCIENCE

Review article

TYPOLOGY OF AUTOMATED OPINION MINING PROBLEMS AND THEIR SPECIFICITY IN THE CONTEXT OF SOCIAL MEDIA ANALYSIS

Marina L. Nikonorova^{1✉}, Maxim G. Shishaev², Valerii A. Shtangel³

^{1, 2}*Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

³*Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia*

¹*m.nikonorova@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-4358-2683>*

²*m.shishaev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7070-7878>*

³*timetoframe@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-4145-2826>*

Abstract

Interest in opinion mining and sentiment analysis of natural language texts is rapidly growing, despite the wide variety of problem formulations and ambiguity in the terminology used. This paper provides a review of the current state of the field of opinion and sentiment analysis based on scientific publications. The main types of opinion mining problems are systematized and a uniform formal description is provided. The specifics of solving opinion mining problems in social media and the main groups of methods applied to opinion mining are discussed. The results of this paper facilitate the interpretation of applied problems of natural language text mining, particularly social media content, into various types of opinion mining and sentiment analysis problems.

Keywords:

opinion mining, sentiment analysis, social media

Acknowledgments:

The study was carried out within the framework of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic “Methods and technologies for creating intelligent information systems to support the development of complex dynamic systems with regional specifics in conditions of uncertainty and risk” (FMEZ-2025-0053).

For citation:

Nikonorova M. L., Shishaev M. G., Shtangel V. A. Typology of automated opinion mining problems and their specificity in the context of social media analysis // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 105–114. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.011.

Введение

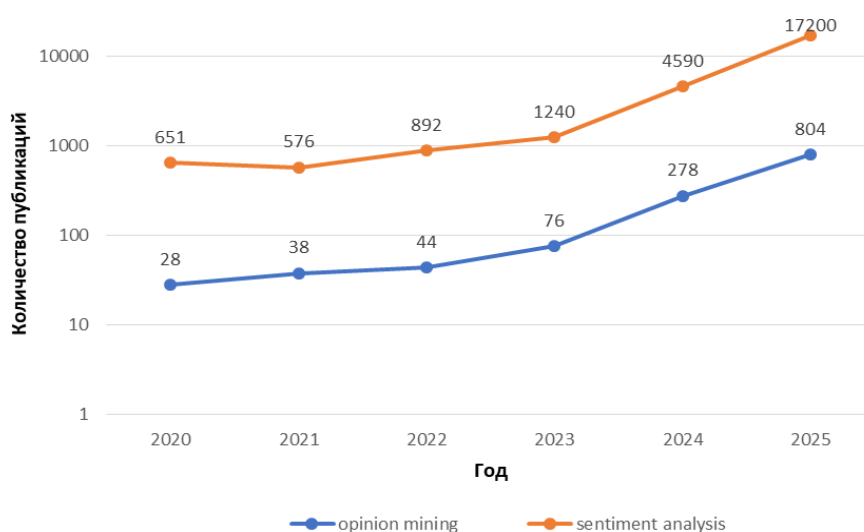
На сегодняшний день социальные медиа являются не просто средствами коммуникации, а глобальной площадкой формирования и столкновения мнений, эмоциональных реакций и распространения идей. Ежедневно пользователи генерируют миллионы текстовых, аудио- и визуальных высказываний, отражающих их отношение к событиям, продуктам, политическим решениям или социальным явлениям. Эти неструктурированные данные содержат важные индикаторы общественных настроений, существующих тенденций и возможных рисков. Однако их объем и сложность делают традиционный ручной анализ практически невыполнимым, создавая острую потребность в автоматизированных методах анализа онлайн-дискурса.

В этом контексте извлечение, или анализ мнений (opinion mining), является критически важной междисциплинарной задачей на стыке компьютерной лингвистики, машинного обучения и социологии. Ее основная цель не только классифицировать тексты на позитивные и негативные, но и осуществить глубокий, структурированный анализ субъективных высказываний с извлечением их основных компонентов: объекта оценки, оценки тональности (положительной, отрицательной или нейтральной), субъекта оценки и иногда времени. Такой подход позволяет перейти от поверхностного подсчета реакций (лайков и дизлайков) к пониманию структуры общественного мнения, а также динамики его распространения в социальных медиа.

Во многих исследованиях извлечение мнений отождествляется с задачей анализа тональности (sentiment analysis). Однако это не вполне корректно, поскольку, строго говоря, анализ тональности представляет собой задачу классификации, цель которой — определить полярность или эмоциональную окраску высказывания. При этом задача идентификации носителя (субъекта) и даже объекта высказывания ставится не всегда. Таким образом, ключевым отличием задачи извлечения мнений от анализа тональности является то, что в первом случае всегда подразумевается субъект, носитель мнения, тогда как постановки задач анализа тональности допускают обезличенные эмоциональные оценки в адрес некоторого (возможно, даже подразумеваемого) объекта. Исходя из этого, в рамках данной работы анализ тональности рассматривается как подзадача извлечения мнений, однако, следуя сложившейся практике, в некоторых случаях задачи анализа и извлечения мнений будут рассматриваться совместно.

Можно отметить, что интерес к проблематике анализа мнений/тональности в последние годы возрастает, о чем свидетельствует экспоненциальный рост количества научных публикаций по данной теме (рис.).

Широкое внедрение методов анализа мнений наблюдается в таких сферах деятельности, как бизнес и маркетинг, государство и общество, а также образование.



Количество работ, опубликованных по теме opinion mining и sentiment analysis в период 2020–2025 гг. (по данным scholar.google.ru)

Number of papers published on opinion mining and sentiment analysis in 2020–2025 (according to scholar.google.ru)

Наиболее развитыми сферами применения являются бизнес и маркетинг, использующие анализ мнений для анализа потребительских отзывов, мониторинга репутации бренда и исследования рынка. Так, в работе [Oksyuta, Yudin, 2025] анализировали эмоциональный тон русскоязычных отзывов о женской одежде и аксессуарах, используя классические алгоритмы машинного обучения (логистическая регрессия с TF-IDF). В рамках общественной и государственной сферы, как правило, осуществляется мониторинг общественно-политических настроений в социальных медиа и оценка эффективности государственных программ. Например, прикладное исследование [Najar, Mesfar, 2017] посвящено анализу мнений в политических новостных статьях на арабском языке с использованием лингвистической платформы NooJ. Наконец, в сфере образования анализ мнений применяется для обработки обратной связи от студентов, автоматизированной оценки образовательных платформ и выявления образовательных тенденций. Например, в исследовании [Irfan et al., 2025] анализировали мнения студентов об онлайн-обучении с применением методов машинного обучения — метод опорных векторов (SVM) и случайный лес.

Таким образом, цель данной обзорной статьи — исследовать различные классификации задач анализа мнений, а также ключевые методы и технологии их извлечения. Отдельное внимание будет уделено специфике задачи извлечения мнений в рамках социальных медиа. Основной вклад статьи заключается в систематизации различных задач анализа мнений и тональности, в их единообразном формальном описании, анализе особенностей их решения применительно к данным социальных медиа.

Виды задач анализа мнений

Постановки задач извлечения мнений (анализа тональности) весьма разнообразны и отличаются как рассматриваемыми объектами, так и используемыми модельными представлениями эмоциональных высказываний. Общей чертой описываемых далее задач является то, что так или иначе в тексте идентифицируются выражения эмоций, вне зависимости от того, анализируются ли носители этих эмоций, объекты эмоциональных оценок или иные компоненты используемых моделей.

В данной работе будут рассмотрены следующие классификации задач анализа мнений: 1) в зависимости от уровня лексической единицы; 2) задачи, связанные с идентификацией и классификацией эмоциональных высказываний; 3) задачи, связанные с обработкой естественного языка (NLP).

В зависимости от уровня лексической единицы выделяют задачи анализа мнений на уровне документа и на уровне предложения. Первая заключается в присвоении единой оценки (позитивной, негативной или нейтральной) всему текстовому документу, такому как отзыв пользователя, пост в блоге или новостная статья. Подход исходит из допущения о смысловой однородности документа, которое выполняется далеко не всегда. Например, в исследовании [Behdenna et al., 2016] выполнен сравнительный анализ эффективности классических алгоритмов машинного обучения, таких как Naïve Bayes, SVM и деревья решений, для решения задачи классификации полярности на уровне документов. При этом авторы пришли к выводу о необходимости перехода к анализу на уровне предложения, поскольку документ может содержать разнонаправленные эмоциональные высказывания, и с ростом его объема предположение о смысловой цельности становится менее состоятельным.

При анализе на уровне предложения фокус смещается на отдельные высказывания в рамках документа. Цель — классифицировать тональность или субъективность каждого предложения, что позволяет отделить фактические утверждения от оценочных суждений. Например, в [Sarkar, 2025] проведено сравнительное исследование NLP-техник для анализа тональности: от подходов на основе правил и классического машинного обучения (Naïve Bayes, SVM) до методов глубокого обучения (LSTM, CNN) и архитектур Transformer (BERT, RoBERTa). Отмечается, что выбор оптимального метода зависит от конкретной прикладной задачи интеллектуального анализа текста, доступных ресурсов и требований к интерпретируемости результатов.

Среди задач, связанных с идентификацией и классификацией эмоциональных высказываний, выделяют, в первую очередь, базовую задачу определения (классификации) тональности, которую можно представить следующей функцией:

$$f_{SA}(T) \rightarrow s,$$

где T — фрагмент текста (документ, предложение); $s \in \{pos, neg, neu\}$ — тональность. В данном случае T , по существу, является объектом, в отношении которого необходимо определить тональность, при этом у последней может дополнительно определяться сила или степень интенсивности. Примером работы, рассматривающей задачу определения тональности, является [Wang et al., 2020], где авторы предложили модель OL-DAWE для анализа полярности твитов, которая использует аугментацию данных путем замены слов на антонимы, упрощает эмодзи до маркеров эмоций и реализует тщательную обработку отрицаний.

Определение интенсивности (sentiment intensity) [Tian et al., 2018] представляет собой вспомогательную задачу по отношению к анализу тональности, и, как правило, эти задачи решаются в комплексе:

$$f_{SI}(T) \rightarrow (s, int),$$

где $int \in R$ (например, от -1 до +1) или $int \in \{weak, medium, strong\}$ — интенсивность тональности s . Например, в предложении «У этого телефона батарея слабовата, но камера крутая.» интенсивность тональности в отношении слова «крутая» будет $(pos, strong)$, т. е. очень позитивная.

Задача анализа эмоций переходит от бинарной тональности к классификации текстового фрагмента по категориям базовых эмоций (радость, гнев, печаль и др.). Цель — идентифицировать конкретную эмоцию, выражаемую автором:

$$f_{EA}(T, H) \rightarrow e,$$

где H — источник или субъект; $e \in \{joy, anger, sadness, fear, \dots\}$ — эмоция. Например, в [Amangeldi et al., 2024] проанализировали посты об экологии в социальных медиа, используя меру ассоциативности PMI (pointwise mutual information) для выявления настроений и эмоций.

Схожей с формальной точки зрения задачей является анализ намерений (intent analysis) [Joke, 2025], она также является подразделом NLP, фокусирующимся на выявлении скрытой цели высказывания автора. В отличие от анализа эмоций, который нацелен скорее на определение внутреннего состояния субъекта, анализ намерений стремится определить его коммуникативное действие, например жалобу,

вопрос, предложение или выражение удовлетворения. Однако эти задачи тесно связаны. Эмоция (например, гнев) часто коррелирует с определенным намерением (жалоба или угроза), но они не являются синонимами: можно жаловаться спокойно (без эмоции гнева) и можно испытывать гнев, не формулируя никакого коммуникативного намерения. Поэтому в комплексных системах (чаты поддержки, диалоговые агенты) важно решать обе задачи параллельно.

Цель классической задачи анализа мнений [Ujah-Ogbuagu et al., 2025] не просто классифицировать, а выявить, декомпозировать и связать в единую структуру ключевые компоненты субъективного высказывания. Формально ее можно представить следующим образом:

$$f_{OM}(T) \rightarrow \{(H_i, E_j, O_{ij}, s_{ij})\},$$

где E_j — объект/сущность мнения; O_{ij} — фрагмент текста, выражающий мнение; s_{ij} — тональность. При необходимости сущность может быть заменена на конкретный ее аспект. В случае примера, приведенного в задаче определения интенсивности, например, может извлекаться мнение только относительно камеры, а не всего телефона. Решению задачи анализа мнений различными методами и технологиями посвящено множество работ, некоторые из них будут рассмотрены в разделе методов анализа мнений.

В свою очередь, аспектное извлечение мнений (aspect-based sentiment analysis, ABSA) представляет собой отдельную узкую задачу, которая фокусируется на связывании аспектов мнения с тональностью, и состоит из двух подзадач:

- 1) извлечение аспектов — $f_A(T) \rightarrow \{A_1, \dots, A_m\}$;
- 2) определение тональности аспектов — $f_{AC}(T, \{A_1, \dots, A_m\}) \rightarrow \{(A_i, s_i)\}$.

Стоит отметить, что на практике обе задачи иногда выполняются совместно, поскольку одна задача может предоставить информацию для другой, и наоборот. В результате аспектного анализа мнений можно получить более точную оценку мнения в целом, что особенно полезно для такой области, как бизнес и маркетинг. Например, в работе [Perikos, Hatzilygeroudis, 2017] применили ансамбль классификаторов для повышения точности ABSA в контенте социальных сетей. Методология включает двухэтапный процесс (извлечение аспектов и определение полярности) с использованием алгоритмов Naive Bayes, максимальной энтропии и SVM.

Анализ сравнительных мнений (comparative opinion mining) направлен на обнаружение в тексте конструкций, сравнивающих два или более объекта. В первую очередь выявляются сравнительные предложения, из которых впоследствии извлекаются объекты, иногда их аспекты и сравнительные мнения. Формально определяется следующим образом:

$$f_{COM}(T) \rightarrow \{(E_1, E_2, A_i, com, d)\},$$

где com — отношение сравнения; d — степень сравнения. В обзорной работе [Varathan et al., 2017] подробно рассмотрены методы анализа сравнительных мнений в целом и методы извлечения элементов данных мнений. Авторы отметили доминирование подходов, основанных на NLP, и недостаток публичных датасетов для проведения экспериментов.

К задачам анализа мнений, связанным с обработкой естественного языка, относят анализ субъективности, обнаружение сарказма и иронии, а также извлечение и разрешение сущностей.

Анализ субъективности представляет собой фундаментальную задачу отделения субъективных предложений, содержащих мнения или эмоции, от объективных, утверждений-фактов. В систематическом обзоре [Basiron, Kasmuri, 2017] показано преимущество методов машинного обучения перед лексическими подходами при решении данной задачи. Авторы также выделили ограничения, связанные с доменной зависимостью и дефицитом размеченных данных, и указали на пробелы в обработке семантических нюансов, таких как сарказм.

Сложность задачи обнаружения сарказма обусловлена тем, что буквальное значение саркастического высказывания противоположно его истинному смыслу, что дезориентирует стандартные методы анализа тональности. Например, в [Bouazizi, Ohtsuki, 2015] предложен метод повышения точности анализа тональности в Twitter за счет автоматического обнаружения сарказма.

Авторы использовали минимальный набор текстовых и нетекстовых признаков для классификации твитов по полярности (позитив/негатив), а затем применили специализированный классификатор сарказма, основанный на четырех группах признаков (связанных с тональностью, пунктуацией, синтаксисом и паттернами). Интеграция выявленных саркастических признаков в модель тональности позволила существенно повысить ее точность, в особенности полноту выявления негативных твитов, замаскированных под позитивные высказывания.

Последняя задача заключается в корректной идентификации и извлечении (named entity recognition), а также в связывании упоминаний объектов (entity linking), о которых высказывается мнение. Например, в [Bhamare, Prabhu, 2021] для извлечения аспектов мнения предложен гибридный набор признаков, объединяющий синтаксические зависимости между словами и их леммы, что позволяет более точно идентифицировать целевые аспекты оцениваемых объектов в тексте. На стандартных датасетах подход продемонстрировал улучшение качества извлечения аспектов по сравнению с традиционными методами, использующими только частотные или поверхностные синтаксические характеристики.

Особенности задачи анализа мнений в социальных медиа

Социальные медиа представляют собой уникальную и сложную среду для анализа мнений, значительно отличающуюся от традиционных источников, таких как новостные статьи, рецензии или публицистические тексты. Их ключевые особенности как объекта исследования создают как новые возможности, так и значительные методологические трудности для построения систем, ориентированных на анализ мнений.

К основным особенностям социальных медиа можно отнести:

1) динамичность и высокую скорость обновления: мнения формируются, распространяются и эволюционируют в режиме, близком к реальному времени, что требует от систем мониторинга потоковой обработки и адаптивности;

2) неформальность языка: преобладание сленга, нестандартной, в том числе намеренно ошибочной, орфографии и пунктуации, а также использование региональных диалектов;

3) мультимодальность: мнение выражается не только через текст, но и через изображения, видео, эмодзи (стикеры), которые несут значительную смысловую и эмоциональную нагрузку;

4) явную сетевую структуру: мнения существуют не изолированно, а в контексте социального графа (комментарии, репосты, подписчики, друзья), что напрямую влияет на их распространение и силу влияния;

5) кратковременность и контекстуальная зависимость: мнение зачастую привязано к кратковременному тренду, хештегу или локальному событию, вне контекста которого оно теряет смысл.

В контексте данных особенностей анализ мнений часто сопряжен с рядом трудностей, многие из которых остаются нерешенными современными NLP-системами. Например, Н. В. Лукашевич [Лукашевич, 2022] выделяет следующие группы факторов, усложняющих обработку естественного языка: лексические, контекстные и связанные с выражением иронии или сарказма. К лексическим факторам относятся многозначность оценочной лексики (изменчивость тональности слова в зависимости от его значения) и изменчивость тональности слова (но не значения) в зависимости от предметной области. К последнему также относят так называемые имплицитные мнения, при которых оценка часто не выражается прямыми оценочными словами, а следует из описания некоторых фактов. Контекстные факторы, в свою очередь, связаны с изменением тональности оценочной лексики в зависимости от контекста ее употребления. Например, при ее использовании в качестве названий или устойчивых выражений, с добавлением слов модификаторов («очень», «менее» и др.) или в нереальном контексте, несоответствующем действительности. Наконец, употребление иронии или сарказма зачастую может скрывать негативную оценку, что сильно усложняет анализ мнений.

Помимо прочего, к лексическим трудностям следует отнести использование неформального языка, а именно опечатки, намеренные искажения слов («крутооо», «вааау»), отсутствие заглавных букв и пунктуации, из-за чего применение классических токенизаторов и синтаксических парсеров

становится мало эффективным. Кроме того, лексикон социальных сетей обновляется быстрее, чем успевают создаваться и обучаться лингвистические ресурсы и модели.

Исходя из имеющегося практического опыта извлечения знаний из социальных медиа, в частности из «ВКонтакте» [Пимешков и др., 2024, Pimeshkov et al., 2025], существует также ряд структурных ограничений, которые могут затруднять процесс извлечения мнений. Например, публикации и комментарии, как правило, ограничены по длине, из-за чего могут содержать меньше оценочной лексики. Наряду с этим также возникает проблема кореференции — местоимения в коротких постах или ветках комментариев часто отсылают к объектам, упомянутым несколькими сообщениями выше, что требует использование моделей, способных решать такую задачу.

Необходимо дополнительно фильтровать контент социальных сетей, поскольку для них характерно наличие спама, рекламы, ботов, оффтоп-обсуждений (отклоняющихся от целевой темы), которые не содержат каких-либо выражений мнений. В дополнение к этому фейковые дезинформирующие публикации в том числе порождают «искусственные» мнения, которые также целесообразно выявлять в рамках анализа.

С другой стороны, текстовый контент социальных медиа всегда снабжен некоторой метаинформацией, анализ которой может облегчить решение задач извлечения различных атрибутов тонального высказывания. В частности, все сообщения в социальных медиа имеют связанный идентификатор авторства, временные метки и другие атрибуты. Кроме того, сообщения, как правило, являются компонентами ветки обсуждения, что позволяет определить некоторые свойства «транзитивно». Эти особенности расширяют проблематику семантического анализа контента социальных медиа за пределы классических задач NLP.

Таким образом, извлечение мнений из социальных медиа является довольно трудоемкой задачей. Успешное ее решение требует создания гибридных систем, которые комбинируют устойчивые NLP-модели, анализ сетевой структуры и мультимодальную архитектуру.

Методы анализа мнений

Традиционно методы анализа мнений можно разделить на 4 основные группы: методы на основе правил и словарей; машинное обучение; глубокое обучение; гибридные методы.

Первые наиболее распространенные методы извлечения мнений основывались на прямом применении лингвистических правил и знаний. В основе лежат словари оценочной лексики (например, SentiWordNet, AFINN), где словам присвоены заранее известные полярность и ее сила. Алгоритмы анализируют текст, ищут слова из словаря и применяют к ним набор лингвистических правил. Например, в работе [Ahmed, Danti, 2016] предложен подход, позволяющий оценить тональность семью категориями (strong-positive, positive, weak-positive, neutral, weak-negative, negative и strong-negative) с использованием правил и SentiWordNet. Он продемонстрировал высокую точность при определении тональности онлайн-обзоров книг и политических текстов.

С распространением доступных размеченных корпусов (например, отзывов с рейтингами) доминирующей парадигмой стало классическое машинное обучение. Задача формулируется как классификация (позитив/негатив/нейтрал) или регрессия (предсказание рейтинга). Текст представляется в виде вектора признаков (feature vector) с помощью мешка слов, статистических мер (TF-IDF) и др., на которых затем обучаются классические модели: Naïve Bayes, SVM, логистическая регрессия, деревья решений. Например, в работе [Dulhare, Arif, 2017] сравнивалась эффективность двух классификаторов — Naïve Bayes и максимальной энтропии — для анализа мнений в Twitter.

Благодаря глубокому обучению модели стали самостоятельно извлекать иерархические и семантически важные представления текста. Вместо ручного конструирования признаков используются нейронные архитектуры (CNN, RNN, LSTM, Transformer), которые учатся распределенным векторным представлениям (эмбедингам) слов и предложений. В работе [Yibeyin et al., 2024] оценили эффективность данных архитектур для анализа общественного мнения на малоресурсном амхарском языке. Гибридная модель CNN-BiLSTM показала наилучшие результаты, превзойдя RNN благодаря своей способности извлекать как прямую, так и обратную контекстную информацию из текста, а также возможностям CNN по извлечению признаков.

Современной практикой является объединение сильных сторон предыдущих методов для преодоления их индивидуальных ограничений. При таком подходе создаются архитектуры, комбинирующие знания (словари, правила, онтологии) и возможности машинного и глубокого обучения. Примером разработки гибридных методов является работа [Ondara et al., 2023], где для анализа сравнительных мнений авторы предложили четыре комбинации методов, объединяющих многослойный перцептрон (MLP) со случайным лесом, SVM, деревьями решений и стохастическим градиентным спуском. Наилучший результат показала комбинация MLP и случайного леса, достигнув средней точности и F1-score 93 % на трех датасетах сравнительных отзывов.

Эволюция методов извлечения мнений демонстрирует путь от экспертных знаний к глубокому статистическому анализу и далее — к сложным гибридным системам, стремящимся объединить достоинства обоих подходов. В частности, для анализа мнений в социальных медиа, где языковые особенности и контекст играют ключевую роль, наиболее эффективными оказываются предобученные Transformer-модели, дообучаемые на доменных данных и обогащаемые внешними знаниями и правилами.

Заключение

Настоящий обзор показывает, что анализ мнений и тональности превратился из узкой исследовательской задачи в междисциплинарную область, обладающую высокой практической ценностью. Широкое внедрение в такие сферы, как маркетинговые и бизнес-исследования, мониторинг общественно-политических настроений, а также образование, подтверждает ее актуальность.

Эволюция задач анализа мнений демонстрирует переход от простой классификации полярности к более сложным постановкам: аспектно-ориентированному анализу, распознаванию эмоций, интенсивности, намерений и сравнительных конструкций. Такое изменение отражает не только прогресс алгоритмов, но и высокий уровень требований к системам — от поверхностной оценки «хорошо/плохо» к глубокому, структурированному пониманию субъективных высказываний.

Особую методологическую сложность представляет анализ мнений в социальных медиа. Краткость сообщений, неформальная и динамичная лексика, мультимодальность и сетевая структура коммуникации делают невозможным прямое использование подходов, разработанных для формальных текстов. Ключевыми вызовами остаются извлечение имплицитных высказываний, а также выявление иронии и сарказма.

Совершенствование методов анализа тональности демонстрирует переход от основанных на словарях и правилах подходов к более сложным моделям машинного обучения и, далее, к широкому внедрению глубоких нейросетевых архитектур. На сегодняшний день наилучшие результаты демонстрируют предобученные Transformer-модели, однако их низкая интерпретируемость, ресурсоемкость и чувствительность к данным способствуют развитию гибридных подходов. Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с созданием мультимодальных архитектур, а также с разработкой методов быстрой адаптации к новым доменным знаниям (посредством использования *few-shot* и *zero-shot learning*), что позволит перейти от простого определения тональности к пониманию сложной структуры онлайн-коммуникации.

Список источников

Лукашевич Н. В. Автоматический анализ тональности текстов: проблемы и методы // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2022. Т. 26, №1. С. 50–61.

Пимешков В. К., Никонорова М. Л., Шишаев М. Г. Комбинированный метод извлечения терминов для задачи мониторинга тематических обсуждений в социальных медиа // Информатика и автоматизация. 2024. Т. 23, № 4. С. 1110–1138.

Ahmed S., Danti A. Effective Sentimental Analysis and Opinion Mining of Web Reviews Using Rule Based Classifiers // Computational Intelligence in Data Mining—Volume 1 / ed. by H. S. Behera, D. P. Mohapatra. New Delhi: Springer India, 2016. P. 171–179.

Amangeldi D., Usmanova A., Shamoï P. Understanding Environmental Posts: Sentiment and Emotion Analysis of Social Media Data // IEEE Access. 2024. Vol. 12. P. 33504–33523.

Basiron H., Kasmuri E. Subjectivity analysis in opinion mining — A systematic literature review // International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications. 2017. Vol. 9, № 3. P. 132–159.

Behdenna S., Barigou F., Belalem G. Sentiment analysis at document level // International Conference on Smart Trends for Information Technology and Computer Communications (SMARTCom 2016). 2016. P. 682–689.

- Bhamare B. R., Prabhu J.* A supervised scheme for aspect extraction in sentiment analysis using the hybrid feature set of word dependency relations and lemmas // *PeerJ Computer Science*. 2021. Vol. 7. Art. e347.
- Bouazizi M., Ohtsuki T.* Opinion Mining in Twitter How to Make Use of Sarcasm to Enhance Sentiment Analysis // *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2015*. Paris: ACM, 2015. P. 1594–1597.
- Dulhare U., Arif F.* A Machine Learning Based Approach for Opinion Mining on Social Network Data // *Computer Communication, Networking and Internet Security*. Springer Singapore. 2017. P. 135–148.
- Hybrid Machine Learning Techniques for Comparative Opinion Mining / B. O. Ondara [et al.] // Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining*. 2023. Vol. 6, № 2. P. 131–143.
- Joke N.* Intent Analysis On Reviews: Unveiling Consumer Sentiment, Behavior Patterns, and Market Insights // *SSRN Electronic Journal*. 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5338834.
- Najar D., Mesfar S.* Opinion mining and sentiment analysis for Arabic on-line texts: application on the political domain // *International Journal of Speech Technology*. 2017. Vol. 20, № 3. P. 575–585.
- Oksyuta O. V., Yudin A. V.* Using machine learning to analyze the emotional tone of Russian-language product reviews // *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Challenging Issues in Systems Modeling and Processes”*. FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, 2025. P. 385–391.
- Opinion mining of student regarding educational system using online platform / M. Irfan [et al.] // Conclusions in Medicine*. 2025. Vol. 3, iss. 2. P. 112–125.
- Perikos I., Hatzilygeroudis I.* Aspect based sentiment analysis in social media with classifier ensembles // *2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. 2017. P. 273–278.
- Pimeshkov V., Nikonorova M., Shishaev M.* Technology for Forming a Multilayer Knowledge Graph to Determine the Relevance of Documents // *Digital and Information Technologies in Economics and Management / Gibadullin A.* Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. Vol. 1422. P. 134–152.
- Public opinion mining in social media about Ethiopian broadcasts using deep learning / M. Yibeyin [et al.] // Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 27676.
- Sarkar S.* A Comparative Study of Different Natural Language Processing Techniques for Sentiment Analysis and Opinion Mining // *Iconic Research and Engineering Journals*. 2025. Vol. 8, iss. 12. P. 1695–1708.
- Taxonomy of Opinion Mining, Approaches and Domain Applications: Future Research Direction / B. C. Ujah-Ogbuagu [et al.] // SN Comput. Sci*. 2025. Vol. 6, № 6. P. 653.
- The OL-DAWE model: tweet polarity sentiment analysis with data augmentation / W. Wang [et al.] // Proceedings of the 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering*. 2020. Vol. 8. P. 40118–40128.
- Tian L., Lai C., Moore J. D.* Polarity and Intensity: The Two Aspects of Sentiment Analysis: arXiv:1807.01466.arXiv, 2018.
- Varathan K. D., Giachanou A., Crestani F.* Comparative opinion mining: A review // *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2017. Vol. 68, № 4. P. 811–829.

References

- Ahmed S., Danti A.* Effective Sentimental Analysis and Opinion Mining of Web Reviews Using Rule Based Classifiers. *Computational Intelligence in Data Mining—Volume 1*. H. S. Behera, D. P. Mohapatra. New Delhi, Springer India, 2016, pp. 171–179.
- Amangeldi D., Usmanova A., Shamoï P.* Understanding Environmental Posts: Sentiment and Emotion Analysis of Social Media Data. *IEEE Access*, 2024, Vol. 12, pp. 33504–33523.
- Basiron H., Kasmuri E.* Subjectivity analysis in opinion mining—A systematic literature review. *International Journal of Advances in Soft Computing and Its Applications*, 2017, Vol. 9, No. 3, pp. 132–159.
- Behdenna S., Barigou F., Belalem G.* Sentiment analysis at document level. *International Conference on Smart Trends for Information Technology and Computer Communications (SMARTCom 2016)*, 2016, pp. 682–689.
- Bhamare B. R., Prabhu J.* A supervised scheme for aspect extraction in sentiment analysis using the hybrid feature set of word dependency relations and lemmas. *PeerJ Computer Science*, 2021, Vol. 7, Art. e347.
- Bouazizi M., Ohtsuki T.* Opinion Mining in Twitter How to Make Use of Sarcasm to Enhance Sentiment Analysis. *Proceedings of the 2015 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining 2015*. Paris, ACM, 2015, pp. 1594–1597.
- Dulhare U., Arif F.* A Machine Learning Based Approach for Opinion Mining on Social Network Data. *Computer Communication, Networking and Internet Security*. Springer Singapore, 2017, pp. 135–148.

Irfan M., Khan A., Usman M., Haider M.W. Opinion mining of student regarding educational system using online platform. *Conclusions in Medicine*. 2025, Vol. 3, iss. 2, pp. 112–125.

Joke N. Intent Analysis On Reviews: Unveiling Consumer Sentiment, Behavior Patterns, and Market Insights. *SSRN Electronic Journal*, 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5338834.

Lukashevich N. V. Avtomaticheskij analiz tonal'nosti tekstov: problemy i metody [Automatic Sentiment Analysis of Texts: Problems and Methods]. *Intellektual'nye sistemy. Teoriya i prilozheniya* [Intelligent Systems. Theory and Applications], 2022, Vol. 26, No. 1, pp. 50–61. (In Russ.).

Najar D., Mesfar S. Opinion mining and sentiment analysis for Arabic on-line texts: application on the political domain. *International Journal of Speech Technology*, 2017, Vol. 20, No. 3, pp. 575–585.

Oksyuta O. V., Yudin A. V. Using machine learning to analyze the emotional tone of Russian-language product reviews. *Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Challenging Issues in Systems Modeling and Processes"*. FSBE Institution of Higher Education Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov, 2025, pp. 385–391.

Ondara B. O., Waitthaka S., Kandiri J., Muchemi L. Hybrid Machine Learning Techniques for Comparative Opinion Mining. *Indonesian Journal of Artificial Intelligence and Data Mining*, 2023, Vol. 6, No. 2, pp. 131–143.

Perikos I., Hatzilygeroudis I. Aspect based sentiment analysis in social media with classifier ensembles. *2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*, 2017, pp. 273–278.

Pimeshkov V., Nikonorova M., Shishaev M. Technology for Forming a Multilayer Knowledge Graph to Determine the Relevance of Documents. *Digital and Information Technologies in Economics and Management*. Gibadullin A. Cham, Springer Nature Switzerland, 2025, Vol. 1422, pp. 134–152.

Pimeshkov V. K., Nikonorova M. L., Shishaev M. G. Kombinirovannyj metod izvlecheniya terminov dlya zadachi monitoringa tematicheskikh obsuzhdenij v social'nyh media [A combined term extraction method for the problem of monitoring thematic discussions in social media]. *Informatika i Avtomatizaciya* [Informatics and Automation], 2024, Vol. 23, No. 4, pp. 1110–1138. (In Russ.).

Sarkar S. A Comparative Study of Different Natural Language Processing Techniques for Sentiment Analysis and Opinion Mining. *Iconic Research and Engineering Journals*, 2025, Vol. 8, iss. 12, pp. 1695–1708.

Tian L., Lai C., Moore J. D. Polarity and Intensity: The Two Aspects of Sentiment Analysis: arXiv:1807.01466. arXiv, 2018.

Ujah-Ogbuagu B. C., Ameen A. O., Ogwueleka F., Ogbuokiri B. Taxonomy of Opinion Mining, Approaches and Domain Applications: Future Research Direction. *SN Comput. Sci.*, 2025, Vol. 6, No. 6, p. 653.

Varathan K. D., Giachanou A., Crestani F. Comparative opinion mining: A review. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2017, Vol. 68, No. 4, pp. 811–829.

Wang W., Chen D., Liu H., Li Y. The OL-DAWE model: tweet polarity sentiment analysis with data augmentation. *Proceedings of the 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering*, 2020, Vol. 8, pp. 40118–40128.

Yibeyin M., Tehone Y., Liyih A., Fentie M. Public opinion mining in social media about Ethiopian broadcasts using deep learning. *Scientific Reports*, 2024, Vol. 14, Art. 27676.

Информация об авторах

М. Л. Никонова — инженер-исследователь;

М. Г. Шишаев — доктор технических наук, главный научный сотрудник;

В. А. Штангель — студент.

Information about the authors

M. L. Nikonorova — Research Engineer;

M. G. Shishaev — Doctor of Science (Tech.), Chief Research Fellow;

V. A. Shtangel — student.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

Научная статья
УДК 004.89
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.012

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ГИПЕРТЕКСТОВАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ УНАСЛЕДОВАННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СТАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕПОЗИТОРИЕВ ПРОГРАММНОГО КОДА И ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

**Андрей Михайлович Федоров¹, Игорь Олегович Датъев²,
Михаил Олегович Илясов³, Иван Геннадьевич Вишняков⁴**

^{1–4}*Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*a.fedorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2862-7994>*

²*i.datyev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8372-8704>*

³*m.ilyasov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9065-2396>*

⁴*i.vishnyakov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4938-5693>*

Аннотация

Автоматизация процессов разработки и сопровождения программного обеспечения является ключевым фактором повышения эффективности и скорости создания информационных систем. В условиях роста сложности проектов и требований к качеству документации особую актуальность приобретают инструменты, позволяющие автоматизировать анализ исходного кода и генерацию структурированных описаний. В статье представлено решение для автоматизированного документирования унаследованного кода, основанное на интеграции систем управления версиями и большой языковой модели. Разработанный конвейер производит последовательную обработку исходных модулей, извлекает метаданные программных сущностей (классов, методов, свойств), генерирует описания с помощью языковой модели при их отсутствии и автоматически публикует результат в формате вики-документации в среде коллективной разработки. Предложенный подход позволяет сократить трудозатраты на создание и поддержку документации, обеспечивает ее постоянную синхронизацию с кодом и способствует повышению качества проектной документации за счет интеллектуального дополнения. Решение предназначено для проектов на различных языках программирования, где необходимо автоматическое документирование унаследованного кода, интеграция описаний в системы коллективной разработки и обеспечение доступности документации через веб-интерфейс.

Ключевые слова:

автоматизация документирования, искусственный интеллект, большая языковая модель, генерирование описаний, статический анализ кода, поддержка унаследованных систем

Благодарности:

исследование выполнено в рамках государственного задания Института информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Кольского научного центра Российской академии наук от Министерства науки и высшего образования РФ, тема научно-исследовательской работы: «Методы и технологии создания интеллектуальных информационных систем для поддержки развития сложных динамических систем с региональной спецификой в условиях неопределенности и риска» (шифр темы FMEZ-2025-0053).

Для цитирования:

Автоматизированная гипертекстовая документация унаследованных систем на основе статического анализа репозитория программно кода и генеративного искусственного интеллекта / А. М. Федоров [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 115–128. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.012.

Original article

AUTOMATED HYPERTEXT DOCUMENTATION OF LEGACY SYSTEMS BASED ON STATIC ANALYSIS OF PROGRAM CODE REPOSITORIES AND GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Andrey M. Fedorov¹, Igor O. Datyev², Mikhail O. Ilyasov³, Ivan G. Vishnyakov⁴

^{1–4}*Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*a.fedorov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2862-7994>*

²*i.datyev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8372-8704>*

³*m.ilyasov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0006-9065-2396>*

⁴*i.vishnyakov@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4938-5693>*

Abstract

Automating software development and maintenance processes is a key factor in increasing the efficiency and speed of information system creation. As projects become increasingly complex and documentation quality requirements increase, tools that automate source code analysis and the generation of structured descriptions are becoming increasingly important. This article presents a solution for automated documentation of legacy code based on the integration of version control systems and a large language model. The developed pipeline sequentially processes source modules, extracts metadata for software entities (classes, methods, properties), generates descriptions using large language model when they are missing, and automatically publishes the results as wiki documentation in a collaborative development environment. The proposed approach reduces the labor costs of creating and maintaining documentation, ensures its constant synchronization with the code, and improves the quality of project documentation through artificial intelligent descriptions. The solution is designed for projects in various programming languages that require automatic documentation of legacy code, integration of descriptions into collaborative development systems, and accessibility of documentation via a web interface.

Keywords:

documentation automation, artificial intelligence, large language model, description generation, static program analysis, legacy project support

Acknowledgments:

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, research topic: "Methods and technologies for creating intelligent information systems to support the development of complex dynamic systems with regional specificity in conditions of uncertainty and risk" (topic code FMEZ-2025-0053).

For citation:

Automated hypertext documentation of legacy systems based on static analysis of program code repositories and generative artificial intelligence / A. M. Fedorov [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 115–128. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.012.

Введение

Прогресс в сфере информационных технологий во многом основан на автоматизации различных процессов, ключевыми из которых являются разработка и поддержка информационных систем. С появлением больших языковых моделей подходы к этим процессам претерпели существенные изменения. Устаревание существующих информационных систем происходит тем быстрее, чем быстрее развиваются информационные технологии. Современные информационные системы необходимо поддерживать и развивать. Значительная часть используемых сегодня систем строится на комбинации уже функционирующих (унаследованных, устаревших) и новых модулей. Зачастую унаследованные программные модули не имеют должным образом оформленной документации, что приводит к сложностям поддержки и развития всей системы. Извлечение и обогащение данных на естественном языке из унаследованных систем приобрели еще большую актуальность в процессе научно-исследовательской работы коллектива авторов по теме «Методы и технологии создания интеллектуальных информационных систем для поддержки развития сложных динамических систем с региональной спецификой в условиях неопределенности и риска» [Информационная...]. В частности, развиваемое направление интеллектуализированного фокусированного сбора данных [Датьев и др., 2024; Федоров и др., 2025] потребовало углубленной концептуальной и практической проработки вопросов, вынесенных в заголовок настоящей статьи.

В данной работе решается задача разработки технологии автоматизированного анализа и документирования унаследованной кодовой базы с использованием элементов искусственного интеллекта для облегчения ее сопровождения и модернизации. Подход ориентирован на работу с любыми проектами, обладающими структурированным синтаксисом и поддерживаемыми инструментами автоматизированной документации.

Формально задача поставлена следующим образом: дана унаследованная кодовая база, представленная набором исходных файлов, часто с недостаточной или устаревшей документацией. Необходимо разработать метод и инструмент для автоматического преобразования данной кодовой базы в структурированную и связанную документацию в формате, пригодном для коллективного использования разработчиками (вики-система на базе Git).

В качестве интеллектуального компонента используются большие языковые модели, технические характеристики которых позволяют им анализировать исходный код, и на его основе генерировать краткие содержательные описания программных сущностей (модулей, классов, методов) на естественном языке.

Автоматизация документирования унаследованных систем

Проблема документирования унаследованного кода является одной из наиболее актуальных в инженерии программного обеспечения. Сопровождение таких систем часто затруднено из-за устаревших, неполных или отсутствующих описаний, что ведет к увеличению временных затрат и риску внесения ошибок [Aghajani et al., 2019]. Автоматизация процесса создания документации рассматривается как ключевое направление для снижения этих издержек.

Традиционно для извлечения структуры исходного кода и генерирования документации используются инструменты статического анализа. Например, для экосистемы Delphi и Object Pascal одним из немногих специализированных решений является PasDoc. Этот инструмент анализирует исходные файлы, комментарии в специальном формате и создает документацию в различных форматах (HTML, LaTeX, SimpleXML) [PasDoc: Documentation...]. PasDoc служит основой для многих проектов по документированию, однако его возможности ограничены присутствующими в коде комментариями, и он не предназначен для семантического анализа или генерирования описаний на естественном языке. Среди альтернативных систем, используемых в других экосистемах, можно выделить Doxygen (для C++, Java и других языков), Javadoc (для Java) и Sphinx (для Python), которые также используют комментарии, встроенные в код [van Deursen, van Vliet, 2000].

В последние годы появились исследования и инструменты, которые интегрируют ИИ-компоненты в процесс документирования. Например, проект "CodeT5" [Wang et al., 2021] и "Codex" [Chen et al., 2021] демонстрируют возможности языковых моделей для генерирования комментариев к коду, но они фокусируются на уровне отдельных функций, а не на создании комплексной проектной документации. Коммерческие решения вроде Swimm [Swimm] предлагают синхронизацию документации с кодом, но требуют ручной настройки и интеграции в рабочий процесс разработки. Инструменты типа Mintlify [Mintlify] используют ИИ для автоматического создания README-файлов, однако они ограничиваются описанием репозитория в целом, не предоставляя детализированной документации по отдельным модулям и классам.

Существуют также научные работы по автоматическому документированию. Исследование [Wang et al., 2022] предлагает подход к генерированию документации с использованием нейросетей, но он требует предварительного обучения на специфичных датасетах и не обеспечивает интеграции с системами контроля версий. Работа [Chen et al., 2020] исследует автоматическое извлечение знаний из кода, но не фокусируется на создании связанной вики-документации. В отличие от этих решений, предложенное в данной работе решение предлагает комплексный подход, который сочетает статический анализ, интеллектуальное обогащение в виде генерирования аннотаций на основе локальных языковых моделей, автоматическое связывание сущностей и публикацию в вики-системах коллективной разработки.

Для организации коллективной работы над документацией широкое распространение получили вики-системы, интегрированные с платформами контроля версий. Например, Gitea — самостоятельная, легковесная платформа для хостинга Git-репозитория, которая включает встроенный механизм вики, основанный на Git [Gitea]. Это позволяет хранить документацию в виде Markdown-файлов в отдельном репозитории, обеспечивая историю изменений, ветвление и возможность совместного редактирования. Идея интеграции автоматически генерируемой технической документации с подобными вики-системами не нова, однако существующие подходы, как правило, предполагают односторонний экспорт сгенерированных статических страниц, а не создание живой, связанной базы знаний [Ayer et al., 2016].

Параллельно развивается концепция персональных баз знаний (Personal Knowledge Management, PKM). Инструменты вроде Obsidian используют локальные хранилища Markdown-файлов с двунаправленными ссылками, что позволяет создавать сложные семантические сети из заметок [Obsidian]. Этот подход, доказавший свою эффективность для организации личных знаний, может быть адаптирован и для структурирования технической документации, где связи между модулями, классами и функциями имеют первостепенное значение.

В последние годы для решения проблемы недостаточной документации активно исследуется применение технологий искусственного интеллекта, в частности больших языковых моделей (Large Language Models, LLM). Исследования показывают, что LLM способны анализировать синтаксис и в определенной степени семантику исходного кода, генерируя релевантные текстовые описания

функций, классов и их взаимодействий [Husain et al., 2019; Obsidian]. Применение искусственного интеллекта для дополнения существующей документации или ее создания «с нуля» рассматривается как прорывное направление, способное кардинально снизить трудозатраты [Li et al., 2019]. Ключевой задачей при этом становится интеграция подобного интеллектуального компонента в автоматизированные конвейеры сборки и развертывания.

Таким образом, несмотря на наличие отдельных инструментов для автодокументации (PasDoc), систем для совместной работы над документацией (Gitea Wiki) и перспективных исследований по применению ИИ, отсутствует целостное решение, которое интегрирует эти компоненты в единый, полностью автоматизированный конвейер, предназначенный специально для документирования унаследованных систем, обеспечивая не только извлечение структуры, но и интеллектуальное обогащение контента с последующей публикацией в формате связанной, поддерживаемой сообществом базы знаний. Разработке основных компонентов такого конвейера посвящена данная работа.

Архитектура системы автоматизированного документирования

Предлагаемое решение представляет собой последовательный конвейер, реализованный в виде bash-скрипта (ai-descr.sh). Архитектура системы (рис. 1) построена по модульному принципу и включает этапы: подготовки данных, статического анализа, интеллектуального обогащения, генерирования документации и публикации. Конвейер разработан для идемпотентной обработки большого количества файлов с минимальным потреблением ресурсов за счет последовательного, а не параллельного выполнения.

1. Подготовка окружения и извлечение исходного кода

Первоначальный этап обеспечивает изоляцию и актуальность обрабатываемых данных. Система создает уникальную временную рабочую директорию с меткой времени (TMP_GIT_DIR) для предотвращения конфликтов между запусками. Затем выполняются операции, соответствующие функциям `check_dependencies` и `get_file_list`:

```
# Создание уникальной временной директории
NOW=$(date +%FT%H=%M)
TMP_GIT_DIR=~/.prog/tmp/pasdoc_git_tmp_${NOW}

# Проверка зависимостей
check_dependencies() {
    if ! command -v xmlstarlet >/dev/null 2>&1; then
        echo "Ошибка: xmlstarlet не установлен!"; exit 1
    fi
    # ... проверка других инструментов
}

# Получение списка файлов
get_file_list() {
    git clone "$repo_url" "$REPO_DIR" 2>/dev/null || cd "$REPO_DIR" && git pull
    git ls-tree -r --name-only HEAD | \
        grep -E '\.(pas|pp)$' | grep -E "^(${dirs_pattern})/" | sort
}
```

Листинг 1. Подготовка окружения и парсинг исходного кода

— Проверяется наличие обязательных инструментов: `xmlstarlet`, `git`, а также опциональных `curl`, `jq`, `base64` для работы с ИИ-компонентом.

— Происходит клонирование или обновление основного репозитория с исходным кодом (`$GITEA_PRJ`) и целевого вики-репозитория (`$GITEA_WIKI`). Это гарантирует работу с последней версией кода и документации.

— Формируется полный список файлов для обработки с использованием команды `git ls-tree`, что обеспечивает учет только файлов, находящихся под версионным контролем. Список фильтруется по заданным директориям (`source`, `Src`) и расширениям (`*.pas`, `*.pp`).

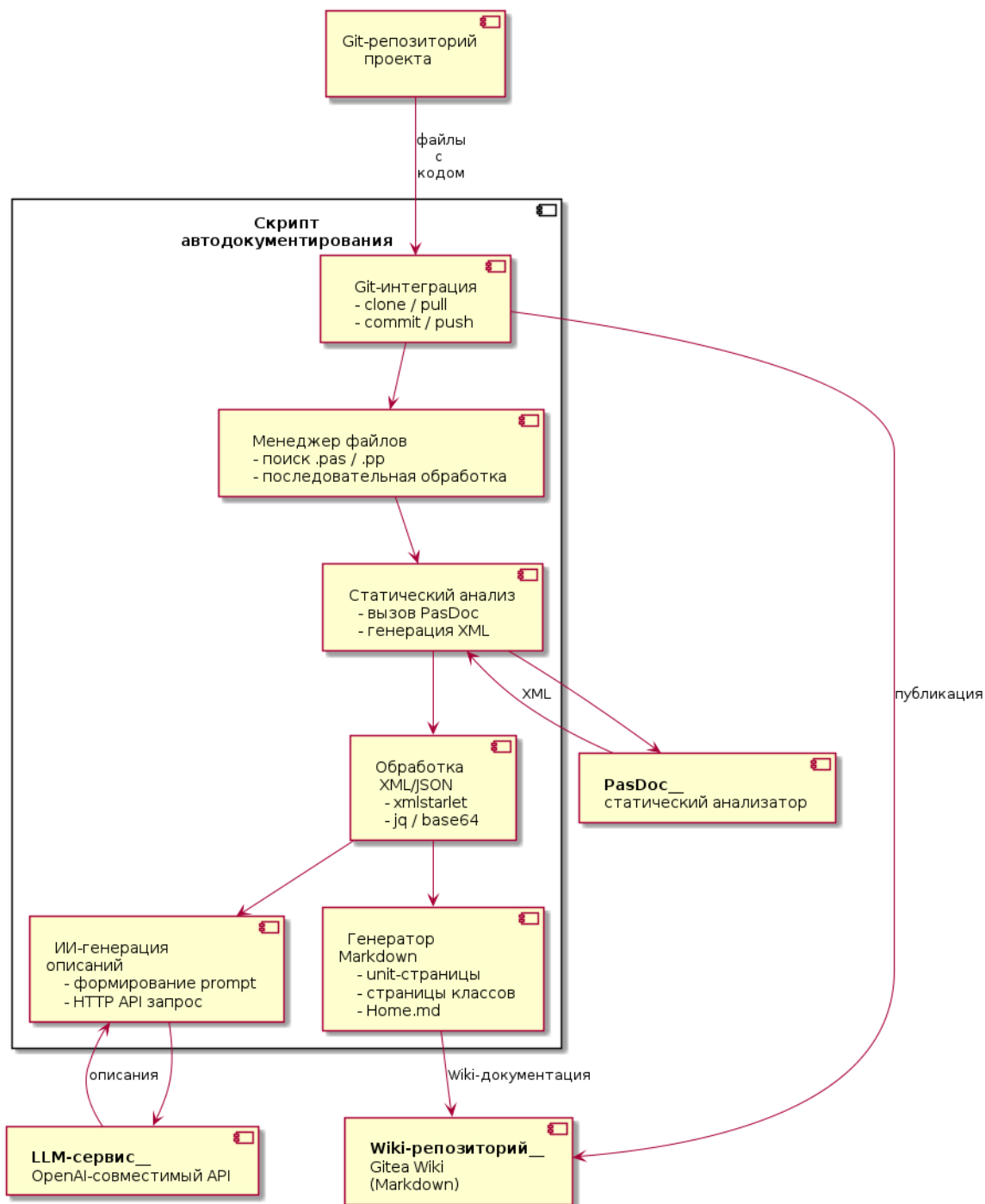


Рис. 1. Компоненты системы интеллектуального генерирования документации

Fig. 1. Components of the intelligent documentation generation system

2. Статический анализ кода и извлечение метаданных

Ядро процесса анализа реализовано в функциях `process_single_file` и `process_xml_file`. Для каждого файла из списка выполняется:

```
# Обработка одного файла
process_single_file() {
    local pasdoc_list="$doc_dir/temp_${base_name}.inc"
    echo "$file_path" > "$pasdoc_list"

    # Генерирование XML через PasDoc
    $PASDOC_PROG --output "$xml_output_dir" \
        --format=simplexml \
        --source "$pasdoc_list" >/dev/null 2>&1

    # Извлечение описания модуля
    unit_desc=$(xmlstarlet sel -t -v "/unit/description/detailed" "$xml_file" 2>/dev/null | xargs)

    # Резервный поиск имени модуля
    [ -z "$unit_name" ] && unit_name=$(grep -i "^unit " "$file_path" | head -1 | sed 's/unit //' | sed 's/;.*//') | xargs)
}
```

Листинг 2. Статический анализ и извлечение метаданных

— Генерирование промежуточного XML-представления: инструмент PasDoc запускается в режиме `simplexml` для одного файла, что минимизирует потребление памяти. Команда имеет вид: `$PASDOC_PROG --output "$xml_output_dir" --format=simplexml --source "$pasdoc_list"`. Полученный XML-файл содержит структурированные метаданные: имена модулей (`unit`), классы (`structure[@type='class']`), их методы (`routine`), свойства (`property`), переменные (`variable`) и связанные с ними комментарии.

— Парсинг и нормализация метаданных: для извлечения данных из XML используется утилита `xmlstarlet`. Например, извлечение описания модуля выполняется командой `xmlstarlet sel -t -v "/unit/description/detailed" "$xml_file"`. Если имя модуля не удастся определить из XML, проводится его поиск в исходном коде по ключевому слову `unit`. Этап обеспечивает переход от сырых данных к структурированному объектному представлению проекта.

3. Генерация описаний с помощью большой языковой модели

Данный этап, реализованный в функциях `generate_ai_unit_description` и `generate_ai_class_description`, является опциональным и активируется при наличии описанных инструментов (`USE_AI=true`). Его цель — восполнить пробелы в существующей документации.

— Вызов LLM: запрос к языковой модели отправляется только если описание сущности (модуля или класса) отсутствует, пусто или является шаблонным (равно "..."). Это реализует принцип точечного вмешательства для экономии вычислительных ресурсов.

— Формирование контекстного запроса: исходный код файла кодируется в `base64` и включается в JSON-запрос к OpenAI-совместимому API (`$AI_URL`). Промпт содержит строгую инструкцию: «Дай краткое описание... один абзац, без форматирования», что направляет модель на генерирование лаконичных технических текстов. Модель по умолчанию — `TeichAI/Qwen3-14B-Claude-Sonnet-4.5-Reasoning-Distill-GGUF:Q6_K`.

— Идемпотентность: сгенерированное описание немедленно записывается обратно в промежуточный XML-файл с помощью `xmlstarlet ed`. Это делает процесс устойчивым к повторным запускам: при следующем выполнении скрипта ранее сгенерированные описания будут восприняты как существующие и повторный запрос к LLM не последует.

```
# Универсальная функция для запроса к ИИ
generate_ai_description() {
  [ "$USE_AI" != true ] && return

  local file_content=$(base64 -w0 "$file_path")
  local json_request=$(jq -n --arg model "$AI_MODEL" \
    --arg content "$prompt$file_content" '{
    model: $model,
    messages: [{role: "user", content: $content}],
    temperature: 0.1,
    max_tokens: 250
  }')

  local response=$(curl -s -X POST "$AI_URL" \
    -H "Content-Type: application/json" -d "$json_request")

  echo "$response" | jq -r '.choices[0].message.content'
}

# Условный вызов LLM только при отсутствии описания
if [ -z "$unit_desc" ] || [ "$unit_desc" = "..." ]; then
  unit_desc=$(generate_ai_unit_description "$unit_name" "$file")
  [ -n "$unit_desc" ] && xmlstarlet ed -u "/unit/description/detailed" \
    -v "$unit_desc" "$xml_file" > "$xml_file.tmp"
```

Листинг 3. Запрос к LLM для генерирования описаний

4. Генерирование и связывание вики-документации

На этом этапе структурированные и обогащенные метаданные преобразуются в набор связанных Markdown-файлов, формирующих вики-базу знаний. Логика распределена между функциями `create_unit_markdown`, `create_class_markdown`, `add_properties` и `generate_markdown_section`.

```
# Создание страницы модуля
create_unit_markdown() {
  cat > "$md_file" << EOF
  # Unit: ${unit_name}
  ## Общее описание
  ${unit_desc}
  ---
  ## Структуры (классы)
  EOF
}

# Создание страницы класса с перекрёстными ссылками
create_class_markdown() {
  cat > "$class_md" << EOF
  # Класс: ${class_name}
  **Наследник:** ${ancestor_name:-нет}
  **Источник:** [${unit_name}]
  ## Описание
  ${class_desc}
  EOF
}

# Добавление свойства к существующей странице
if ! grep -q "\[ \[ ${unit_name} \] \]" "$class_md"; then
  echo -e "\n**Также встречается в:** [${unit_name}]" >> "$class_md"
fi
```

Листинг 4. Создание вики-документации

— Создание страниц модулей (Units): для каждого модуля создается файл [UnitName].md. Страница включает техническое описание (исходное или сгенерированное ИИ), списки типов (//type) и глобальных переменных (//variable[not(parent::structure)]), извлеченные из XML, а также автоматически сформированный перечень всех классов модуля с гиперссылками.

— Создание страниц классов (Classes): для каждого класса создается отдельная страница [ClassName].md. Страница содержит описание, иерархию наследования, секции методов, полей и свойств, сформированные на основе XPath-запросов к XML. Важным элементом является перекрестная ссылка «Источник: [[UnitName]]», устанавливающая связь между классом и его модулем.

— Обеспечение целостности: при обработке файла, страница для которого уже существует, скрипт не перезаписывает ее полностью, а дополняет (например, добавляя ссылку на новый модуль, где встречается класс). Это позволяет накапливать знания о связях в проекте.

5. Публикация и поддержка актуальности вики-репозитория

Финальная стадия, управляемая функциями `publish_single_file` и `create_index_file`, обеспечивает интеграцию результата в процесс коллективной разработки.

```
# Инкрементальный коммит после обработки каждого файла
publish_single_file() {
  cd "$wiki_clone_dir"
  git add .
  if ! git diff --cached --quiet; then
    git commit -m "Добавлен/обновлён файл: $processed_file ($NOW)"
    git push origin main 2>/dev/null
  fi
}

# Создание навигационного индекса
create_index_file() {
  cat > "$wiki_dir/Home.md" << EOF
# Документация проекта
## Unit'ы (модули)
EOF
  ls *.md | grep -v Home.md | sort | while read file; do
    echo "- [[$file%.md]]" >> Home.md
  done
}

# Очистка временных данных
rm -rf "$WIKI_CLONE_DIR" "$TMP_GIT_DIR"
```

Листинг 5. Публикация в вики-репозиторий

— Инкрементальные коммиты: после обработки каждого файла изменения в вики-директории (\$WIKI_CLONE_DIR) сразу добавляются, коммитятся и пушатся в удаленный репозиторий. Такой подход минимизирует риск конфликтов и предоставляет разработчикам актуальную документацию в режиме, близком к реальному времени.

— Генерирование навигационного индекса: после обработки всех файлов автоматически создается или обновляется главная страница Home.md. Она содержит два структурированных списка с гиперссылками: все документированные модули и все классы, что добавляет в уже сформированную вики возможность для оперативного поиска и обзора.

— Очистка: по завершении работы все временные директории (\$WIKI_CLONE_DIR, \$TMP_GIT_DIR) рекурсивно удаляются.

Последовательность взаимодействия компонентов системы визуализирована на диаграмме последовательностей (рис. 2). Предложенная архитектура обеспечивает высокую степень автоматизации, сохраняя гибкость за счет параметризации (URL репозитория, пути, модель LLM) и устойчивость за счет обработки ошибок и идиоматичности операций.

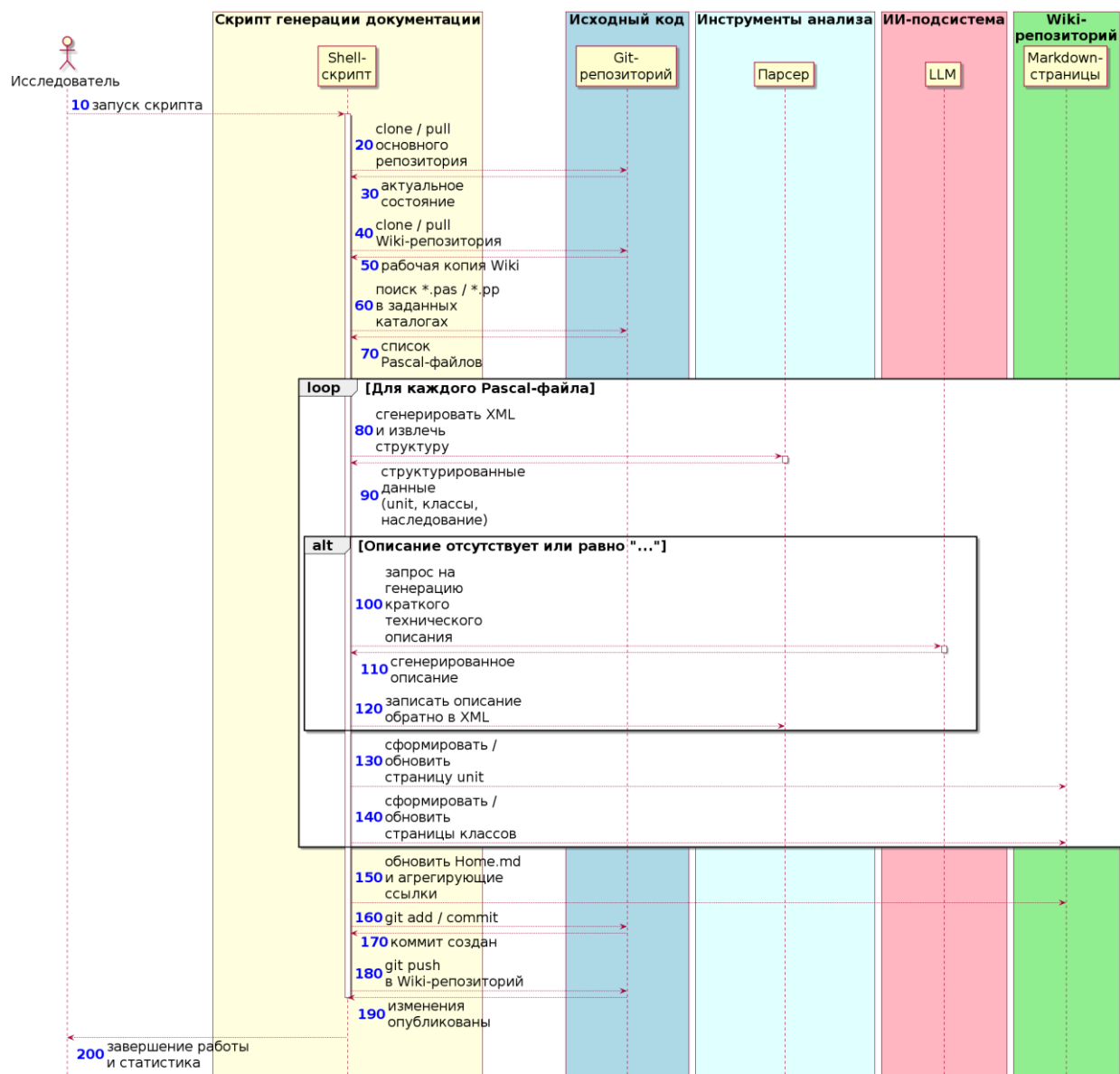


Рис. 2. Последовательность взаимодействия компонентов системы

Fig. 2. Sequence of interaction of system components

Анализ полученных результатов

Для оценки практической применимости и экономической эффективности разработанного конвейера было проведено экспериментальное тестирование на реальном унаследованном проекте «Dragon Logger», размещенном в репозитории Gitea. Целью эксперимента являлось сравнение временных и финансовых затрат при традиционном (ручном) документировании и при использовании автоматизированного конвейера.

Тестовая конфигурация и методика. Использовалась локально развернутая LLM TeichAI/Qwen3-14B-Claude-Sonnet-4.5-Reasoning-Distill-GGUF:Q6_K, запущенная через сервер с открытым API (Ollama). Обработка выполнялась разработанным скриптом (ai-descr.sh) с настройками по умолчанию:

AI_TEMPERATURE=0, AI_MAX_TOKENS=40960. Весь процесс — от клонирования репозитория до публикации финальной вики — был выполнен одним запуском скрипта.

Основной результат работы системы — вики-документация проекта, состоящая из взаимосвязанных гипертекстовых страниц (с использованием разметки markdown). Всего было обработано 47 файлов исходного кода, содержащих 23 модуля (unit) и 38 классов. Система извлекла структурную информацию: иерархию наследования классов, списки методов, свойств и глобальных переменных.

Из 23 модулей только 7 содержали исходные описания в комментариях. Для остальных 16 модулей описания были сгенерированы языковой моделью. Аналогично: из 38 классов лишь 12 имели описания в коде, а для 26 классов текст был создан LLM. Таким образом, если значительная часть документации либо отсутствует, либо представлена шаблонными заглушками, то система эффективно восполняет эти пробелы.

Пример фрагмента извлеченных данных и сгенерированных описаний для модуля UConfig.pas и его методов в вики:

Класс: TConfig

Наследник: TObject

Видимость: public

Источник: [[UConfig]]

Описание

Класс TConfig управляет всеми настройками приложения через INI-файл. Содержит свойства для хранения параметров окон (MainScreen, InventoryScreen, AnalyzeScreen), настроек сортировки в различных представлениях данных, глобальных флагов (DevMode), учетных данных (UserName, Password) и обширных параметров кастомизации интерфейса (отображение элементов, фильтры анализа, поведение компонентов). Предоставляет методы для инициализации, чтения и записи настроек с поддержкой как полного обновления, так и сохранения только параметров анализатора.

Иерархия наследования

TConfig ← TObject

Методы

Initialize

Объявление: procedure Initialize();

Метод создает экземпляр TIniFile для работы с файлом конфигурации приложения. Инициализирует объект dataIni, используя путь к исполняемому файлу с расширением .ini. Вызывается при создании объекта для подготовки к операциям чтения/записи настроек.

Cleanup

Объявление: procedure Cleanup();

Освобождает ресурсы объекта dataIni, созданного в методе Initialize. Вызывается при завершении работы с объектом TConfig для корректного освобождения памяти и закрытия файла конфигурации.

ReadValues

Объявление: procedure ReadValues();

Загружает все настройки из INI-файла в свойства объекта. Читает параметры окон, глобальные настройки, учетные данные и параметры кастомизации, используя значения по умолчанию для отсутствующих записей. Обрабатывает различные типы данных (целые числа, строки, логические значения) и группирует настройки по секциям файла.

WriteValues

Объявление: procedure WriteValues(OnlyWriteAnalyzer: Boolean);

Видимость: public

Сохраняет значения свойств в INI-файл. При OnlyWriteAnalyzer=True записывает только настройки, связанные с окном анализатора (AnalyzeScreen) и его фильтрами. При OnlyWriteAnalyzer=False сохраняет все настройки: параметры окон, глобальные флаги, учетные данные и параметры кастомизации (за исключением некоторых временных или внутренних настроек, отмеченных как закоментированные).

Поля

Поля класса являются приватными и используются для хранения значений свойств.

Это обеспечивает навигацию по всей структуре проекта — от общего списка модулей к конкретным страницам с описаниями классов, методов и свойств и обратно через ссылки "Источник".

Повторный запуск на том же репозитории подтвердил корректность реализации принципа идемпотентности: для файлов, уже обработанных в предыдущем запуске, повторных запросов к большой языковой модели не происходило. Система корректно определяла существующие описания и пропускала эти сущности. Обработка каждого файла занимала в среднем 12–15 секунд (включая время генерирования XML и потенциальный запрос к LLM), что для всего проекта составило около 10 минут.

Все сгенерированные Markdown-файлы были успешно опубликованы в вики-репозитории проекта. Инкрементальные коммиты после обработки каждого файла обеспечили детальную историю изменений. Полученная вики полностью функциональна: поддерживает навигацию по ссылкам, отображает форматирование и доступна через веб-интерфейс Gitea для всей команды разработки.

Гипертекстовая структура автоматически сгенерированной документации не только обеспечивает удобство навигации через веб-интерфейс Gitea Wiki, но и открывает дополнительные возможности при локальной работе с файлами. Поскольку документация сохраняется в виде стандартных Markdown-файлов с двунаправленными ссылками, ее можно напрямую открыть в инструментах для управления персональными базами знаний, таких как Obsidian. В Obsidian эти ссылки автоматически строят визуальный граф зависимостей, наглядно отображающий архитектурные связи между модулями и классами проекта. Разработчик видит не просто список файлов, а карту взаимосвязей: какие модули содержат какие классы, как типы используются в разных частях системы.

Заключение

В ходе выполнения исследования разработана и апробирована автоматизированная система документирования унаследованных программных проектов, интегрирующая методы статического анализа исходного кода и генеративные возможности больших языковых моделей. Предложенное решение реализует полный конвейер обработки — от извлечения метаданных программных сущностей до публикации структурированной гипертекстовой документации в вики-репозитории.

Принципиальной особенностью предложенного подхода является не просто автоматическое создание технической документации, а формирование связанной гипертекстовой структуры. Двунаправленные перекрестные ссылки между страницами модулей и классов образуют полноценную базу знаний, пригодную как для навигации через стандартный веб-интерфейс, так и для визуального анализа архитектурных связей в инструментах персональных баз знаний. Это качественно меняет восприятие унаследованного кода, превращая разрозненные исходные файлы в исследовательское пространство, где разработчик может отслеживать зависимости и проследить логику взаимодействия компонентов.

Несмотря на возможность оперативного создания документации, в текущей реализации генерирование описаний осуществляется на основе контента одного обрабатываемого файла без учета семантического контекста связанных модулей, классов или общей архитектуры проекта. Данное ограничение приводит к тому, что полученные описания могут носить локальный характер и не всегда отражать роль сущности в масштабе всей системы.

В связи с этим в качестве дальнейшего развития предполагается интеграция механизмов генерации с дополненным извлечением (RAG, Retrieval-Augmented Generation). Предполагается создание индексного хранилища векторных представлений всех документированных программных сущностей и их метаданных. При обработке нового модуля или класса система сможет извлекать релевантный контекст: описания родительских классов, интерфейсов, типов данных, а также примеры использования анализируемой сущности в смежных модулях.

Таким образом, предложенная система автоматизированного документирования на основе статического анализа и генеративного искусственного интеллекта представляет собой действенный инструмент снижения порога входа в унаследованные проекты и поддержания актуальности проектной документации. Дальнейшая эволюция системы в направлении контекстно-осведомленной генерации с применением RAG-архитектуры позволит перейти от автоматического документирования к интеллектуальному моделированию предметной области программной системы с формированием полноценного семантического описания ее структуры и поведения.

Список источников

- Датъев И. О., Федоров А. М., Ревякин А. А. Фокусированный сбор и обработка открытых данных социальных медиа // *Онтология проектирования*. 2024. Т. 14, № 4 (54). С. 569–581. DOI: 10.18287/2223-9537-2024-14-4-569-581.
- Информационная карта НИОКТР. URL: <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/3A4F1NQ3Q3O68L885FV6A9XO> (дата обращения: 20.01.2026).
- Федоров А. М., Датъев И. О., Вишняков И. Г. Метод интеграции больших языковых моделей в алгоритмы фокусированного мониторинга открытых данных социальных медиа // *Информатика и автоматизация*. 2025. № 6 (24). С. 1623–1648.
- Automatic Documentation Generation via Source Code Summarization / Y. Wang [et al.] // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2022. Vol. 48, № 5. P. 1528–1543.
- Ayer S. K., Messner J. I., Anumba C. J. A Framework for Automating the Creation of a Building Information Model // *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2016)*. Osaka, Japan, 2016. P. 1831–1838.
- Chen M., Tworek J., Jun H., Yuan Q., Pinto H. P. D. O., Kaplan J. [et al.]. Evaluating Large Language Models Trained on Code [Электронный ресурс]: препринт. 2021. arXiv:2107.03374. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.03374> (дата обращения: 20.10.2025).
- Chen Z., Komrusch S., Monperrus M. Neural transfer learning for repairing security vulnerabilities in C code // *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2020. Vol. 47, № 11. P. 2589–2610.
- CodeT5: Identifier-aware Unified Pre-trained Encoder-Decoder Models for Code Understanding and Generation / Y. Wang [et al.] // *Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. 2021. P. 8696–8708.
- Gitea: A painless self-hosted Git service [Электронный ресурс]: официальная документация. URL: <https://docs.gitea.com> (дата обращения: 20.10.2025).
- Husain H., Wu H., Gazit T., Allamanis M., Brockschmidt M. CodeSearchNet Challenge: Evaluating the State of Semantic Code Search [Электронный ресурс]: препринт. 2019. arXiv:1909.09436. URL: <https://arxiv.org/abs/1909.09436> (дата обращения: 20.10.2025).
- Li Y., Choi D., Chung J. [et al.]. Competition-Level Code Generation with AlphaCode / Y. Li [et al.] // *Science*. 2022. Vol. 378, № 6624. P. 1092–1097.
- Mintlify—AI powered documentation [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://mintlify.com/> (дата обращения: 20.10.2025).
- Obsidian [Электронный ресурс]: официальная документация. URL: <https://help.obsidian.md> (дата обращения: 13.02.2026).
- PasDoc: Documentation Tool for Pascal Source Code [Электронный ресурс]: официальный репозиторий проекта. URL: <https://github.com/pasdoc/pasdoc> (дата обращения: 20.10.2025).
- Software Documentation Issues Unveiled / E. Aghajani [et al.] // *Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering (ICSE 2019)*. Montreal, Canada : IEEE/ACM, 2019. P. 1199–1210. DOI: 10.1109/ICSE.2019.00122.
- Swimm—Continuous documentation that flows with your work [Электронный ресурс]: официальный сайт. URL: <https://swimm.io/> (дата обращения: 20.10.2025).
- van Deursen A., van Vliet H. Documenting and Analyzing a Legacy System // *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*. 2000. Vol. 12, № 3. P. 143–172.

References

- Aghajani E., Nagy C., Vega-Márquez O. L., Linares-Vásquez M., Moreno L., Bavota G., Lanza M. Software Documentation Issues Unveiled. *Proceedings of the 41st IEEE/ACM International Conference on Software Engineering (ICSE 2019)*, Montreal, Canada, 2019, pp. 1199–1210. DOI: 10.1109/ICSE.2019.00122.
- Ayer S. K., Messner J. I., Anumba C. J. A Framework for Automating the Creation of a Building Information Model. *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE 2016)*, Osaka, Japan, 2016, pp. 1831–1838.
- Chen M., Tworek J., Jun H., Yuan Q., Pinto H. P. D. O., Kaplan J., et al. Evaluating Large Language Models Trained on Code. 2021. arXiv:2107.03374. Available at: <https://arxiv.org/abs/2107.03374> (accessed 20.10.2025).
- Chen Z., Komrusch S., Monperrus M. Neural transfer learning for repairing security vulnerabilities in C code. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2020, Vol. 47, No. 11, pp. 2589–2610.
- Datyev I. O., Fedorov A. M., Revyakin A. A. Focused collection and processing of open social media data. *Ontology of Designing*, 2024, vol. 14, no. 4 (54), pp. 569–581. (In Russ.). doi:10.18287/2223-9537-2024-14-4-569-581.

Fedorov A. M., Datyev I. O., Vishnyakov I. G. The Method for Integrating Large Language Models into Algorithms for Focused Monitoring of Open Social Media Data. *Informatics and Automation*, 2025, no. 6 (24), pp. 1623–1648. (In Russ.).

Gitea: A painless self-hosted Git service. Official documentation. Available at: <https://docs.gitea.com> (accessed 20.10.2025).

Husain H., Wu H., Gazit T., Allamanis M., Brockschmidt M. CodeSearchNet Challenge: Evaluating the State of Semantic Code Search. 2019. arXiv:1909.09436. Available at: <https://arxiv.org/abs/1909.09436> (accessed 20.10.2025).

Li Y., Choi D., Chung J., Kushman N. Competition-Level Code Generation with AlphaCode. *Science*, 2022, Vol. 378, No. 6624, pp. 1092–1097.

Mintlify—AI powered documentation. Official website. Available at: <https://mintlify.com/> (accessed 20.10.2025).

Obsidian. Official documentation. Available at: <https://help.obsidian.md> (accessed 13.02.2026).

PasDoc: Documentation Tool for Pascal Source Code. Official repository. Available at: <https://github.com/pasdoc/pasdoc> (accessed 20.10.2025).

R&D Information Card. Available at: <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/3A4F1NQ3Q3O68L885FV6A9XO> (accessed 20.10.2025).

Swimm—Continuous documentation that flows with your work. Official website. Available at: <https://swimm.io/> (accessed 20.10.2025).

van Deursen A., van Vliet H. Documenting and Analyzing a Legacy System. *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*, 2000, Vol. 12, No. 3, pp. 143–172.

Wang Y., Liu S., Tan L., Zhou Y. Automatic Documentation Generation via Source Code Summarization. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2022, Vol. 48, No. 5, pp. 1528–1543.

Wang Y., Wang W., Joty S., Hoi S. C. H. CodeT5: Identifier-aware Unified Pre-trained Encoder-Decoder Models for Code Understanding and Generation. *Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*, 2021, pp. 8696–8708.

Информация об авторах

А. М. Федоров — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

И. О. Датьев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;

М. О. Илясов — программист;

И. Г. Вишняков — аспирант ФИЦ КНЦ РАН, системный администратор ИИММ КНЦ РАН.

Information about the authors

A. M. Fedorov — PhD (Engineering), Leading Researcher;

I. O. Datyev — PhD (Engineering), Senior Researcher;

M. O. Ilyasov — Programmer;

I. G. Vishnyakov — Postgraduate Student of the Federal Research Center of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, System Administrator of the IIMM KSC RAS.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 19.02.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 19.02.2026.

Научная статья
УДК 004.832; 004.853
doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.013

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ САЙТА ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

**Алексей Владимирович Шестаков^{1✉}, Александр Анатольевич Зуенко²,
Ольга Николаевна Зуенко³**

^{1, 2, 3}*Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова
Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия*

¹*a.shestakov@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-9052-25791>*

²*a.zuenko@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7165-6651>*

³*o.zuenko@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5431-7538>*

Аннотация

В статье представлены начальные этапы разработки системы интеллектуального поиска информации для сайта ФИЦ КНЦ РАН, основанной на применении больших языковых моделей, онтологического и промпт-инжиниринга, RAG-технологии. Система нацелена на повышение релевантности ответов на пользовательские запросы, формулируемые в процессе диалога на естественном языке и касающиеся содержимого сайта, а также электронного хранилища документов ФИЦ КНЦ РАН. Спроектирована архитектура системы и разработан ее прототип, реализующий некоторые из предполагаемых функций интеллектуального поиска. Использование RAG-технологии позволяет анализировать актуальный контекст без необходимости переобучения большой языковой модели, что особенно важно в условиях, когда информация на сайте может оперативно добавляться и модифицироваться. Для некоторых типов запросов разработаны специализированные промпты, позволяющие формулировать ответ в соответствии со спецификой запроса. С целью исключения возможности передачи конфиденциальных сведений внешним сервисам принято решение о локальном развертывании программной системы на сервере ИИММ КНЦ РАН. Проведенные эксперименты продемонстрировали применимость предлагаемых решений для рассматриваемых задач интеллектуального поиска.

Ключевые слова:

интеллектуальный поиск, RAG-технологии, большие языковые модели, диалог на естественном языке, онтологический инжиниринг, промпт-инжиниринг

Благодарности:

работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Методы и информационные технологии мониторинга и управления региональными критическими инфраструктурами Арктической зоны Российской Федерации» (FMEZ-2025-0054).

Для цитирования:

Шестаков А. В., Зуенко А. А., Зуенко О. Н. Возможности интеллектуализации сайта Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2026. Т. 17, № 1. С. 129–142. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.013.

Original article

OPPORTUNITIES FOR INTELLIGENTIZATION OF THE FRC KSC RAS WEBSITE

Aleksey V. Shestakov^{1✉}, Alexander A. Zuenko², Olga N. Zuenko³

^{1, 2, 3}*Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

¹*a.shestakov@ksc.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-9052-25791>*

²*a.zuenko@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7165-6651>*

³*o.zuenko@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5431-7538>*

Abstract

The article presents the initial stages of developing an intelligent information retrieval system on the website of the FRC KSC RAS, based on the use of large language models, ontological and prompt-engineering, and RAG-technology. The system is aimed at increasing the relevance of responses to user queries formulated in the dialogue process in natural language and related to the website content, as well as to the electronic repository of documents of the FRC KSC RAS. The system architecture has been designed, and a prototype has been developed that implements some of the proposed features of intelligent retrieval. The use of RAG-technology allows for analysis of current context without the need to retrain a large language model, which is especially important in situations where information on a website can be added and modified ad hoc. For some query types, specialized prompts have been developed to allow you to formulate an answer

that corresponds to the specific of the query. In order to prevent the transfer of confidential information to external services, it was decided to deploy the software system locally on the server of the IIMM KSC RAS. The experiments carried out demonstrated the feasibility of the proposed solutions for the considered tasks of intelligent retrieval.

Keywords:

intelligent information retrieval, retrieval-augmented generation technology (RAG technology), large language models (LLMs), natural language dialog, ontological engineering, prompt engineering

Acknowledgements:

This work was supported by the research project “Methods and Information Technologies for Monitoring and Managing Regional Critical Infrastructures in the Arctic Zone of the Russian Federation” (Project No. FMEZ-2025-0054).

For citation:

Shestakov A. V., Zuenko A. A., Zuenko O. N. Opportunities for intellectualization of the FRC KSC RAS website // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2026. Vol. 17, No. 1. P. 129–142. doi:10.37614/2949-1215.2026.17.1.013.

Введение

Сайт Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ РАН) [Федеральный...] — это интернет-ресурс с разветвленной структурой и большим количеством сведений о научной, образовательной и административной деятельности КНЦ. В качестве примеров основных разделов сайта можно привести следующие пункты: «Институты» с информацией о подразделениях КНЦ; «Образование», где содержатся сведения об аспирантуре, магистратуре, диссертационных советах; «Исследования», где собраны отчеты, информация о грантах и международном сотрудничестве.

Однако на настоящий момент встроенные механизмы поиска не справляются с задачей предоставления по запросу пользователям сайта (сотрудникам, аспирантам, студентам и внешним посетителям) релевантной информации, поскольку они основаны на сопоставлении ключевых слов без учета семантики и контекста запроса. Часто проблемы у пользователей появляются при поиске сведений, актуальных на текущую дату, например о сотрудниках по фамилии; о направлениях исследований лабораторий; в случае со студентами (преподавателями) — при поиске расписаний занятий; при поиске ответов на запросы, требующих анализа информации, содержащейся в новостной ленте.

Отдельной задачей является интеллектуализация работы с внутренней электронной библиотекой, представленной в виде набора документов: чтобы найти книгу с нужной информацией, пользователям приходится вручную просматривать содержимое документов, что представляется малоэффективным способом ввиду огромного количества литературных источников.

Кроме того, существует потребность в инструменте, позволяющем организовывать поиск на основе анализа содержимого нормативных документов ФИЦ КНЦ РАН (положений, регламентов, правил и т. п.) и в случае необходимости обобщать информацию из различных документов.

Таким образом, представляется актуальной задача создания системы интеллектуального поиска, которая позволяет с единых позиций решать весь спектр обозначенных проблем и обладает следующим функционалом:

1. Семантический поиск и навигация по сайту. Формулировка запросов на естественном языке для поиска информации с учетом структуры сайта, включая поиск данных о сотрудниках по различным критериям (фамилия, направление исследований), предоставление актуального расписания занятий и экзаменов для аспирантов и магистрантов и т. п.

2. Анализ нормативно-правовой базы. Загрузка, индексация и последующий семантический поиск по внутренним нормативным документам (правилам, положениям, регламентам).

3. Интеллектуальный доступ к электронной библиотеке Центра. Реализация механизма, который по запросу пользователя находит подходящие издания, предоставляет аннотации и указывает источники требуемых сведений.

4. Специализированная обработка типовых запросов пользователя. Систематизация часто задаваемых вопросов пользователя.

5. Механизм обратной связи, обеспечивающий возможность конечному пользователю оценивать результаты выполнения его запросов.

Для преодоления трудностей, которые на текущий момент существуют при поиске информации на сайте ФИЦ КНЦ РАН, предлагается разработать специализированный диалоговый интерфейс (чат-бот), позволяющий организовать общение с пользователем на естественном языке. Чат-бот предполагается реализовать в виде отдельной страницы сайта, которая предоставляет расширенный функционал для выполнения поисковых запросов, как типовых, так и ad-hoc, что обеспечит переход от классической навигации по гиперссылкам и поиску по ключевым словам к взаимодействию с пользователем в формате диалога на естественном языке.

В статье представлена гибридная архитектура разрабатываемой системы интеллектуального поиска, основанная на совместном применении больших языковых моделей (БЯМ, LLM) [Manning, 2022; Mitchell, Krakauer, 2022; LitLLM, 2024] и механизме извлечения релевантной информации (Retrieval-Augmented Generation, RAG) [Олейник и др., 2023; Шестаков и др., 2025; Gao et al., 2026]. В рамках соблюдения политики информационной безопасности ФИЦ КНЦ РАН с целью исключения возможности передачи конфиденциальных сведений внешним сервисам было принято решение о локальном развертывании программной системы на сервере Института информатики и математического моделирования ФИЦ КНЦ РАН (ИИММ КНЦ РАН).

Применение RAG-технологии позволяет снизить риск генерации БЯМ ложных фактов («галлюцинаций») за счет возможности задания контекста запроса, тем самым повышаются релевантность и точность ответов, генерируемых БЯМ. Технология обеспечивает извлечение из корпуса документов фрагментов, релевантных запросу пользователя, и организует их передачу БЯМ в качестве контекста для генерации итогового ответа, что позволяет использовать модель без необходимости ее переобучения.

В рамках предлагаемой архитектуры за парсинг, включая обработку структуры сайта, извлечение текста из документов различных форматов и преобразование текстовой информации в векторные представления (эмбединги) перед непосредственной передачей их в БЯМ, отвечает специализированный модуль предобработки и векторизации данных. Именно на основе векторного представления осуществляется семантический поиск информации.

Представленная статья описывает этап разработки архитектуры системы, а также начальные этапы программной реализации ее базовых функций.

Сайт ФИЦ КНЦ РАН как источник данных

Для определения логики парсинга и учета специфики данных при семантическом поиске необходимо использовать метаинформацию о структуре сайта (рис.1).

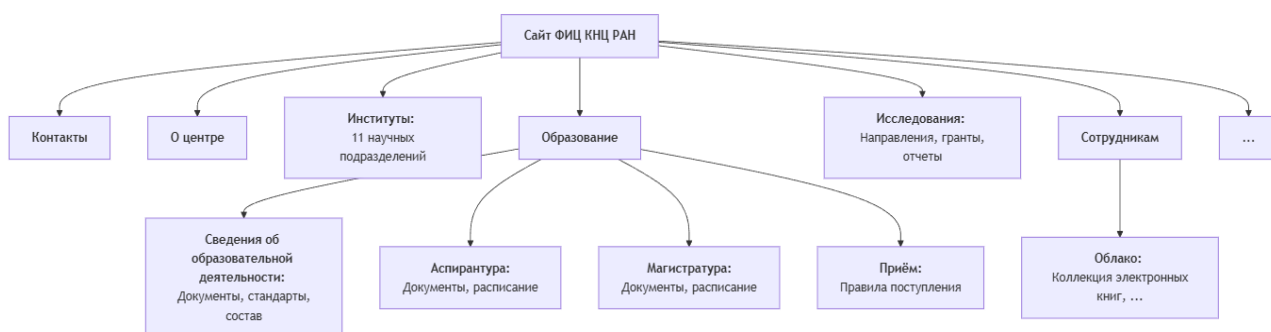


Рис. 1. Иерархическая схема основных компонент сайта ФИЦ КНЦ РАН

Fig. 1. Hierarchical diagram of the main components of the FRC KSC RAS website

Наиболее важными для данной работы являются разделы, посвященные институтам, образованию, исследованиям и контактам, которые имеют сложную структуру. Раздел «Институты» включает базовую информацию о подразделениях КНЦ РАН, информацию о направлениях исследований, сотрудниках и публикациях, а раздел «Исследования» содержит данные о научных направлениях КНЦ РАН в целом, сведения о международном и научно-техническом сотрудничестве, а также грантах и отчетах.

Сложно структурированным является раздел «Образование», он состоит из нескольких подразделов, которые содержат не только собственно информацию, но и ссылки на документы с требуемыми сведениями. Среди его подразделов можно выделить: 1) подраздел «Сведения об образовательной деятельности», в котором хранятся уставные документы, информация об образовательных стандартах, руководстве, педагогическом (научно-педагогическом) составе, материально-техническом обеспечении, стипендиях, вакантных местах и т. д.; 2) подразделы «Аспирантура» и «Магистратура», которые обладают идентичной структурой и предоставляют актуальные нормативные документы (правила, программы) и расписания занятий; 3) подраздел «Приём» предоставляет информацию для абитуриентов о правилах и сроках поступления в аспирантуру и магистратуру.

Из-за большого объема разнообразного контента и разветвленной структуры сайта встроенный механизм поиска не обеспечивает достаточной точности ответов на пользовательские запросы, часто возвращает нерелевантную информацию, как показано на рис. 2, что требует усовершенствования технологии поиска.

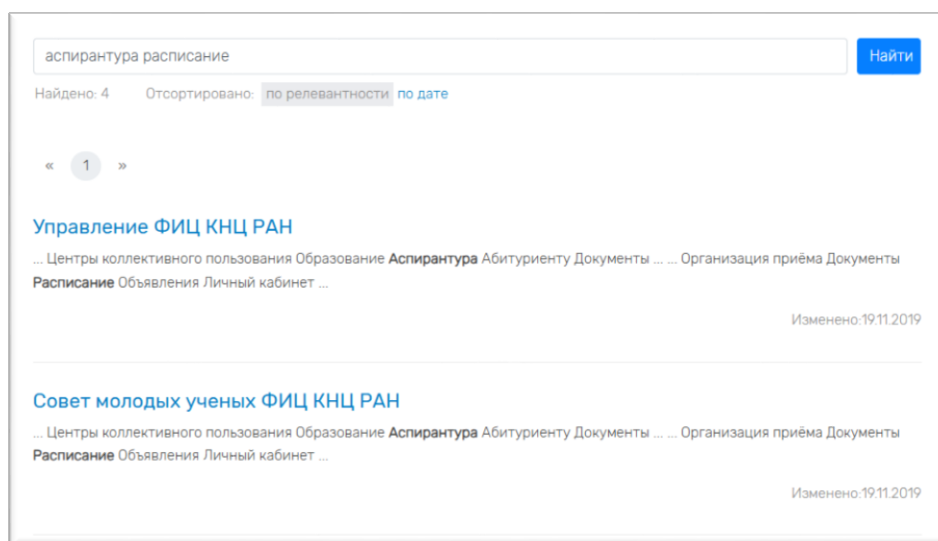


Рис. 2. Пример работы текущего механизма поиска на сайте ФИЦ КНЦ РАН

Fig. 2. An example of the current search mechanism on the website of the FRC KSC RAS

Кроме того, важным информационным ресурсом, доступ к которому организован посредством сайта Центра, является электронная библиотека, содержащая несколько подразделов. В статье наибольшее внимание уделено пункту «Коллекция электронных изданий – электронные версии журналов». Электронная библиотека обладает иерархической структурой. В общем виде структуру можно представить как «Коллекция → Журнал/Книга/Серия → Год → Номер → Документ (файл)», как показано на рис. 3.

Данная иерархия обуславливает два уровня обработки данных: 1) генерация аннотации по содержанию файлов для быстрого семантического поиска и отбора документов по описанию; 2) анализ пути к файлу и/или внутренних метаданных о документе для извлечения структурированной метаинформации (название журнала/серии, год, номер, авторы, заголовок).

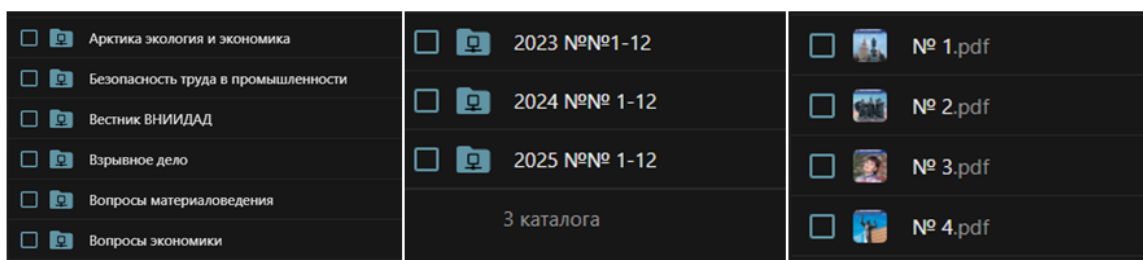


Рис. 3. Фрагмент структуры электронной библиотеки
Fig. 3. Fragment of the structure of the electronic library

Одной из задач разрабатываемой системы является поиск, подбор, аннотирование документации, располагающейся в электронном хранилище Центра. Таким образом, пользователи смогут получать список релевантных публикаций со ссылками на файлы по тематическому запросу на естественном языке, а также интересующую их информацию по документу в режиме диалога.

Общее описание системы интеллектуального поиска

Предлагаемая интеллектуальная система реализует клиент-серверную архитектуру, которая приложена на рис. 4. В архитектуре системы можно выделить два основных блока: клиентская часть — веб-приложение, представляющее собой диалоговый интерфейс для ввода запросов на естественном языке, а также отображения сгенерированных ответов, и серверная часть — ядро системы, обеспечивающее обработку запросов.

Далее подробно рассматриваются структурные блоки, представленные на рис. 4.

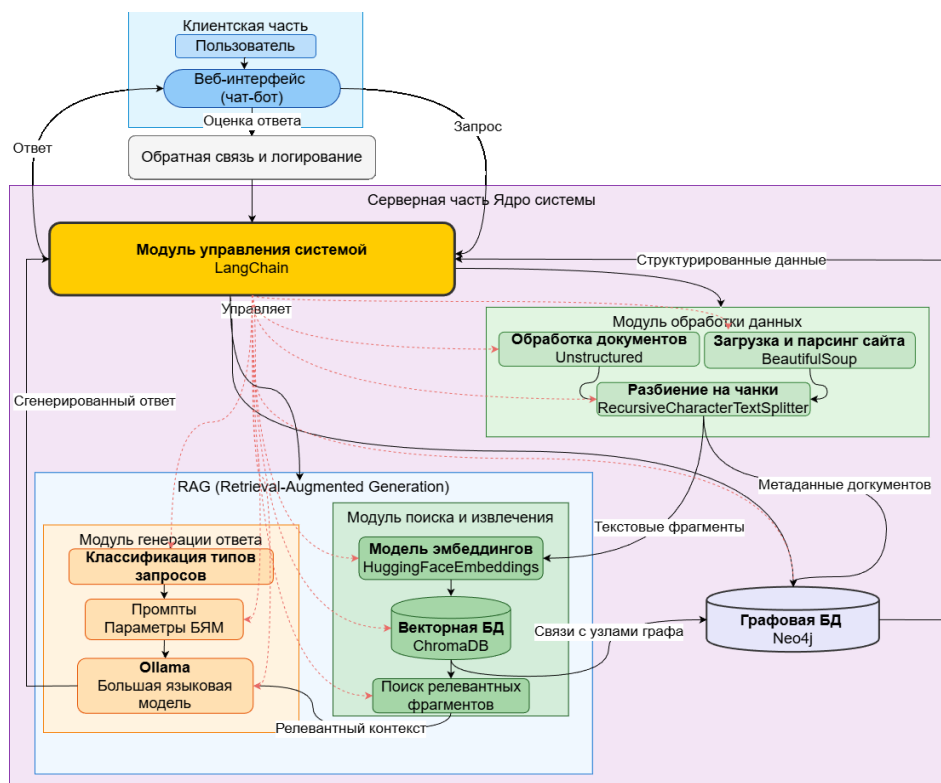


Рис. 4. Архитектура интеллектуальной системы
Fig. 4. Architecture of an intelligent system

Модуль управления системой

Ядро системы построено с применением фреймворка LangChain [Langchain Introduction], который координирует выполнение функций, связанных с БЯМ и RAG-технологией. Среди его функций можно выделить следующие: 1) обеспечение связи между модулем загрузки и обработки документов, моделью эмбедингов, ВБД и языковой моделью и управление потоком данных; 2) реализация разных сценариев работы системы за счет применения специальных цепочек действий (chains) [Chains] (например, загрузка документа, поиск в БД или расчет); 3) анализ истории диалога, что дает возможность учитывать предыдущие взаимодействия пользователя с системой при генерации ответа на запрос данного пользователя в рамках контекста одной сессии, в частности, позволяет задавать уточняющие вопросы без необходимости повторения всей исходной информации.

Модуль обработки данных

В модуле обработки данных происходит преобразование исходной неструктурированной информации в векторное представление, в процессе которого реализуются описанные ниже ключевые функции:

1. *Извлечение текстового контента с веб-страниц сайта ФИЦ КНЦ РАН.* На этом этапе планируется применять специальные инструменты, такие как библиотека Python BeautifulSoup [Beautiful Soup]. Данная библиотека предоставляет инструментарий для парсинга HTML-структуры, позволяющий отделять собственно контент от элементов навигации и оформления. Для повышения эффективности парсинга и дополнительного анализа также планируется применять библиотеку lxml [Lxml].

2. *Извлечение информации из файлов (обработка документов).* В текущей версии разрабатываемой системы интеллектуального поиска для извлечения и обработки текстов применяется библиотека Unstructured [Unstructured integrations]. В Unstructured интегрированы методы оптического распознавания символов (OCR, например, через Tesseract [Tesseract...]) для извлечения текста из сканированных изображений в составе PDF-файлов, а также механизмы для идентификации таблиц в документах и извлечения из них информации в структурированном виде. Еще одним достоинством Unstructured является наличие методов для обработки разных форматов документов, включая PDF, DOCX, PPTX, HTML, EML и др.

3. *Разбиение текста на семантические фрагменты (чанки).* Для этого в работе применяется метод RecursiveCharacterTextSplitter [Langchain Text...] из библиотеки LangChain, который нацелен на сохранение смысловых границ исходного текста. Метод реализует рекурсивный алгоритм, который последовательно разделяет текст на смысловые единицы, в частности абзацы, предложения, словосочетания и т. п.

4. *Векторизация.* Чтобы в дальнейшем использовать получившиеся на предыдущих этапах текстовые фрагменты для организации информационного поиска, их необходимо преобразовать в численные векторные представления (эмбединги), то есть в формат, подходящий для математической обработки БЯМ. Это необходимо для измерения семантической близости между текстовыми фрагментами путем вычисления расстояния между соответствующими векторами в многомерном пространстве. Для векторизации была использована модель ai-forever/sbert_large_nlu_ru [SBERT] через интерфейс HuggingFaceEmbeddings [Hugging...]. В основе модели лежит архитектура BERT [BERT], которая позволяет обрабатывать тексты на русском языке. При размере около 1.7 ГБ модель предлагает хорошее соотношение качества и требований к вычислительным ресурсам для локального развертывания.

5. *Сохранение в векторную базу данных (ВБД).* Далее полученные векторные представления необходимо сохранить в ВБД. В работе была использована открытая СУБД ChromaDB [Try Chroma].

Модуль поиска и извлечения данных

Модуль поиска и извлечения данных является главным элементом системы, он основан на применении RAG-технологии, с помощью которой осуществляется поиск релевантных текстовых фрагментов в ВБД и последующая передача найденного контекста для генерации ответа на запрос пользователя с использованием БЯМ. Общая схема работы RAG-технологии представлена на рис. 5.

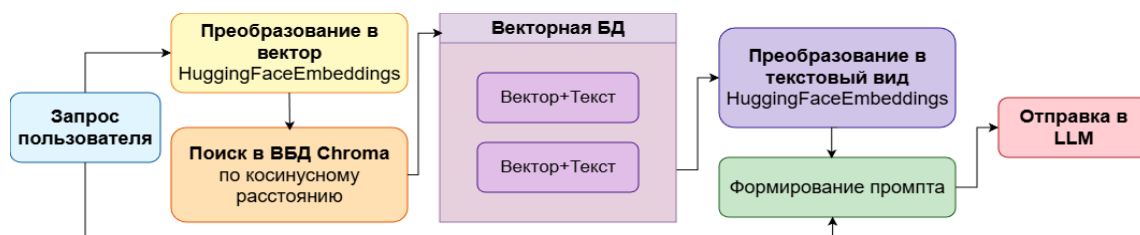


Рис. 5. Схема работы RAG-технологии

Fig. 5. RAG technology operation diagram

Принцип работы RAG-технологии можно описать следующим образом. Запрос пользователя преобразуется с применением модели эмбединга `HuggingFaceEmbeddings` в численное векторное представление. На основе специальных метрик происходит поиск по ВБД наиболее близких по семантике векторов, которые связаны с текстовыми фрагментами исходного текста. Далее, извлеченные векторы преобразуются в текстовый вид, формируя контекст запроса. После этого контекст объединяется с исходным запросом, тем самым создается итоговый промпт, который затем отправляется языковой модели для генерации финального ответа. Данный подход позволяет снизить количество «галлюцинаций», характерных для любой БЯМ.

Для оценки релевантности фрагментов текста применяются специальные метрики. В данной работе используется метрика косинусного расстояния [`Configuring...`].

Модуль генерации ответа

Получение ответа на запрос пользователя по сгенерированному контексту является заключительным этапом работы RAG-технологии. В настоящей работе для локального развертывания большой языковой модели применяется `Ollama` [`Ollama's Documentation`]. `Ollama` представляет собой платформу для запуска и управления БЯМ, а также содержит встроенную библиотеку моделей.

В качестве БЯМ для генерации ответов применялась `Llama3.1:8b` [`Llama3.1:8b`], которая характеризуется 8 миллиардами параметров. Выбор модели обусловлен следующими критериями: 1) высокие способности к пониманию контекста и генерации связного текста при низких требованиях к аппаратному обеспечению (видеокарта ~ 4 Гб); 2) поддержка моделью нескольких языков, в том числе русского; 3) полная совместимость с `Ollama`, наличие исчерпывающей документации.

Одним из наиболее важных элементов при разработке систем, базирующихся на применении БЯМ, являются промпты [`Цзяншу и др., 2025`]. Промпт — это специальная системная инструкция для модели, которая определяет ее поведение, стиль речи и напрямую влияет на качество генерации ответа на запрос пользователя. Для управления процессом генерации и обеспечения стабильности ответов применяются стандартные параметры языковой модели, описанные ниже:

1) параметр `temperature` контролирует случайность (энтропию) выбора слов. Для него устанавливается низкое значение в случае запросов, предполагающих предоставление конкретных фактов, и более высокое при составлении творческих резюме, а также для ответов на общие запросы;

2) параметр `top_p` отвечает за разнообразие лексики при сохранении смысловой точности. Ограничивает выбор слов верхним процентом распределения вероятностей, оставляет только наиболее вероятные и осмысленные слова;

3) параметр `max_tokens` задает верхний предел длины генерируемого ответа в токенах. Ограничивает длину ответа, предотвращая избыточные и нерелевантные «рассуждения» модели;

4) параметр `repeat_penalty` увеличивает «штраф» за повторное использование недавно сгенерированных токенов. Применяется для снижения вероятности повторения одних и тех же фраз в ответе.

В рамках исследований осуществлена типизация пользовательских запросов и разработаны специализированные шаблоны промптов для их обработки. Были выделены следующие типы запросов пользователей: 1) запросы на обобщение информации, нацеленные на сжатие и краткий пересказ информации с минимальной детализацией; 2) запросы на обзор документа, обеспечивающие генерацию полноценного описательного обзора; 3) запросы на проверку наличия информации, подразумевающие четкий утвердительный

или отрицательный ответ относительно наличия (отсутствия) той или иной информации с приведением точных цитат из найденных источников; 4) запросы с вопросительными ключевыми словами «Что», «Какой», «Где», «Почему», «Как», «Сколько», «Когда», которые возвращают перечень сущностей, дат или иных фактов из контекста; 5) библиографические запросы, фокусирующиеся на поиске информации об указанных публикациях; 6) универсальный запрос (по умолчанию), не принадлежащий ранее рассмотренным классам.

Применение типизации запросов адаптирует поведение БЯМ под специфику запроса пользователя, что значительно повышает точность и релевантность ответов.

Функции диалогового интерфейса

Пользовательский интерфейс системы реализован в виде чат-бота, встраиваемого в веб-сайт диалогового виджета, а также как отдельная веб-страница с более широкими возможностями по работе с текстом и документами. Главная задача интерфейса состоит в обеспечении интуитивного взаимодействия с пользователем, поддержании контекста беседы, а также в сборе данных пользовательских сессий для анализа качества работы и выявления недостатков системы. Для этого в системе реализованы следующие функции:

1) *поддержка диалога на естественном (русском) языке.* Интерфейс принимает текстовые запросы от пользователя без необходимости использования специального синтаксиса или ключевых слов;

2) *учет истории диалога.* Производится сохранение контекста в рамках сессии для поддержания связности беседы;

3) *механизм обратной связи* обеспечивается путем оценивания пользователем качества генерации ответа на запрос. Для этого доступно три критерия оценки («Отлично», «Средне», «Плохо») и возможность оставить комментарий относительно выбранной оценки;

4) *протоколирование действий.* Осуществляется запись в лог-файл ключевых событий: частотность типов запросов, релевантность ответов, формулировка запросов.

Полученная статистика используется для мониторинга работы системы, выявления проблемных сценариев и планирования дальнейшего развития функционала. Внешний вид интерфейса веб-страницы показан на рис. 6. Пример конкретного запроса и ответа, а также пример оценки этого запроса конечным пользователем с помощью механизма обратной связи приведены на рис. 7.

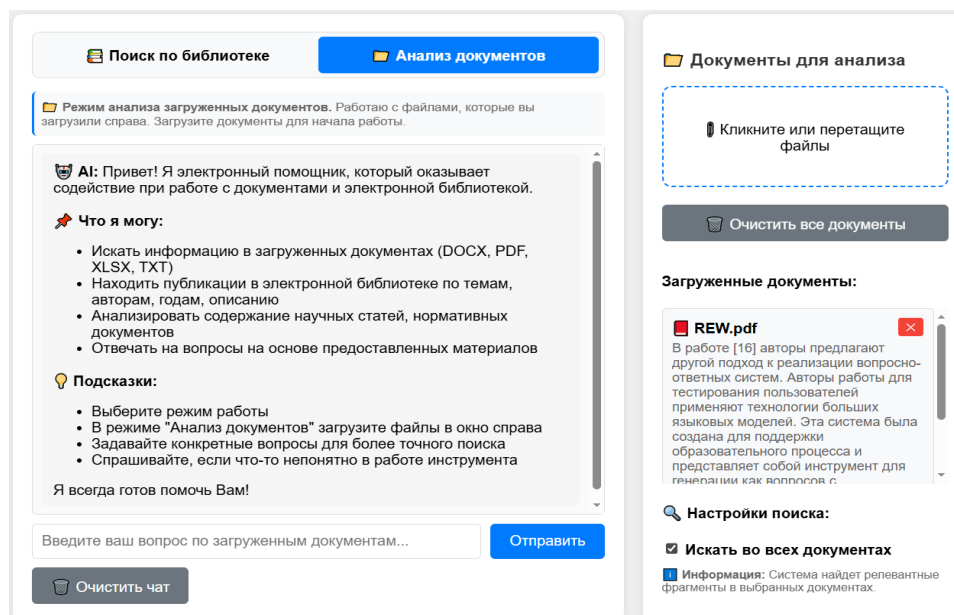


Рис. 6. Пользовательский интерфейс интеллектуальной системы

Fig. 6. User interface of the intelligent system

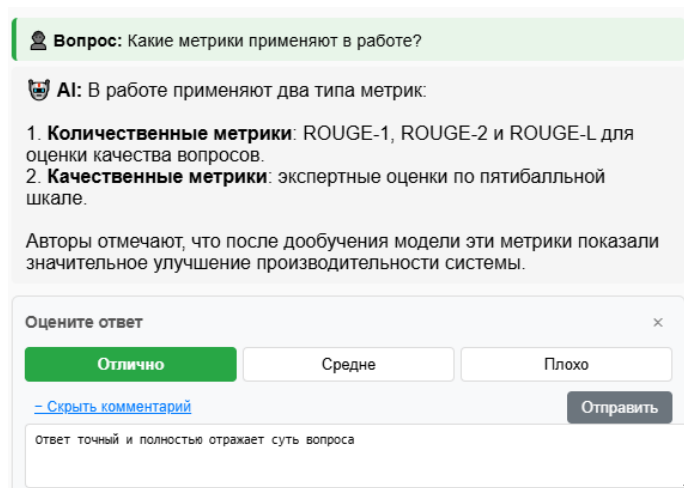


Рис. 7. Окно обратной связи системы

Fig. 7. Systems feedback window

Применение средств онтологического проектирования для интеллектуального поиска информации

Электронная библиотека Центра представляет собой большую, сложно структурированную базу знаний, поэтому для реализации семантического поиска по ней предлагается построить онтологию научной литературы. Это позволит выполнять запросы по поиску и подбору литературы на естественном языке без необходимости хранить полные тексты, опираясь исключительно на связи между концептами, описанными в метаданных. Суть метода предполагает хранение информации о публикациях в виде связанного графа. Для реализации онтологии были выделены следующие ключевые сущности:

1. Сущность: «*Публикация*» — базовая сущность: Атрибуты: «*Название*», «*Год*», «*Аннотация*» (генерируемая моделью), «*Тип*» (статья, книга, сборник), ссылка на файл.
2. Сущность: «*Периодическое издание*». Атрибуты: «*Название*» (например, "Геоинформатика"), «*Универсальный идентификатор*».
3. Сущность: «*Выпуск*». Атрибуты: «*Номер*», «*Том*», «*Дата выпуска*».
4. Сущность: «*Автор*». Атрибуты: «*ФИО*», «*Идентификатор*» (при наличии).
5. Сущность: «*Тема*». Атрибуты: «*Название темы*» (например, «дистанционное зондирование», «Арктика»).
6. Сущность: «*Ключевое слово*». Атрибуты: «*Термин*».

Онтология призвана отражать как иерархическую структуру хранения данных (для навигации), так и смысловые связи (для поиска):

1. Иерархические связи обеспечивают навигацию «от целого к его частям» и моделируют структуру каталога:

«*Периодическое Издание*» содержит → «*Выпуск*» содержит → «*Публикации*».

2. Семантические связи формируют смысловую сеть (граф) для выполнения сложных запросов, отражают содержательные отношения:

«*Публикация*» написана → «*Автор*»;

«*Публикация*» относится к теме → «*Тема*»;

«*Публикация*» имеет ключевое слово → «*Ключевое слово*».

Извлечение, структурирование метаданных и присваивание конкретных значений атрибутам сущностей планируется производить за счет использования механизма автоматического парсинга путей к файлам и метаданных из документов, а аннотирование публикаций — за счет применения языковой модели.

Для хранения онтологии решено применять графовую базу данных Neo4j [Neo4j], а для хранения векторного представления аннотации публикаций — ВБД, которая связана с узлами графа.

Ключевые особенности работы системы интеллектуального поиска информации при решении задач, связанных с анализом публикаций, можно свести к следующему (рис. 8.):

- 1) из исходной электронной библиотеки Центра данные поступают в модуль извлечения и обработки;
- 2) в процессе обработки для публикаций генерируются аннотации, их векторные представления добавляются в ВБД; одновременно с этим формируются узлы и связи онтологии;
- 3) запрос пользователя преобразуется в векторное представление для поиска наиболее близких векторов по ВБД;
- 4) через связи найденных векторов с узлами-публикациями в онтологии определяются соответствующие им сущности в графовой базе данных;
- 5) на основе этих сущностей система формирует итоговый структурированный ответ на запрос пользователя с полными библиографическими ссылками и ссылками на файлы.

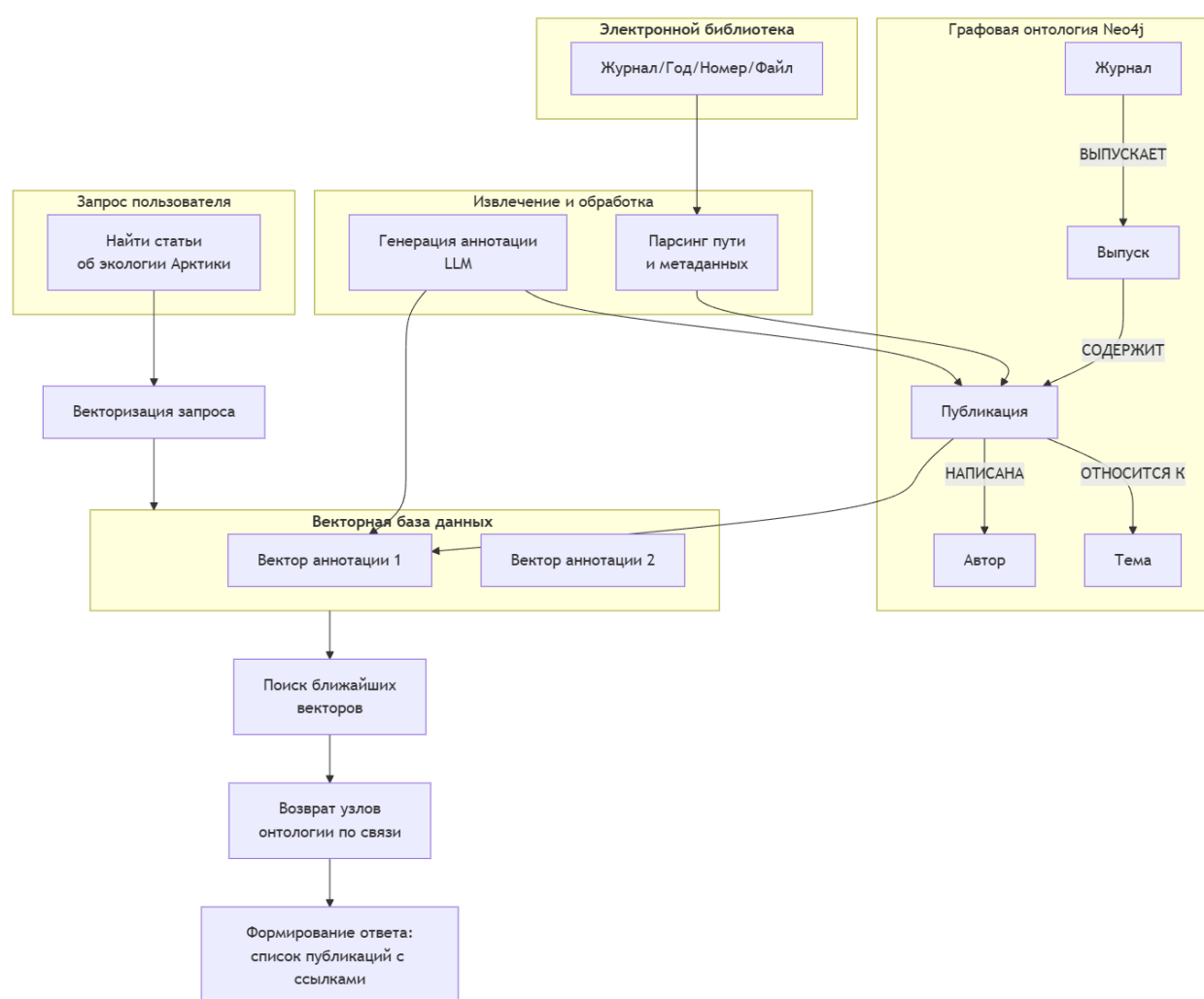


Рис. 8. Схема применения онтологии при анализе публикаций
Fig. 8. Scheme of application of ontology in the analysis of publications

Тестирование текущей версии системы интеллектуального поиска

Для тестирования работы системы интеллектуального поиска использовались нормативные документы ФИЦ КНЦ РАН. Для удобства предоставленные документы условно сгруппированы в тематические разделы, например ГО и ЧС, жилищная политика, коллективный договор, положения и т. д., и подгруппы. Это сделано для того, чтобы оценить скорость и качество работы системы в зависимости от количества и разнообразия загруженных документов.

Кроме тематики нормативные документы также отличаются форматом. В выборке присутствуют как текстовые, так и графические форматы. Каждый формат требует своего подхода к обработке.

Были протестированы три БЯМ: «llama3.1:8b» [Neo4j], «qwen2.5:3b» [Qwen2.5:3b], «phi3:mini» [Phi3]. Наилучшие результаты показала модель «llama3.1:8b», которая находится в открытом доступе. Данная модель с 8 миллиардами параметров хорошо подходит для того, чтобы обрабатывать короткие запросы пользователей и оперативно получать ответы. Она используется для разработки чат-ботов, виртуальных помощников и базовой аналитики.

В процессе тестирования было выявлено, что данная модель может одновременно анализировать десятки документов, т. е. из множества документов она способна выделить несколько, относящихся к нужной тематике, и выполнить поиск по ним. Модель способна извлекать информацию из таблиц и формул.

Для ускорения и повышения качества поиска в системе реализована типизация пользовательских запросов. Для каждого типа применяются свой промпт и параметры модели.

Например, один из типов запросов включает следующие вопросительные слова: «Какие», «Что», «Какой», «Какая», «Какое», «Сколько», «Когда», «Где», «Почему», «Как». Для этого типа запроса были установлены следующие параметры: *temperature* = 0, *top_p* = 0.9, *max_tokens* = 500, *repeat_penalty* = 1.1. Промпт для формулировки вопроса к системе с ключевыми словами из этой группы выглядит следующим образом:

Листинг 1. Пример промпта для запросов с фактологическими вопросительными словами
ИНСТРУКЦИИ:

1. Найди в контексте ПРЯМОЙ ОТВЕТ на вопрос
2. Если есть точный ответ — приведи его (можно дословно)
3. Если ответа нет — скажи: "В контексте нет информации"
4. Не делай выводов за пределами контекста.

Тестирование проводилось на компьютере с процессором Intel Core i9 10900k, оперативной памятью 64 Гб, видеокартой NVIDIA GeForce GTX1650 (4Гб).

Один из этапов тестирования используемой БЯМ заключался в том, что системе задавался тот же самый по смыслу вопрос, но в различных формулировках. Ниже приведены примеры вопросов и ответов.

Вопрос 1: «Какие точные требования к квалификации младшего научного сотрудника?»

Вопрос: 2: «Какие требования предъявляются к соискателю на должность младшего научного сотрудника?»

На данные вопросы был получен идентичный *ответ:* «Высшее профессиональное образование и опыт работы по специальности не менее 3 лет. При наличии ученой степени, окончании аспирантуры и прохождении стажировки — без предъявления требований к стажу работы. При наличии рекомендаций советов высших учебных заведений (факультетов) на должность младшего научного сотрудника могут быть назначены в порядке исключения выпускники высших учебных заведений, получившие опыт работы в период обучения».

Рассмотрим ситуацию, при которой запрос относится к другому типу с сохранением при этом общей семантики с вопросами 1 и 2. Пусть имеется следующий запрос общего типа:

Вопрос 3: «Назови точные требования к квалификации младшего научного сотрудника».

Ответ: «По контексту, точные требования к квалификации младшего научного сотрудника следующие: высшее профессиональное образование и опыт работы по специальности не менее 5 лет; наличие авторских свидетельств на изобретения или научных трудов; при наличии ученой степени — без предъявления требований к стажу работы. (Источник: полномочие о конкурсной комиссии)»

Из сопоставления ответов видно, что, несмотря на общий смысл вопросов 1, 2 и 3, система сгенерировала ответы, содержащие противоречивые сведения: «опыт работы по специальности не менее 5 лет» и «опыт работы по специальности не менее 3 лет». Это связано с тем, что в вопросах 1 и 2 содержатся ключевые слова, поэтому используются настройки, обеспечивающие нахождение точных фактов в документе. Вопрос 3 ключевых слов не содержит, поэтому система относит его к общему типу запросов. Ошибка в данном случае может быть вызвана неправильно выбранным фрагментом контекста (например, сведения берутся из требований к старшему научному сотруднику) или использованием знаний, которые были приобретены моделью в процессе ее обучения. Примеры демонстрируют повышение точности и релевантности генерируемых ответов при применении типизации запросов пользователя.

Далее приводится пример того, как ответ модели изменяется в зависимости от формулировки вопроса. Вопросы относились к документу «ПОЛОЖЕНИЕ о конкурсной комиссии ФИЦ КНЦ РАН и порядке ее работы при проведении конкурса на замещение должностей научных работников».

Вопрос 4: «О чем документ?»

Ответ: «Документ представляет собой полное описание правил и порядка формирования конкурсной комиссии ФИЦ КНЦ РАН, а также ее работы при проведении конкурсов на замещение должностей научных работников в этом учреждении. Основные темы и идеи этого документа:

- 1) общее описание состава и функций конкурсной комиссии;
- 2) порядок формирования конкурсной комиссии;
- 3) правила ее работы при проведении конкурсов.

В документе нет конкретных указаний на использование каких-либо методов или технологий. Документ не содержит важных выводов или результатов, поскольку его цель — определить порядок и правила проведения конкурсов в ФИЦ КНЦ РАН».

Вопрос 5: «В чем суть документа?»

Ответ: «Суть документа – это Положение о конкурсной комиссии ФИЦ КНЦ РАН и порядке ее работы при проведении конкурса на замещение должностей научных работников».

Видно, что в первом случае выдается, более развернутый ответ, чем во втором. Для устранения выявленных недостатков требуется либо дальнейшая «донастройка» модели с расширением множества типов запросов, либо переход к более мощным БЯМ.

Заключение

В статье представлены начальные этапы разработки системы интеллектуального поиска информации на сайте ФИЦ КНЦ РАН. Спроектирована архитектура системы и определены технологии (инструменты), используемые при построении ее основных структурных элементов. Разработан прототип системы, реализующий некоторые из предполагаемых функций интеллектуального поиска.

Разрабатываемая система нацелена на повышение релевантности ответов на пользовательские запросы, формулируемые на естественном языке и касающиеся содержимого сайта, а также электронной библиотеки (электронного хранилища документов) ФИЦ КНЦ РАН. Ответы также предоставляются на естественном языке с указанием ссылок на источники информации, если это требуется. Для поддержания диалога с пользователем применяются БЯМ. В ходе проведенных исследований было протестировано несколько языковых моделей, среди которых в условиях ограничений аппаратного обеспечения наилучшие результаты показала БЯМ «llama3.1:8b».

Для снижения негативного влияния возможных «галлюцинаций» БЯМ на результаты поиска предложено использовать RAG-технологии, которая позволяет сфокусироваться при построении ответа на той информации, которая потенциально представляет наибольший интерес для пользователя. Причем, как правило, это новая для БЯМ информация, которая не могла быть учтена в процессе обучения модели. Другими словами, в рамках RAG-технологии имеется возможность адаптировать поведение БЯМ с учетом необходимого контекста без дорогостоящей процедуры ее полного переобучения. Это особенно важно в рассматриваемых задачах интеллектуализации поиска, когда информация на сайте может оперативно добавляться и модифицироваться.

С целью исключения возможности передачи конфиденциальных сведений внешним сервисам (например, облачным платформам) было принято решение о локальном развертывании программной

системы на сервере ИИММ КНЦ РАН. Локальное развертывание системы совместно с применяемыми на сайте механизмами аутентификации пользователей обеспечивает требуемый уровень контроля доступа к информации, предотвращая ее несанкционированное использование.

Для повышения релевантности ответов на запросы в случае обработки больших корпусов текста, например при работе с электронной библиотекой ФИЦ КНЦ РАН, предлагается использовать технологии онтологического инжиниринга и промпт-инжиниринга. Для некоторых типов запросов разработаны специализированные промпты, позволяющие формулировать ответ в соответствии со спецификой запроса.

Проведенные эксперименты продемонстрировали применимость предлагаемых решений для рассматриваемых в статье задач интеллектуального поиска. Дальнейшие направления исследований связаны с выбором более мощной языковой модели, а также с реализацией дополнительных возможностей интеллектуализации сайта ФИЦ КНЦ РАН.

Авторы надеются, что получат отклик со стороны пользователей сайта ФИЦ КНЦ РАН в виде предложений относительно интересующих их задач, связанных с интеллектуализацией поиска.

Список источников

- Агенты искусственного интеллекта: Руководство по разработке.* / Ю. Цзяншу и др. М.: ДМК Пресс, 2025. 502 с.
- Использование RAG-технологии для создания интеллектуальной информационной системы поддержки исследовательского поиска* / А. Г. Олейник [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 3. С. 5–26. DOI 10.37614/2949.1215.2024.15.3.001.
- Федеральный исследовательский центр «Кольский Научный Центр» Российской академии наук [Электронный ресурс]. URL: www.ksc.ru/ (дата обращения: 01.02.2026).
- Шестаков А. В., Зуенко А. А.*, Применение RAG-технологии для автоматической генерации тестов и проверки знаний с поддержкой диалога на естественном языке // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 3. С. 56–70. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.000.
- Beautiful Soup* [Электронный ресурс]. URL: <https://beautiful-soup-4.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 13.01.2026).
- BERT* [Электронный ресурс]. URL: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert (дата обращения: 03.02.2026).
- Chains* [Электронный ресурс]. URL: <https://reference.langchain.com/v0.3/python/community/chains.html> (дата обращения: 04.02.2026).
- Configuring Chroma Collection.* [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.trychroma.com/docs/collections/configure> (дата обращения: 02.02.2026).
- Hugging Face Integration* [Электронный ресурс]. URL: https://docs.langchain.com/oss/python/integrations/text_embedding/huggingfacehub (дата обращения: 05.02.2026).
- Instructed integrations.* [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.langchain.com/oss/python/integrations/providers/unstructured> (дата обращения: 01.02.2026).
- Langchain Introduction* [Электронный ресурс]. URL: <https://python.langchain.com/docs/introduction/> (дата обращения: 15.01.2026).
- Langchain Text Splitters* [Электронный ресурс]. URL: https://reference.langchain.com/python/langchain_text_splitters/ (дата обращения: 05.02.2026)
- LitLLM: A Toolkit for Scientific Literature Review* // arXiv:2402.01788 [cs]. 2024.
- Llama3.1:8b* [Электронный ресурс]. URL: <https://ollama.com/library/llama3.1:8b> (дата обращения: 01.02.2026).
- Lxml – XML and HTML with Python* [Электронный ресурс]. URL: <https://lxml.de/> (дата обращения: 30.01.2026).
- Manning C. D.* Human Language Understanding & Reasoning // Daedalus. 2022. Vol. 151, № 2. P. 127–138.
- Mitchell M., Krakauer D.* The Debate Over Understanding in AI's Large Language Models // arXiv:2210.13966 [cs.LG], 2022.
- Neo4j* [Электронный ресурс]. URL: <https://neo4j.com/> (дата обращения: 27.01.2026).
- Ollama'a Documentation* [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.ollama.com/> (дата обращения: 01.02.2026).
- Phi3* [Электронный ресурс]. URL: <https://ollama.com/library/phi3> (дата обращения: 30.01.2026).
- Qwen2.5:3b* [Электронный ресурс]. URL: <https://ollama.com/library/qwen2.5:3b> (дата обращения: 01.02.2026).
- Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey* [Электронный ресурс] / Y. Gao et al. // ResearchGate URL: https://www.researchgate.net/publication/389004683_The_Survey_of_Retrieval-Augmented_Text_Generation_in_Large_Language_Models (дата обращения: 10.01.2026)
- SBERT* [Электронный ресурс]. URL: <https://developers.sber.ru/portal/products/sbert> (дата обращения: 07.02.2026).
- Tesseract User Manual* [Электронный ресурс]. URL: <https://tesseract-ocr.github.io/tessdoc/#tesseract-user-manual> (дата обращения: 29.01.2026)
- Try Chroma* [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.trychroma.com/> (дата обращения: 08.02.2026).

References

- Oleynik A. G., Datyev I. O., Zuenko A. A., Fedorov A. M., Shestakov A. V., Vishnyakov I. G. Using RAG technology to design an intelligent information system for support exploratory search *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2023, Vol. 15, No. 3, pp. 5–26. doi:10.37614/2949.1215.2024.15.3.001.
- Beautiful Soup*. Available at: <https://beautiful-soup-4.readthedocs.io/en/latest/> (accessed 13.01.2026).
- BERT*. Available at: https://huggingface.co/docs/transformers/model_doc/bert (accessed 03.02.2026).
- Chains*. Available at: <https://reference.langchain.com/v0.3/python/community/chains.html> (accessed 04.02.2026).
- Configuring Chroma Collection*. Available at: <https://docs.trychroma.com/docs/collections/configure> (accessed 02.02.2026).
- Czyanshu U. Agenty iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence Agents]. Moscow, DMK Press, 2025, 502 p. (In Russ.).
- Federal'nyj issledovatel'skij centr "Kol'skij Nauchnyj Centr" Rossijskoj akademii nauk* [Federal research centre "Kola Science Centre" of the Russian Academy of Sciences]. (In Russ.). Available at: www.ksc.ru/ (accessed 01.02.2026).
- Gao Y., Xiong Y., Gao X., Jia K., Pan J., Bi Y., Dai Y., Sun J., Wang H. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. Available at: https://www.researchgate.net/publication/389004683_The_Survey_of_Retrieval-Augmented_Text_Generation_in_Large_Language_Models (accessed 01.10.2025).
- Hugging Face Integration*. Available at: https://docs.langchain.com/oss/python/integrations/text_embedding/huggingfacehub (accessed 05.02.2026).
- Instructed integrations*. Available at: <https://docs.langchain.com/oss/python/integrations/providers/unstructured> (accessed 01.02.2026).
- Langchain Introduction*. Available at: <https://python.langchain.com/docs/introduction/> (accessed 15.01.2026).
- Langchain Text Splitters*. Available at: https://reference.langchain.com/python/langchain_text_splitters/ (accessed 05.02.2026).
- LitLLM: A Toolkit for Scientific Literature Review*. arXiv:2402.01788 [cs], 2024.
- llama3.1:8b*. Available at: <https://ollama.com/library/llama3.1:8b> (accessed 01.02.2026).
- Lxml* – XML and HTML with Python. Available at: <https://lxml.de/>. (accessed 30.01.2026).
- Manning C. D. Human Language Understanding & Reasoning. *Daedalus*, 2022, vol. 151, no. 2, pp. 127–138.
- Mitchell M., Krakauer D. The Debate Over Understanding in AI's Large Language Models arXiv:2210.13966 [cs.LG], 2022.
- Neo4j*. Available at: <https://neo4j.com/> (accessed 27.01.2026).
- Ollama'a Documentation*. Available at: <https://docs.ollama.com/> (accessed 01.02.2026).
- Phi3*. Available at: <https://ollama.com/library/phi3> (accessed 30.01.2026).
- Qwen2.5:3b*. Available at: <https://ollama.com/library/qwen2.5:3b> (accessed 01.02.2026).
- SBERT*. Available at: <https://developers.sber.ru/portal/products/sbert> (accessed 07.02.2026).
- Shestakov A. V., Zuenko A. A. Application of RAG technology for automated test generation and knowledge assessment with natural language dialogue support. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2025, Vol. 16, No. 3, pp. 56–70. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.3.004.
- Tesseract User Manual*. Available at: <https://tesseract-ocr.github.io/tessdoc/#tesseract-user-manual> (accessed 29.01.2026).
- Try Chroma*. Available at: <https://docs.trychroma.com/> (accessed 08.02.2026).

Информация об авторах

- А. В. Шестаков** — аспирант, стажер-исследователь;
А. А. Зуенко — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;
О. Н. Зуенко — младший научный сотрудник.

Information about the authors

- A. V. Shestakov** — Graduate Student, Intern Researcher;
A. A. Zuenko — PhD (Engineering), Leading Researcher;
O. N. Zuenko — Research Assistant.

Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 18.02.2026.
The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 18.02.2026; accepted for publication 18.02.2026.

