

ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)  
12+

# **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ**

**Том  
Vol. 48 № 3 2025**

# **EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE**

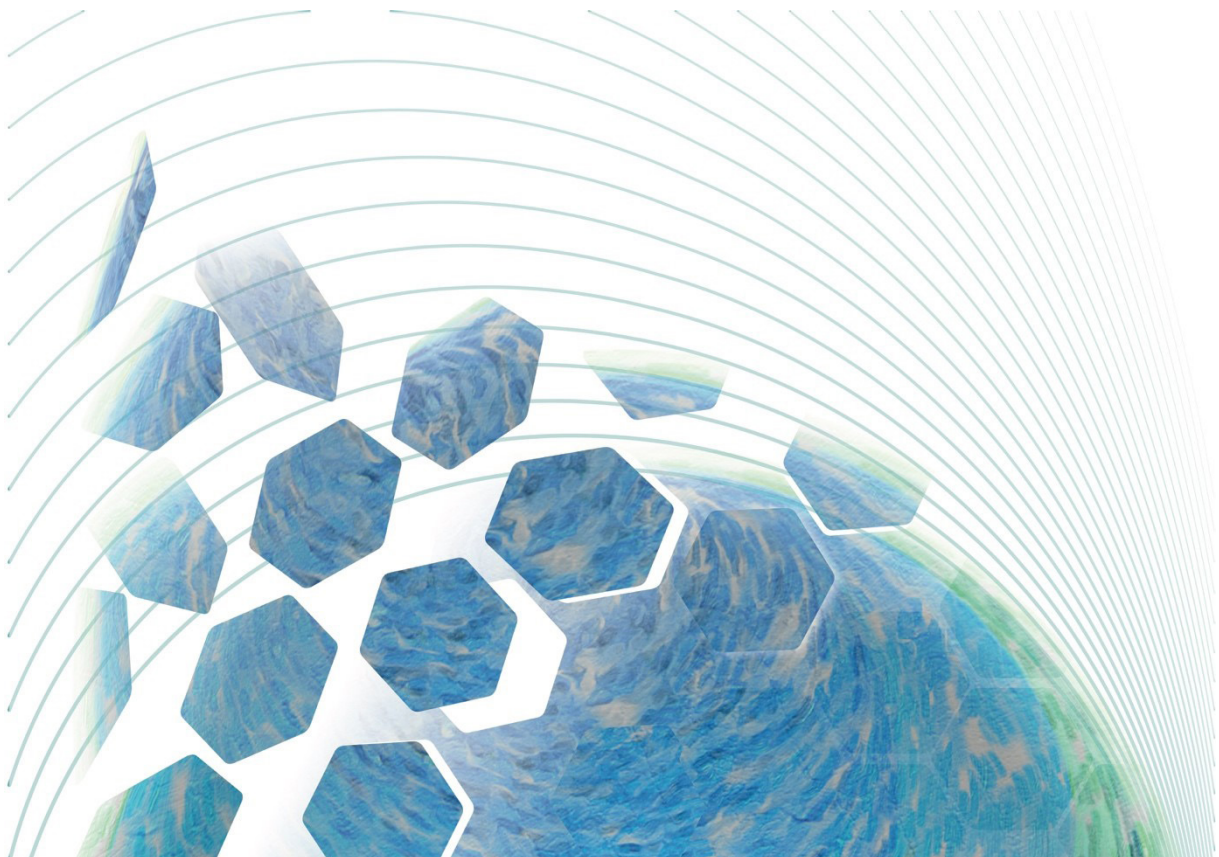
ISSN 2686-9993 (print)  
ISSN 2686-7931 (online)

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 48 № 3 2025  
Vol.

## EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

NAUKI O ZEMLE  
I NEDROPOL'ZOVANIE



## Редакционный совет

**Гладкочуб Д.П.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Скляр Е.В.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Гордиенко И.В.**, член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (Улан-Удэ, Россия)

**Корняков М.В.**, д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Корольков А.Т.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (Иркутск, Россия)

**Макаров В.А.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

**Очир Гэрэл**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (Улан-Батор, Монголия)

**Тальгамер Б.Л.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Ши Гуаньхай**, проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (Пекин, Китай)

**Чжао Цзюньмэн**, проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (Пекин, Китай)

**Чжан Юнчжань**, доктор наук, проф., Нанкинский университет (Нанкин, Китай)

**Шигин А.О.**, д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

**Семинский К.Ж.**, д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (Иркутск, Россия)

**Тимофеева С.С.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Зелинская Е.В.**, д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

**Морин А.С.**, д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (Красноярск, Россия)

*Председатель редакционного совета:*

**Семинский Ж.В.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

## Редакционная коллегия

*Главный редактор:*

**Паршин А.В.**, канд. геол.-минерал. наук, профессор практики, научный руководитель института «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

*Заместитель главного редактора:*

**Аузина Л.И.**, канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

*Ответственный секретарь:*

**Долгих М.Н.**, Иркутский национальный исследовательский технический университет (Иркутск, Россия)

Журнал «Науки о Земле и недропользование» входит в международные базы данных GeoRef и Chemical Abstracts Service (CAS), отнесен к уровню 2 «Белого списка» Единого государственного перечня научных изданий (ЕГПНИ), включен в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВИННИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в ООО «Урал-Пресс», подписной индекс в ООО «Урал-Пресс» – 41538 (адрес ООО «Урал-Пресс»: 620026, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 130, Россия). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

**Периодичность выхода** – ежеквартально

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Регистрационный номер:  
ПИ № ФС77-76110 от 24 июня 2019 г.

**Учредитель и издатель:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ») Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

**Издательство:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

**Адрес редакции:**

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83  
e-mail: nzn@istu.edu

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2025

## Editorial Council

**Gladkochub D.P.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Sklyarov E.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Gordienko I.V.**, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)

**Kornyakov M.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Korolkov A.T.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)

**Makarov V.A.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Ochir Gerel**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)

**Talgamer B.L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Shi Guanghai**, Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)

**Zhao Junmeng**, Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)

**Zhang Yongzhan**, Ph.D., Professor, Nanjing University (Nanjing, China)

**Shigin A.O.**, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**Seminsky K.Zh.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)

**Timofeeva S.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Zelinskaya E.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**Morin A.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

### *Chairman of the Editorial Council*

**Seminsky Zh.V.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

## Editorial Board

### *Editor-in-Chief*

**Parshin A.V.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Scientific Director of the Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### *Deputy Editor-in-Chief*

**Auzina L.I.**, Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

### *Executive secretary*

**Dolgikh M.N.**, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal «Earth sciences and subsoil use» is included in the **GeoRef and Chemical Abstracts Service databases, in the Unified State List of Scientific Publications – the «White List» (Level 2) and current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses of the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation.** It is also included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in CyberLeninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the Ural-Press LLC, the subscription code in Ural-Press LLC: 41538 (the postal address of Ural-Press LLC: 130 Mamin-Sibiriyak St., Yekaterinburg 620026, Russia). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Interuniversity collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

### Publication frequency

A quarterly journal

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor)  
Registration No.:  
ПИ no. ФС77-76110 of June 24, 2019

### Founder and Publisher

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University" 83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

### Publishing House

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University" 83A Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

### Editorial Office

83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia  
e-mail: nzn@istu.edu

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 2025



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Содержание</b> .....	270
<b>Бань Х., Рупосов В.Л., Жуликов В.М.</b> Сравнительный анализ эффективности метода точного позиционирования с использованием нескольких глобальных навигационных спутниковых систем (на англ. яз.).....	272
<b>Душкин Е.П., Акулова В.В., Рыбченко А.А.</b> Комплексный подход к лабораторным исследованиям деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов на примере обвальнo-осыпных отложений карьера «Айхал» (Якутия).....	281
<b>Канева Е.В.</b> Комплексный кристаллохимический анализ как этап минералого-технологической оценки руд твердых полезных ископаемых .....	296
<b>Кричинский А.К., Поспеев А.В.</b> Интеграция искусственного интеллекта в обработку геолого-геофизических данных при разведке твердых полезных ископаемых .....	310
<b>Марычева А.В., Сидоров М.Д., Пантелеймонова Т.В.</b> Исследование структуры и свойств грунтов по данным инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования на территории г. Петропавловска-Камчатского .....	321
<b>Матвеева И.В., Бузов С.А., Матвеев О.А., Шигарова Т.О.</b> Применение методики анализа массовой трещиноватости для оценки устойчивости массива горных пород Ирокиндинского золоторудного месторождения .....	335
<b>Павлюк Н.С., Макшаков А.С., Кравцова Р.Г.</b> Золотосодержащее серебро и самородное золото золото-серебряного месторождения Дукат .....	350
<b>Шергина О.В.</b> Оценка эколого-функциональных свойств почвенного покрова городских лесов Иркутской области .....	365
<b>К сведению авторов</b> .....	382



## C O N T E N T S

<b>Contents</b> .....	271
<b>Ban H., Ruposov V.L., Zhulikov V.M.</b> Comparative analysis of precise point positioning method performance integrating several global navigation satellite systems.....	272
<b>Dushkin E.P., Akulova V.V., Rybchenko A.A.</b> An integrated approach to laboratory studies of deformation and strength properties of man-made soils on example of landslide deposits of Aikhal open-pit mine (Yakutia).....	281
<b>Kaneva E.V.</b> Comprehensive crystal chemical analysis as a stage of mineralogical and technological assessment of solid mineral ores. ....	296
<b>Krichinsky A.K., Pospeev A.V.</b> Integration of artificial intelligence into geological and geophysical data processing in solid minerals exploration.....	310
<b>Marycheva A.V., Sidorov M.D., Panteleimonova T.V.</b> Investigation of soil structure and properties based on engineering seismic survey data for seismic microzoning in Petropavlovsk-Kamchatsky .....	321
<b>Matveeva I.V., Buzov S.A., Matveev O.A., Shigarova T.O.</b> Application of mass fracturing analysis to assess Irokinda gold deposit rock mass stability.....	335
<b>Pavlyuk N.S., Makshakov A.S., Kravtsova R.G.</b> Gold-bearing silver and native gold of the Dukat gold-silver deposit.....	350
<b>Shergina O.V.</b> Assessment of environmental and functional properties of Irkutsk region urban forest soil cover .....	365
<b>Information for the Authors</b> .....	382



Original article

EDN: VIEUPY

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-272-280



## Comparative analysis of precise point positioning method performance integrating several global navigation satellite systems

Haofei Ban<sup>a✉</sup>, Vitaliy L. Ruposov<sup>b</sup>, Vladimir M. Zhulikov<sup>c</sup><sup>a</sup>Henan Polytechnic University, Jiaozuo, China<sup>b,c</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Precise Point Positioning technology is a high-accuracy positioning method of global navigation satellite systems that can achieve centimeter-level positioning accuracy using one receiver and precise orbit and time information. Unlike differential positioning methods, which rely on ground reference stations, Precise Point Positioning provides greater global coverage and significantly higher operational efficiency. The advancement of four global navigation satellite systems – GPS (Global Positioning System), GLONASS (Global Navigation Satellite System), GALILEO (global navigation satellite system), BDS (BeiDou navigation satellite system) – resulted in significant improvements in all signal transmission structures and satellite constellation positioning notifications that expanded the capabilities achieved by the modernization of these systems. The purpose of the study is to investigate the Precise Point Positioning technology performance performance for the four specified global navigation satellite systems by comparing the time they took to converge within a user-defined accuracy, analysis of positioning accuracy, and evaluation of the satellites used to derive the positioning solution. The results of the study will expand knowledge about multi-system applications of global navigation satellite systems and serve as a basis for innovative development of high-precision navigation and positioning technologies for global navigation satellite systems in the fields of surveying, mapping, and autonomous driving.

**Keywords:** global navigation satellite systems, BeiDou navigation satellite system, GLONASS (global navigation satellite system), precise point positioning, satellite navigation

**For citation:** Ban H., Ruposov V.L., Zhulikov V.M. Comparative analysis of precise point positioning method performance integrating several global navigation satellite systems. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):272-280. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-272-280>. EDN: VIEUPY.

Научная статья

УДК 528.023

## Сравнительный анализ эффективности метода точного позиционирования с использованием нескольких глобальных навигационных спутниковых систем

Х. Бань<sup>a✉</sup>, В.Л. Рупосов<sup>b</sup>, В.М. Жуликов<sup>c</sup><sup>a</sup>Хэнаньский политехнический университет, Цзяоцзо, Китай<sup>b,c</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Технология точного точечного позиционирования (метод PPP, от англ.: Precise Point Positioning) представляет собой высокоточный метод позиционирования глобальных навигационных спутниковых систем, дает возможность определить местоположение сантиметровой точности с использованием только одного приемника и точной информации об орбите и времени. В отличие от методов дифференциального позиционирования метод PPP не зависит от наземных опорных станций, что обеспечивает большее глобальное покрытие и значительно повышает эксплуатационную эффективность. Благодаря усовершенствованию четырех глобальных навигационных спутниковых систем – GPS, ГЛОНАСС, GALILEO и BeiDou (BDS) – были значительно улучшены все структуры передачи сигналов, система оповещения о местоположении групп спутников и, следовательно, расширены возможности, достигнутые модернизацией этих систем. Целью проведенного исследования являлось изучение эффективности метода PPP для четырех указанных глобальных навигационных спутниковых систем на примере сравнения времени, необходимого для достижения заданной точности, оценки точности позиционирования и оценки спутников, используемых для получения решения о позиционировании. Результаты исследования расширят знания о мультисистемных приложениях глобальных навигационных спутниковых систем и послужат основой для инновационного развития технологий



высокоточной навигации и позиционирования данных систем в таких областях, как геодезия, картография и автономное вождение.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, навигационная спутниковая система BeiDou, ГЛОНАСС, точное позиционирование, спутниковая навигация

**Для цитирования:** Бань Х., Рупосов В.Л., Жуликов В.М. Сравнительный анализ эффективности метода точного позиционирования с использованием нескольких глобальных навигационных спутниковых систем // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 272–280. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-272-280>. EDN: VIEUPY.

## Introduction

Precise Point Positioning (PPP), as a high-precision method of Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning, can achieve centimeter-level accuracy using a single receiver with precise orbit and time products, essentially eliminating the reference station dependency required by standard differential methods [1–4]. Compared to Real-Time Kinematic and other relative positioning methods, PPP offers global availability without the need for a relatively high density ground infrastructure, which is advantageous for wide-area and remote applications.

PPP holds a number of advantages as it can provide global coverage with high operational efficiency and low requirements on the part of the user. For this reason, interest in using PPP approaches in both scientific and commercial applications is increasing.

As GNSS continue to develop and diversify, the landscape has evolved into four major global systems, including American Global Positioning System (GPS), Russian Global Navigation Satellite System (GLONASS), European Galileo Satellite Navigation System (GALILEO) and China's BeiDou Navigation Satellite System (BDS) [5–8]. Each of these systems continues to develop autonomously and is a part of a larger GNSS. In the early stages of 2023, GPS completed full deployment of its third generation of satellites, with the L5 band adding to signal quality, multipath mitigation, and capability in adverse environments. The GLONASS system was brought to full-constellation Code Division Multiple Access (CDMA) signal in 2022 to ameliorate the inter-frequency bias associated with its original Frequency Division Multiple Access (FDMA) system and for compatibility reasons. GALILEO is expected to achieve Full Operational Capability (FOC) in 2024, is providing multiple open and commercial services, with the most focus on the high-accuracy service on the E6 band and its potential to improve PPP. BDS-3 was the first GNSS to complete global networking in 2020 and, features an innovative

geostationary orbit (GSO), also referred to as a geosynchronous equatorial orbit (GEO), inclined geostationary orbit (IGSO) and medium earth orbit (MEO) constellation, enabling improved regional service capabilities and ensuring time and frequency synchronization performance.

Currently, multi-system integrated positioning has become a mainstream trend in GNSS technology development [9–12]. Multi-GNSS constellation support improves satellite availability, enhances the geometry of the position solution, and increases the reliability of GNSS, especially in urban-canyon or other signal obstructed environments. However, major differences among systems in terms of constellation configuration, signal structure, and the spatio-temporal reference frameworks have created new technical issues related to inter-system compatibility and interoperability, error modeling and performance optimization. Multisystem PPP processing will require more sophisticated approaches for modeling inter-system biases, weighting signals, and using inconsistent observation models.

In this study, we systematically assess the PPP estimation performance of the four major GNSS, either separately or combined, under the same processing frameworks. This study aims to provide theoretical underpinnings and practical technical references for integrated multi-system applications, and ultimately contribute to promoting the innovative development of high accuracy navigation and positioning technologies in fields such as surveying and mapping, precision agriculture, remote sensing, and autonomous driving.

## Materials and methods

*The satellite constellation structures of Global Navigation Satellite Systems.* GNSS employ carefully configured satellite constellations, characterized by distinct orbital altitudes, plane distributions, and inclination angles to optimize signal availability and system resilience. The following section elaborates on the key orbital parameters of these systems, including their constellation

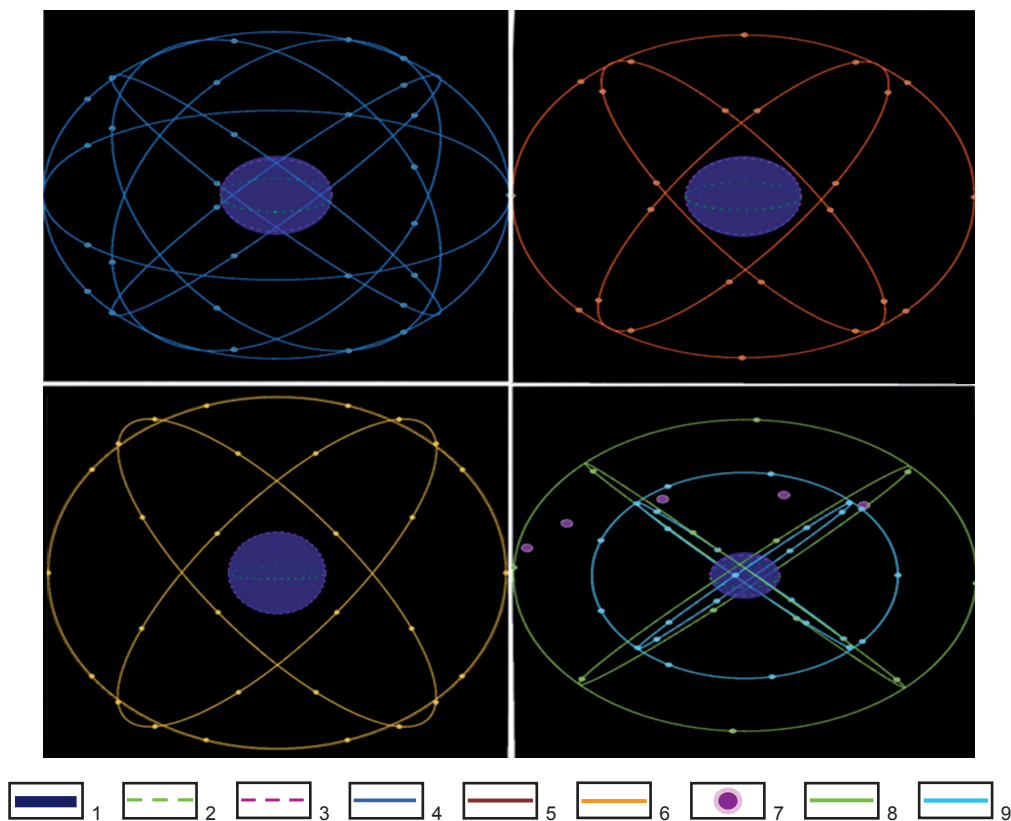
configurations, orbital planes, and backup strategies, highlighting the engineering considerations behind their design [13–15].

The GPS satellite navigation system of the American orbits at an altitude of about 20200 km. The whole system consists of 32 satellites distributed in six orbital planes. The inclination of the orbital plane of the satellite relative to the equatorial plane of the earth is 55 degrees, the right ascension of the ascending node of each orbital plane is 60 degrees, and the orbital period is 11 hours and 58 minutes (Fig. 1).

Russian GLONASS satellites orbit at an altitude of approximately 19100 km. The whole system consists of 26 satellites, which are distributed in three orbital planes. The orbital plane of the satellite has an orbital inclination of 64.8 degrees with respect to the equatorial plane of the Earth. The three orbital planes are 120 degrees apart, and the satellites in the same plane are 45 degrees apart, with an orbital period of 11 hours and 15 minutes (see Fig. 1).

The satellites of the European GALILEO satellite navigation system orbit at an altitude of 23616 km. The whole system consists of 32 satellites. The satellites are distributed in three orbital planes with an inclination of 56 degrees. The ascending nodes of the three orbits are 120 degrees apart on the equator, and the satellite has an operational period of 14 hours and 4 minutes. When a working satellite fails, the backup satellite will quickly enter the working position to replace its work, and the failed satellite will be transferred to an orbit 300 km higher than normal orbit (see Fig. 1).

China's BDS, which provides global services, adopts a mixed constellation composed of three kinds of orbit satellites. Compared with other satellite navigation systems, it has more high-orbit satellites and strong anti-occlusion capability, especially in low latitude areas. The whole system consists of 54 satellites, including 9 GEO satellites, 12 IGSO satellites and 33 MEO satellites. GEO satellites orbit at an altitude of 35786 km



**Fig. 1. Satellite constellation structures:**

- 1 – Earth; 2 – equator; 3 – prime meridian; 4 – GPS satellite; 5 – GLONASS satellite;  
6 – GALILEO satellite; 7 – BeiDou geostationary equatorial orbit;  
8 – BeiDou inclined geostationary orbital plane; 9 – BeiDou medium Earth orbit

**Рис. 1. Структуры групп спутников:**

- 1 – Земля; 2 – экватор; 3 – нулевой меридиан; 4 – спутник GPS; 5 – спутник ГЛОНАСС;  
6 – спутник ГАЛИЛЕО; 7 – геостационарная экваториальная орбита BeiDou;

- 8 – наклонная геостационарная орбитальная плоскость BeiDou; 9 – средняя околоземная орбита BeiDou



and are positioned at 58.75, 84, 110.5, 140 and 160 degrees East. The IGSO satellite has an orbital altitude of about 36000 km, three inclined synchronous orbital planes evenly distributed, an orbital inclination of 55 degrees, and three IGSO satellite sub-satellite point tracks coinciding with each other, with a crossing longitude of 118 degrees east longitude and a phase difference of 120 degrees. MEO satellites orbit at an altitude of 21500 km, with 27 satellites evenly distributed in three orbital planes with the inclination of 55 degrees (see Fig. 1).

*Comparison of Signal Characteristics among Global Navigation Satellite Systems.* Signal characteristics are important for assessing the performance and interoperability of a GNSS. Each major GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, and BDS) has developed different frequency patterns and modulation schemes designed around their objective and application requirements [16–18].

The GPS is a typical example, transmitting signals from three single frequencies, L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) and L5 (1176.45 MHz). Each frequency is the best representation of the system's capabilities. The L5 band has a relatively wide bandwidth of 24 MHz and uses Binary Phase Shift Keying (BPSK) [10] modulation to provide much improved code tracking accuracy and anti-interference capability. The L5 signal is approved for use within aeronautical radio navigation services Aeronautical Radio Navigation Services providing an assurance for any safety-critical applications such as aviation. The ability to add L2C and L1C signals also improved dual-frequency support and availability of signals.

In the same fashion, the BDS is also a tri-frequency system with B1I, B2a and B3I. Remember that B2a is aligned with GPS L5 and Galileo E5a to support seamless interoperability for multiple-system receivers. The BDS-3 system is also down to the modern B1C signal on 1575.42 MHz where it incorporates compatibility with GPS L1C and Galileo E1, which will allow for ease of combined tracking and signal resilience when operating under difficult conditions. Similar to the GNSS, there are also the BPSK and Binary Offset Carrier modulation types in BDS and which benefit multipath resilience and tracking accuracy.

The Galileo system offers four main signals: E1, E5a, E5b, and E6, but the guide is that the E5 signal utilizes Alternate Binary Offset Carrier modulation with an ultra-wide 51.15 MHz bandwidth, which will offer better code tracking performance and interference rejection. It also planned

to have open access, civilian priority, and redundancy in signals; therefore, it is well placed to support high-accuracy or commercial services.

The GLONASS system used FDMA, for the original L1 and L2 signals, in which the satellites, even within the same family of GNSS, are transmitting at slightly different frequencies. This FDMA design minimizes intra-system interference, while concurrently creating inter-frequency biases that could create difficulties in integration with other systems, (for example CDMA systems). In addition, the GLONASS satellites have moved towards the deployment of some modern CDMA signals, such as L3OC and, therefore, provide an improvement to interoperability and signal performance.

The differences in the frequency design of GNSS signals (i. e., frequency separation), modulation bandwidths, and access techniques, and how they affect positioning accuracy, signal robustness, and system compatibility. In particular, systems with wideband signals (e. g., GPS L5, Galileo E5) or multiple carrier frequencies tend to transmit a more robust signals, that better resist interference of multipath, and allow for better mitigation of the effect of ionospheric delay. The global community adopts multi-GNSS positioning, and continuing the unification of signal designs, and overlaps in frequency and time between GPS, Galileo and BDS particularly, is crucial to support precise and reliable navigation services globally.

*Precise Point Positioning Method.* PPP is an advanced standalone GNSS positioning technique that provides users with centimeter-level positioning accuracy from a single receiver. The positioning accuracy is possible because PPP employs precise satellite orbit and clock products, which must be supplied publicly through international data centers. The PPP modeling relies on mission products that correct satellite trajectory and ancillary errors. Operationally, PPP improves positioning accuracy because it only partially relies on either single-frequency or dual-frequency GNSS receiver data, unlike traditional differential GNSS methods that rely on differential data from common-range reference station or base station networks to reduce shared error characteristics between the instruments. Deploying PPP is key in support of applications where deploying a reference station is difficult or unfeasible in remote applications or global applications. Many fields benefit from the consistent and reliable positioning performance over a large-scale that PPP



represents because they have unlimited access to satellites and the expansive positioning performance of the GNSS. Fields that embrace a greater use of this technology include geodesy; surveying; precision agriculture; and autonomous vehicles. The advancements in precise satellite data and real time corrections mean there is an increasing interest in a strong alternative for positioning that PPP represents in the worldwide position community.

The pseudo-range and carrier phase observation equations for dual-frequency GNSS signals are formulated as:

$$P_r^s(f) = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s + I_r^s(f) + d_r^p(f) - d_s^p(f) - \varepsilon_p,$$

$$\Phi_r^s(f) = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s - I_r^s(f) + \lambda_f N_r^s + d_r^\phi(f) - d_s^\phi(f) - \varepsilon_\phi,$$

where  $f$  is frequency;  $P_r^s$  is geometric range;  $\delta t_r$  and  $\delta t^s$  are receiver and satellite clock errors;  $T_r^s$  is tropospheric delay;  $I_r^s$  is ionospheric delay;  $N_r^s$  is carrier phase ambiguity;  $d_r^p$  and  $d_s^p$  are pseudo-range hardware biases of receiver and satellite;  $d_r^\phi$  and  $d_s^\phi$  are phase hardware biases of receiver and satellite;  $\varepsilon_p$  and  $\varepsilon_\phi$  are measurement noise and multipath error.

During PPP processing, satellite positions and clock corrections are substituted with precise products provided by entities such as International GNSS Service (IGS). This improves positioning accuracy [19–20]. Ionospheric delays are reduced using dual-frequency ionosphere free

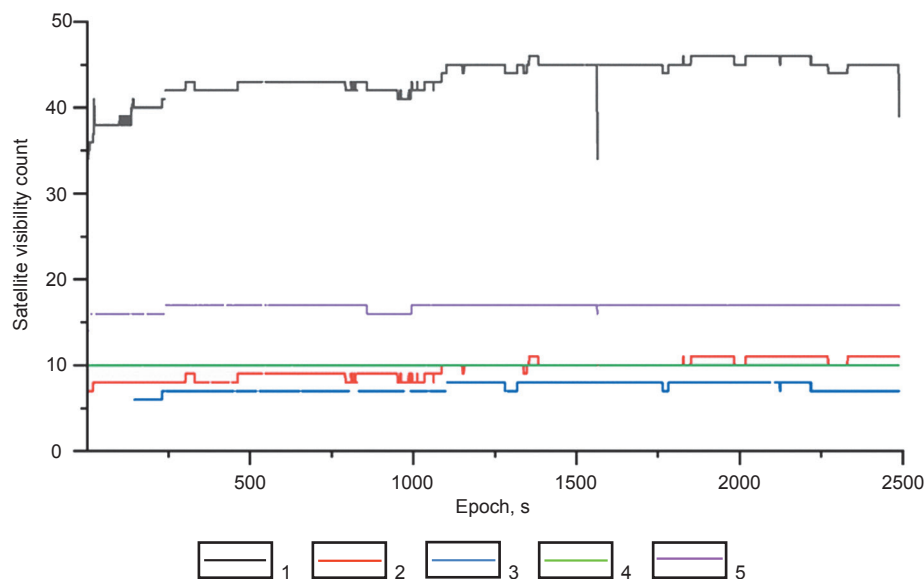
linear combinations or externally corrected using ionospheric models. Tropospheric delays are often treated as zenith wet delay parameters and projected using correct mapping functions. The estimated state vector will typically contain the receiver's three-dimensional coordinates, receiver clock bias, tropospheric delay parameters and carrier phase ambiguities. When using multi-frequency observations, the estimated state vector could also include parameters remediate inter-frequency biases.

## Results and discussion

The research systematically assesses PPP performance of the four main systems (GPS, GLONASS, GALILEO, and BDS) based on raw GNSS data collected by the UM982 chip produced by Unicore.

There are roughly 43 satellites in the multi-system solution. For the individual systems approximately 9 satellites are used for the GPS solution, 7 for GLONASS, 10 for GALILEO and 16 for BDS. This shows how many more satellites are available using a multi-system solution instead of any one individual system (Fig. 2).

Multi-system integration shows distinct advantages in positioning accuracy (Fig. 3). It can achieve decimeter-level accuracy in east (E), north (N) and up (U) directions in 3 minutes, centimeter accurate is achieved in 20 minutes. By contrast, GPS only takes 6 and 23 minutes, respectively for decimeter and centimeter-level



**Fig. 2. Number of satellites observed:**

1 – general; 2 – GPS; 3 – GLONASS; 4 – GALILEO; 5 – BeiDou

**Рис. 2. Количество наблюдаемых спутников:**

1 – общее; 2 – GPS; 3 – ГЛОНАСС; 4 – ГАЛИЛЕО; 5 – BeiDou



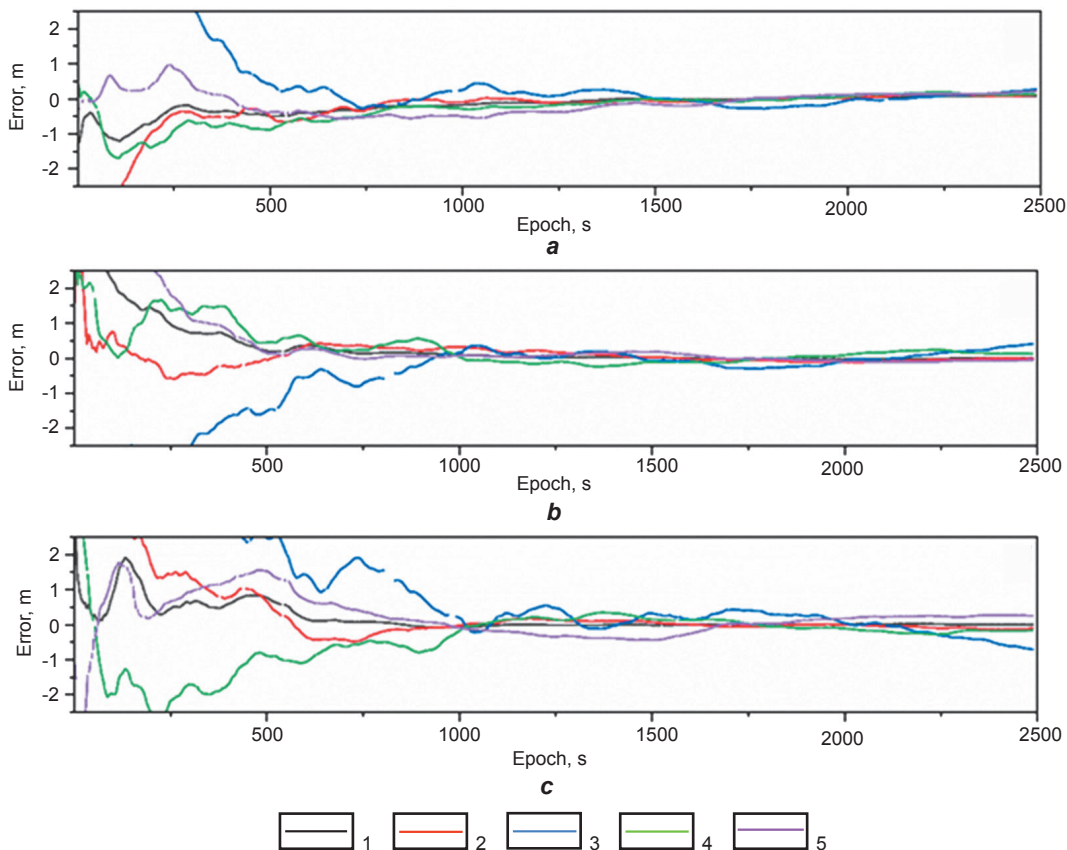
accuracy; GLONASS, which takes 11 minutes each for decimeter and centimeter accuracies; GALILEO, which takes 11 minutes for decimeter and 30 minutes for centimeter, and BDS with decimeter and centimeter accuracies in 10 and 28 minutes, respectively. Both GPS and BDS had the best local conditions for a rapid acquisition and high accuracy. GPS has the advantage of a mature constellation structure and high quality signals, which allows rapid convergence and high accuracy. BDS, because it is GEO+IGSO+MEO hybrid provides the best visibility of satellites worldwide. GLONASS requires a hybrid FDMA and CDMA access scheme, therefore, at a given time, fewer satellites can be accounted in your PPP solution, because of a sparse constellation, which requires a longer convergence time with slight differences in accuracy in comparison with GPS and BDS. GALILEO is currently limited in satellites, however the complex signal structure and wide-band Alternate Binary Offset Carrier modulation allows enhanced multipath suppression and anti-interference performance.

Therefore, the experiments performed suggest multi-system integration does not only increase the number of available satellites but also increases PPP convergence speed and final position accuracy.

**Conclusion**

This research systematically compares and analyzes the PPP positioning performance of the four major GNSS: GPS, GLONASS, GALILEO, and BDS. The experiments show that the integrated PPP (multi system PPP combination) approach can greatly increase the number of available satellites, reduce the time to reach a given positioning accuracy and lead to better positioning performance.

Both GPS and BDS show the best PPP positioning performance, achieving decimeter (or sub-decimeter, even centimeter) levels positioning at speeds of less than a minute and in an applicable quantity of areas. Due to the constellation layout and legal limitations on the use of GLONASS signals (i. e. result in less satellites being used),



**Fig. 3. Positioning error:**  
 a – east; b – north; c – up  
 1 – general; 2 – GPS; 3 – GLONASS; 4 – GALILEO; 5 – BeiDou  
**Рис. 3. Ошибка позиционирования:**  
 а – восток; b – север; c – вверх  
 1 – общая; 2 – GPS; 3 – ГЛОНАСС; 4 – ГАЛИЛЕО; 5 – BeiDou



GLONASS had a slightly slower convergence time and lower precision. GALILEO at the time of these experiments had a limited number of satellites but also had powerful anti-interference and multipath performance due to the advanced signal structure and wideband modulation.

Through the use of multi-system integrated PPP, an improvement in reliability, and an improvement of accuracy was versus a (not

multi-system system PPP only) system underway, and also an improvement in robustness in complex and changing environment. After the constellation, the signal, and the unit references of each system are optimized, we can notice that multi-system integrated PPP technology is increasingly enhancing navigation and positioning in all high-precision fields including surveying, autonomous driving, and intelligent transportation.

### References

1. Choi B.-K., Cho C.-H., Lee S.J. Multi-GNSS kinematic precise point positioning: some results in South Korea. *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*. 2017;6(1):35-41. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2017.6.1.35>.
2. Fan C., Yao Z., Wang S., Xing J. Pseudolite system-augmented GNSS real-time kinematic PPP. *Journal of Geodesy*. 2022;96:77. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01663-4>.
3. Gao Z., Zhang H., Ge M., Niu X., Shen W., Wickert J., et al. Tightly coupled integration of multi-GNSS PPP and MEMS inertial measurement unit data. *GPS Solutions*. 2017;21(2):377-391. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0527-z>.
4. Li Y., Cai C. A mixed single- and dual-frequency quad-constellation GNSS precise point positioning approach on Xiaomi Mi8 smartphones. *The Journal of Navigation*. 2022;75(4):849-863. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000145>.
5. Hamza V., Stopar B., Sterle O., Pavlovčič-Prešeren P. Recent advances and applications of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions*. 2025;29:56. <https://doi.org/10.1007/s10291-025-01815-x>.
6. Jin S., Meng X., Dardanelli G., Zhu Y. Multi-Global Navigation Satellite System for Earth observation: recent developments and new progress. *Remote Sensing*. 2024;16(24):4800. <https://doi.org/10.3390/rs16244800>.
7. Jin S., Wang Q., Dardanelli G. A review on Multi-GNSS for Earth observation and emerging applications. *Remote Sensing*. 2022;14(16):3930. <https://doi.org/10.3390/rs14163930>.
8. Hamza V., Stopar B., Sterle O., Pavlovčič-Prešeren P. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions*. 2024;28:149. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01686-8>.
9. An X., Meng X., Jiang W. Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination. *Satellite Navigation*. 2020;1:7. <https://doi.org/10.1186/s43020-020-0009-x>.
10. Liang K., Hao S., Yang Z., Wang J. A Multi-Global Navigation Satellite System (GNSS) time transfer method with Federated Kalman Filter (FKF). *Sensors*. 2023;23(11):5328. <https://doi.org/10.3390/s23115328>.
11. Ren X., Zhang X., Xie W., Zhang K., Yuan Y., Li X. Global ionospheric modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS. *Scientific Reports*. 2016;6:33499. <https://doi.org/10.1038/srep33499>.
12. Yoo W.J., Kim L., Lee Y.D., Lee T.G., Lee H.K. Design and implementation of SDR-based multi-constellation multi-frequency real-time A-GNSS receiver utilizing GPGPU. *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*. 2021;10(4):315-333. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.4.315>.
13. Chen J., Wang J., Zhang Y., Yang S., Chen Q., Gong X. Modeling and assessment of GPS/BDS combined precise point positioning. *Sensors*. 2016;16(7):1151. <https://doi.org/10.3390/s16071151>.
14. Gao M., Cao Z., Meng Z., Tan C., Zhu H., Huang L. Algorithms research and precision comparison of different frequency combinations of BDS-3/GPS/Galileo for precise point positioning in Asia-Pacific region. *Sensors*. 2023;23(13):5935. <https://doi.org/10.3390/s23135935>.
15. Hou Z., Zhou F. Assessing the performance of precise point positioning (PPP) with the fully serviceable multi-GNSS constellations: GPS, BDS-3, and Galileo. *Remote Sensing*. 2023;15(3):807. <https://doi.org/10.3390/rs15030807>.
16. Liu W., Liu J., Xie J., Jiao B. Signal-in-space range error of the global BeiDou Navigation Satellite System and comparison with GPS, GLONASS, Galileo, and QZSS. *Journal of Surveying Engineering*. 2023;149(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000413](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000413).
17. Zhang Z., Pan L. Current performance of open position service with almost fully deployed multi-GNSS constellations: GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2, and BDS-3. *Advances in Space Research*. 2022;69(5):1994-2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.002>.
18. Zheng Y., Zheng F., Yang C., Nie G., Li S. Analyses of GLONASS and GPS plus GLONASS precise positioning performance in different latitude regions. *Remote Sensing*. 2022;14(18):4640. <https://doi.org/10.3390/rs14184640>.
19. Hou P., Zha J., Liu T., Zhang B. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK. *Measurement Science and Technology*. 2023;34(5):051002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acb78c>.
20. Zhao Q., Guo J., Zuo H., Gong X., Guo W., Gu S. Comparison of time transfer of IF-PPP, GIM-PPP, and RIM-PPP. *GPS Solutions*. 2023;27:99. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01424-6>.

### Список источников

1. Choi B.-K., Cho C.-H., Lee S.J. Multi-GNSS kinematic precise point positioning: some results in South Korea // *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*. 2017. Vol. 6. Iss. 1. P. 35–41. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2017.6.1.35>.



2. Fan C., Yao Z., Wang S., Xing J. Pseudolite system-augmented GNSS real-time kinematic PPP // *Journal of Geodesy*. 2022. Vol. 96. P. 77. <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01663-4>.
3. Gao Z., Zhang H., Ge M., Niu X., Shen W., Wickert J., et al. Tightly coupled integration of multi-GNSS PPP and MEMS inertial measurement unit data // *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21. Iss. 2. P. 377–391. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0527-z>.
4. Li Y., Cai C. A mixed single- and dual-frequency quad-constellation GNSS precise point positioning approach on Xiaomi Mi8 smartphones // *The Journal of Navigation*. 2022. Vol. 75. Iss. 4. P. 849–863. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000145>.
5. Hamza V., Stopar B., Sterle O., Pavlovčič-Prešeren P. Recent advances and applications of low-cost GNSS receivers: a review // *GPS Solutions*. 2025. Vol. 29. P. 56. <https://doi.org/10.1007/s10291-025-01815-x>.
6. Jin S., Meng X., Dardanelli G., Zhu Y. Multi-Global Navigation Satellite System for Earth observation: recent developments and new progress // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. Iss. 24. P. 4800. <https://doi.org/10.3390/rs16244800>.
7. Jin S., Wang Q., Dardanelli G. A review on Multi-GNSS for Earth observation and emerging applications // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 16. P. 3930. <https://doi.org/10.3390/rs14163930>.
8. Hamza V., Stopar B., Sterle O., Pavlovčič-Prešeren P. Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review // *GPS Solutions*. 2024. Vol. 28. P. 149. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01686-8>.
9. An X., Meng X., Jiang W. Multi-constellation GNSS precise point positioning with multi-frequency raw observations and dual-frequency observations of ionospheric-free linear combination // *Satellite Navigation*. 2020. Vol. 1. P. 7. <https://doi.org/10.1186/s43020-020-0009-x>.
10. Liang K., Hao S., Yang Z., Wang J. A Multi-Global Navigation Satellite System (GNSS) time transfer method with Federated Kalman Filter (FKF) // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 11. P. 5328. <https://doi.org/10.3390/s23115328>.
11. Ren X., Zhang X., Xie W., Zhang K., Yuan Y., Li X. Global ionospheric modelling using Multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 33499. <https://doi.org/10.1038/srep33499>.
12. Yoo W.J., Kim L., Lee Y.D., Lee T.G., Lee H.K. Design and implementation of SDR-based multi-constellation multi-frequency real-time A-GNSS receiver utilizing GPGPU // *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*. 2021. Vol. 10. Iss. 4. P. 315–333. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.4.315>.
13. Chen J., Wang J., Zhang Y., Yang S., Chen Q., Gong X. Modeling and assessment of GPS/BDS combined precise point positioning // *Sensors*. 2016. Vol. 16. Iss. 7. P. 1151. <https://doi.org/10.3390/s16071151>.
14. Gao M., Cao Z., Meng Z., Tan C., Zhu H., Huang L. Algorithms research and precision comparison of different frequency combinations of BDS-3/GPS/Galileo for precise point positioning in Asia-Pacific region // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Iss. 13. P. 5935. <https://doi.org/10.3390/s23135935>.
15. Hou Z., Zhou F. Assessing the performance of precise point positioning (PPP) with the fully serviceable multi-GNSS constellations: GPS, BDS-3, and Galileo // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. Iss. 3. P. 807. <https://doi.org/10.3390/rs15030807>.
16. Liu W., Liu J., Xie J., Jiao B. Signal-in-space range error of the global BeiDou Navigation Satellite System and comparison with GPS, GLONASS, Galileo, and QZSS // *Journal of Surveying Engineering*. 2023. Vol. 149. Iss. 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000413](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000413).
17. Zhang Z., Pan L. Current performance of open position service with almost fully deployed multi-GNSS constellations: GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2, and BDS-3 // *Advances in Space Research*. 2022. Vol. 69, Iss. 5. P. 1994–2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.12.002>.
18. Zheng Y., Zheng F., Yang C., Nie G., Li S. Analyses of GLONASS and GPS plus GLONASS precise positioning performance in different latitude regions // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. Iss. 18. P. 4640. <https://doi.org/10.3390/rs14184640>.
19. Hou P., Zha J., Liu T., Zhang B. Recent advances and perspectives in GNSS PPP-RTK // *Measurement Science and Technology*. 2023. Vol. 34. Iss. 5. P. 051002. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/acb78c>.
20. Zhao Q., Guo J., Zuo H., Gong X., Guo W., Gu S. Comparison of time transfer of IF-PPP, GIM-PPP, and RIM-PPP // *GPS Solutions*. 2023. Vol. 27. P. 99. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01424-6>.

#### Information about the authors / Информация об авторах



**Haofei Ban,**

Ph.D. (Surveying & Geoinformation),  
School of Surveying and Geoinformation Engineering,  
Henan Polytechnic University,  
Jiaozuo, China,  
✉ [bhf@home.hpu.edu.cn](mailto:bhf@home.hpu.edu.cn)  
<https://orcid.org/0000-0002-9631-2716>

**Бань Хаофэй,**

кандидат наук в области геодезии и картографии,  
Школа геодезии и геоинформационной инженерии,  
Хэнаньский политехнический университет,  
г. Цзяоцзо, Китай,  
✉ [bhf@home.hpu.edu.cn](mailto:bhf@home.hpu.edu.cn)  
<https://orcid.org/0000-0002-9631-2716>

**Vitaliy L. Ruposov,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Mine Surveying and Geodesy,  
Institute of Subsoil Use,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
ruposov@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>

**Рупосов Виталий Леонидович,**

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,  
доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии,  
Институт недропользования,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
ruposov@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0003-2202-9034>

**Vladimir M. Zhulikov,**

Student,  
Baikal School of BRICS,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
vladmir.zhulikov@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-3637-9567>

**Жуликов Владимир Михайлович,**

студент,  
Байкальский институт БРИКС,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
vladmir.zhulikov@bk.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-3637-9567>

**Contribution of the authors / Вклад авторов**

Haofei Ban – investigation, methodology, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

Vitaliy L. Ruposov – conceptualization, project administration, resources.

Vladimir M. Zhulikov – data curation, writing – editing.

Х. Бань – проведение исследования, разработка методологии, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

В.Л. Рупосов – разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов.

В.М. Жуликов – курирование данных, редактирование рукописи.

**Conflict of interests / Конфликт интересов**

The authors declare no conflicts of interests.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Information about the article / Информация о статье**

The article was submitted 30.04.2025; approved after reviewing 30.05.2025; accepted for publication 19.06.2025.

Статья поступила в редакцию 30.04.2025; одобрена после рецензирования 30.05.2025; принята к публикации 19.06.2025.



Научная статья

УДК 624.131.43

EDN: DGQEAM

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295



## Комплексный подход к лабораторным исследованиям деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов на примере обвально-осыпных отложений карьера «Айхал» (Якутия)

Е.П. Душкин<sup>a,✉</sup>, В.В. Акулова<sup>b</sup>, А.А. Рыбченко<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**Резюме.** Эффективность отработки подкарьерных запасов алмазных кимберлитовых трубчатых Якутии во многом определяется состоянием техногенных предохранительных массивов. Обычно они представляют собой рудоподородную подушку, а иногда – рудный целлик, перекрытый техногенно измененными и переотложенными грунтами, которые сформировались в результате интенсификации выветривания и развития гравитационных процессов (осыпей, обвалов, оползней и др.) в бортах карьера. Целью проведенного исследования являлась комплексная оценка деформационно-прочностных свойств техногенных обвально-осыпных отложений, сформированных на дне карьера «Айхал» и определяющих безопасность ведения подземных горных работ. Лабораторные исследования грунтов включали гранулометрический, минералого-петрографический, химический, геомеханический и другие анализы. Дополнительно проведены экспериментальные исследования деформационного потенциала обломочных и дисперсных грунтов. Реализация комплексного подхода к исследованию техногенных отложений позволила выявить их особенности, заключающиеся в высокой степени неоднородности их состояния и свойств. Грунты представлены преимущественно щебнем и дресвой с супесчано-суглинистым заполнителем. Крупнообломочный материал характеризуется широким спектром показателей выветрелости и прочности (от слабо- до сильновыветрелых и от прочных до малопрочных). Наличие малопрочных обломков в составе отложений способствует их преждевременному разрушению. Тонкодисперсные грунты отличаются аномально низкими значениями деформационно-прочностных параметров, что позволило характеризовать их как структурно-неустойчивые, склонные к проявлению текучести.

**Ключевые слова:** техногенные грунты, обвально-осыпные отложения, Айхал, деформационно-прочностные свойства, лабораторные исследования

**Финансирование:** Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2024-533, проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

**Для цитирования:** Душкин Е.П., Акулова В.В., Рыбченко А.А. Комплексный подход к лабораторным исследованиям деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов на примере обвально-осыпных отложений карьера «Айхал» (Якутия) // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 281–295. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295>. EDN: DGQEAM.

Original article

## An integrated approach to laboratory studies of deformation and strength properties of man-made soils on example of landslide deposits of Aikhal open-pit mine (Yakutia)

Egor P. Dushkin<sup>a,✉</sup>, Varvara V. Akulova<sup>b</sup>, Artem A. Rybchenko<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The efficiency of mining the underground reserves of diamond kimberlite pipes in Yakutia is largely determined by the condition of man-made protective massifs. These typically consist of an ore cushion, or sometimes an ore pillar, overlain by man-made altered and redeposited soils formed as a result of intensified weathering and development of gravitational processes (talus, rock falls, landslides, etc.) within the quarry walls. The purpose of this study is to comprehensively assess the deformation

© Душкин Е.П., Акулова В.В., Рыбченко А.А., 2025



and strength properties of man-made landslide deposits formed at the bottom of the Aikhal open-pit mine and determining the safety of underground mining operations. Laboratory studies of soils included granulometric, mineralogical-petrographic, chemical, geomechanical, and other types of analyses. Additionally, experimental studies of the deformation potential of detrital and dispersed soils were conducted. The use of an integrated approach to studying man-made sediments revealed their distinctive features, including a high degree of heterogeneity in their state and properties. The soils are composed primarily of crushed rock and gravel with sandy loam aggregate. The coarse-grained material is characterized by a wide range of weathering and strength parameters (from slightly to highly weathered and from strong to soft). The presence of soft fragments in the composition of sediments contributes to their premature destruction. Fine-grained soils are characterized by abnormally low values of deformation and strength parameters, which allowed them to be characterized as structurally unstable and prone to yielding.

**Keywords:** technogenic soils, landslide deposits, Aikhal, deformation and strength properties, laboratory studies

**Funding:** The study was supported by the Russian Ministry of Education and Science (grant no. 075-15-2024-533, project “Fundamental research of the Baikal natural territory based on a system of interrelated basic methods, models, neural networks and a digital platform of environmental monitoring”). The work was conducted using the equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth’s Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Dushkin E.P., Akulova V.V., Rybchenko A.A. An integrated approach to laboratory studies of deformation and strength properties of man-made soils on example of landslide deposits of Aikhal open-pit mine (Yakutia). *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):281-295. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-281-295>. EDN: DGQEAM.

### Введение

В результате инженерно-хозяйственной деятельности человека, представленной различными видами строительных, горнодобывающих, сельскохозяйственных и других работ, на поверхности литосферы происходит формирование новых или же преобразование под внешним воздействием уже существующих грунтовых толщ. Такие «новообразования» представлены преимущественно двумя группами отложений: отходами человеческой деятельности (промышленными и бытовыми) и культурными слоями, преобразованными в строительных и производственных целях природными отложениями. К первой группе можно отнести различные отвалы шлаков и золошлаков, гидроотвалы, свалки и т. п., ко второй – железнодорожные насыпи, земляные плотины, дамбы, карьеры, шахты и т. д.<sup>1</sup> Грунты такого типа называются техногенными.

Техногенные образования, как и природные, могут быть представлены скальными, дисперсными (связными и несвязными), а также мерзлыми грунтами. Согласно инженерно-геологической типизации, представленной в ГОСТ 25100-2020<sup>2</sup>, по генетическому принципу они подразделяются на измененные в естественном залегании, перемещенные и антропогенные, а в случае мерзлых типов пород – дополнительно на антропогенные льды и ледогрунты. Каждый тип, в свою очередь, делится на несколько видов в зависимости от

способа своего формирования или изменения. Так, например, измененные в естественном залегании грунты могут быть физически и физико-химически измененными, перемещенные – насыпными и намывными, а антропогенные – отходами производств и бытовыми отходами (в том числе к ним относятся и культурные слои). Группа мерзлых грунтов по способу формирования представлена отложениями, преимущественно созданными путем изменения теплового режима.

Наибольший объем техногенных отложений формируется преимущественно на урбанизированных и промышленных территориях<sup>3</sup>. К началу XXI века их мировой объем только в результате горнотехнической и строительной деятельности достиг 1500 млрд м<sup>3</sup>, при этом общий объем промышленных отходов уже составлял свыше 1 млрд т в год [1]. В настоящее время оценить общий объем техногенных отложений практически невозможно, однако точно можно сказать, что он достаточно велик и существует выраженная тенденция к его росту [2, 3].

В связи с необратимым увеличением объема техногенных грунтов, а также их специфическими особенностями (неоднородный минеральный / гранулометрический состав, пространственно-временные изменения физического состояния и деформационно-прочностных свойств) значительно возросло количество как отечественных, так и зарубежных исследований, направленных на

<sup>1</sup> Васильчук Ю.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Королев В.А., Трофимов В.Т. Грунтоведение: учебник для студентов вузов / под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во МГУ. 2005. 1024 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 42 с.

<sup>3</sup> Передельский Л.В., Приходченко О.Е. Инженерная геология: учебник для студентов вузов. Ростов н/Д.: Феникс, 2009. 465 с.



изучение данного типа отложений в рамках научных и прикладных целей [4–7].

Изучение различных типов грунтов, в том числе и техногенных, осуществляется в процессе проведения полевых и лабораторных исследований, выполняемых, как правило, по стандартным методикам, указанным в государственных стандартах и других нормативных документах [8]. Однако стоит учитывать, что нормативные документы разработаны преимущественно для природных отложений и в них не всегда принимаются во внимание особенности некоторых типов техногенных грунтов. В зависимости от объекта исследования, условий его местонахождения и типа слагающих образований, а также выполняемых им функций необходимо проводить целый комплекс лабораторных работ, включающий в себя помимо стандартных исследований также дополнительные и экспериментальные. Реализация подобного комплекса позволит выявить специфические особенности техногенных грунтов.

В данной работе рассматриваются методика и результаты применения такого подхода при исследовании техногенных грунтов одного из изучаемых нами объектов алмазодобывающей промышленности Якутии.

### Материалы и методы исследования

*Объект и материалы исследования.* В качестве объекта для исследования была выбрана кимберлитовая трубка «Айхал» и сформированные на дне одноименного карьера техногенные грунты, представляющие собой обвальное-осыпные отложения. В административном плане трубка расположена на территории Мирнинского района республики Саха (Якутия) и относится к Алакит-Мархинскому кимберлитовому полю, расположенному в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазодобывающего района. Данная территория характеризуется широким распространением многолетнемерзлых пород, при этом мощность криолитозоны достигает 720 м [9, 10].

Трубка представляет собой крутопадающее сплюснуто-трубчатое тело, сложенное разновозрастными кимберлитовыми брекчиями. Она прорывает субгоризонтально залегающие карбонатные и терригенно-карбонатные отложения нижнего палеозоя (доломиты, мергели, алевролиты, песчаники и др.) [11].

На дне карьера обводненные за счет атмосферных осадков, паводковых, а также

подземных минерализованных вод обвальное-осыпные отложения сформировали опасный водный объект, наличие которого представляет угрозу для ведения подземных горных работ. Для обеспечения безопасности их проведения был оставлен временный предохранительный рудный целик [12–14].

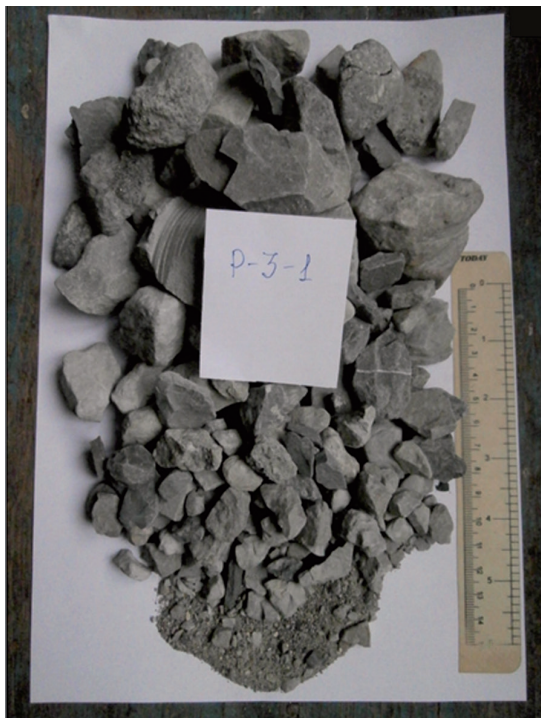
В качестве материала для исследования были использованы пробы грунта обвальное-осыпных отложений карьера «Айхал», отобранные в процессе бурения опытных скважин Айхальского горно-обогатительного комбината в период с января по апрель 2022 года. В рамках выполнения хозяйственных работ с институтом «Якутнипроалмаз» в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук был проведен комплекс лабораторных исследований их состава, состояния и свойств.

*Методика исследования.* Поскольку техногенный массив сформирован из отложений, изначально отличающихся друг от друга по составу или состоянию, то и сами техногенные грунты обладают разнородным составом, состоянием и свойствами. Для более корректной их характеристики применяется комплексный подход, заключающийся в выделении имеющихся литологических разностей и детальной оценке их физического состояния и деформационного потенциала [15].

Визуально исследуемые отложения можно разделить две группы:

- 1) крупнообломочные грунты – обломки вмещающих горных пород и слабосцементированные обломки;
- 2) тонкодисперсные грунты – песчано-пылевато-глинистый материал (рис. 1).

Тонкодисперсные грунты, присутствующие в обвальное-осыпном массиве, при повышенной обводненности могут проявлять опасные реологические свойства (ползучесть, релаксация при повышении напряжений и др.). Наличие такого «опасного» материала, находящегося в водном объекте на дне карьера, в дальнейшем приведет к возникновению аварийной ситуации, сопровождающейся неконтролируемым выходом обводненной дисперсной массы в точки выпуска руды. Увеличению его количества помимо осыпания с бортов карьера способствует также разрушение глыб и крупных обломков, особенно малопрочных (выветрелые, трещиноватые и т. д.) в результате воздействия на них внешних факторов [16]. В связи с этим исследование направлено, прежде всего, на оценку потенциала



a



b

**Рис. 1. Внешний вид исследуемых техногенных грунтов:**

a – щебень с пылевато-песчаным заполнителем; b – супесь с включениями щебня

**Fig. 1. Appearance of studied man-made soils:**

a – crushed stone with silty sand aggregate; b – sandy loam with crushed stone inclusions

прочности (устойчивости) обломочного и проявления реологических свойств песчано-пылевато-глинистого материала.

**Крупнообломочные грунты.** Определение их гранулометрического состава проводилось методом ситового отсева с использованием стандартного набора сит. Для характеристики минералогического состава пород выполнялся петрографический (шлифовый) анализ.

В случае исследуемых обвално-осыпных отложений среди механических свойств обломков, наиболее отражающих их потенциал к разрушению, рассмотрены выветрелость, истираемость, водоустойчивость и морозостойкость.

Определение деформационно-прочностных параметров проводилось по методикам, указанным в ГОСТ Р 70257-2022<sup>4</sup>. Коэффициенты выветрелости  $K_{wrt}$  и истираемости  $K_{fr}$  получены по результатам испытаний образцов циклами вращения в полочном барабане.

Поскольку исследуемые отложения обводнены и постоянно находятся в контакте с водной средой, были проведены экспериментальные исследования, направленные на выявление характера взаимодействия обломков с данной

средой в системах «порода – вода» и «порода – рассол». Для оценки пористости, скрытой трещиноватости и потенциальной морозостойкости во время эксперимента дополнительно определялся показатель водопоглощения  $W_r$ .

Экспериментальные образцы-дубликаты неправильной формы размером 5 см были помещены в контейнеры, наполненные водой и хлоридным кальциево-магниевым рассолом с минерализацией 98 г/л. В течение нескольких недель визуально фиксировались изменения.

Образцы, находящиеся в воде и рассоле, без видимых признаков разрушения были подвергнуты нескольким циклам заморзания-оттаивания с целью оценки их морозостойкости. Заморозка проходила в морозильной камере при температуре от -25 до -30 °С в течение суток, оттаивание – при комнатной температуре 20–25 °С в течение нескольких часов.

Для слабосцементированных агрегатов дополнительно определялась их водоустойчивость на приборе для размокания грунтов ПРГ-1: замерялись скорость и характер их размокания.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 70257-2022. Грунты. Метод определения истираемости крупнообломочных грунтов (включений) в полочном барабане. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 12 с.



**Тонкодисперсные грунты.** Гранулометрический состав этой группы определен пипеточным методом с полудисперсной подготовкой образцов (предварительное кипячение с аммиаком), а минералогический – методом порошковой дифракции (объединяющим качественный (фазовый) и полуколичественный рентгеновский анализ) на дифрактометре ДРОН-3.0. Дополнительно по данным химического анализа водных, солянокислых и щелочных вытяжек методом Бобко – Аскинази исследовался состав и содержание таких структуроформирующих компонентов, как водорастворимые соли, полуторные оксиды и карбонаты<sup>5</sup>. Для оценки структурных связей и классификации исследуемых отложений по типам их потенциальной плавунности определялся седиментационный объем  $V$ .

Основные деформационно-прочностные параметры получены по стандартным методикам, указанным в ГОСТ 12248.1-2020<sup>6</sup> и ГОСТ 12248.3-2020<sup>7</sup>. Значения угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $C$  для глинистых образцов различной консистенции установлены по результатам испытаний, проведенным методом одноплоскостного среза. Модуль деформации  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  для образцов пластичной консистенции (влажность грунта  $W = 20,8\%$ , плотность грунта  $\rho = 2,01\text{ г/см}^3$ ) определен методом трехосного сжатия при разном боковом давлении (100, 200, 300 КПа). Испытания проводились на автоматизированном испытательном комплексе АСИС (ООО «НПП Геотек», Россия). Для оценки влагоемкости и водопроницаемости определены относительная деформация набухания  $E_{sw}$ , объемная усадка  $\delta_v$  и коэффициент фильтрации  $K_f$ . Испытания проведе-

ны на образцах ненарушенной и нарушенной структуры (пасты).

Экспериментальное исследование подвижности техногенной грунтовой массы при разной степени влажности проведено с использованием метода конуса Абрамса. Достаточно большой объем конуса, а также его форма, позволяют наглядно отследить изменение состояния исследуемых отложений при увеличении влажности и четко зафиксировать момент проявления ими реологических свойств. Предварительно подготовлена опытная рыхлая грунтовая масса супесчано-суглинистого материала с включением щебня (таблица). Для проведения испытаний с учетом присутствия в экспериментальном образце повышенного содержания глинистой фракции выбран следующий шаг расчетной влажности – грунты в воздушно-сухом состоянии ( $W = 1,4\%$ ,  $\rho = 1,43\text{ г/см}^3$ ), 10, 15, 20, 25, 27, 30, 32, 35 и 40 %.

### Результаты исследования и их обсуждение

**Крупнообломочные грунты.** Эта группа представлена щебенистым (обломки размером более 10 мм составляют 61–83 % от массы образца) и дресвяно-щебенистым (обломки размером 2–10 мм составляют 52–58 %) материалом. По результатам описания шлифов среди обломков распространены преимущественно доломиты, редко встречаются долериты. Содержание доломита в шлифах варьируется от 42 до 96 %, также в значительном количестве присутствует гипс (до 50 %) и терригенный материал (до 20 %). В качестве второстепенных минералов выступают гидрооксиды железа, кварц, кальцит и алеврит; в качестве акцессорных минералов –

### Гранулометрический состав опытной грунтовой массы Granulometric composition of the experimental soil mass

Показатель	Значение					
	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1
Фракция, мм	> 10	10–7	7–5	5–3	3–2	2–1
Содержание, %	12	0,7	3	3,5	2,8	2,5
Фракция, мм	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,002	< 0,002
Содержание, %	1,3	2,8	10,3	22,1	24,5	14,5

<sup>5</sup> Методические рекомендации по определению физико-химических свойств почв и грунтов при инженерно-геологических и почвенно-мелиоративных изысканиях / сост. Л.И. Кульчицкий, Ю.Г. Ткаченко, З.А. Савченко [и др.]. М.: в/о «Союзводпроект», 1977. 71 с.

<sup>6</sup> ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. М.: Стандартинформ, 2020. 21 с.

<sup>7</sup> ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 33 с.



апатит, глауконит, турмалин и др. В долеритах среди главных минералов выделяются плагиоклаз (20–37 %), пироксен (35–70 %), реже оливин (до 15 %), второстепенные представлены кварцем и рудными минералами (рис. 2).

Для обломков определены следующие значения коэффициентов выветрелости  $K_{wrt}$  и истираемости  $K_{fr}$ :

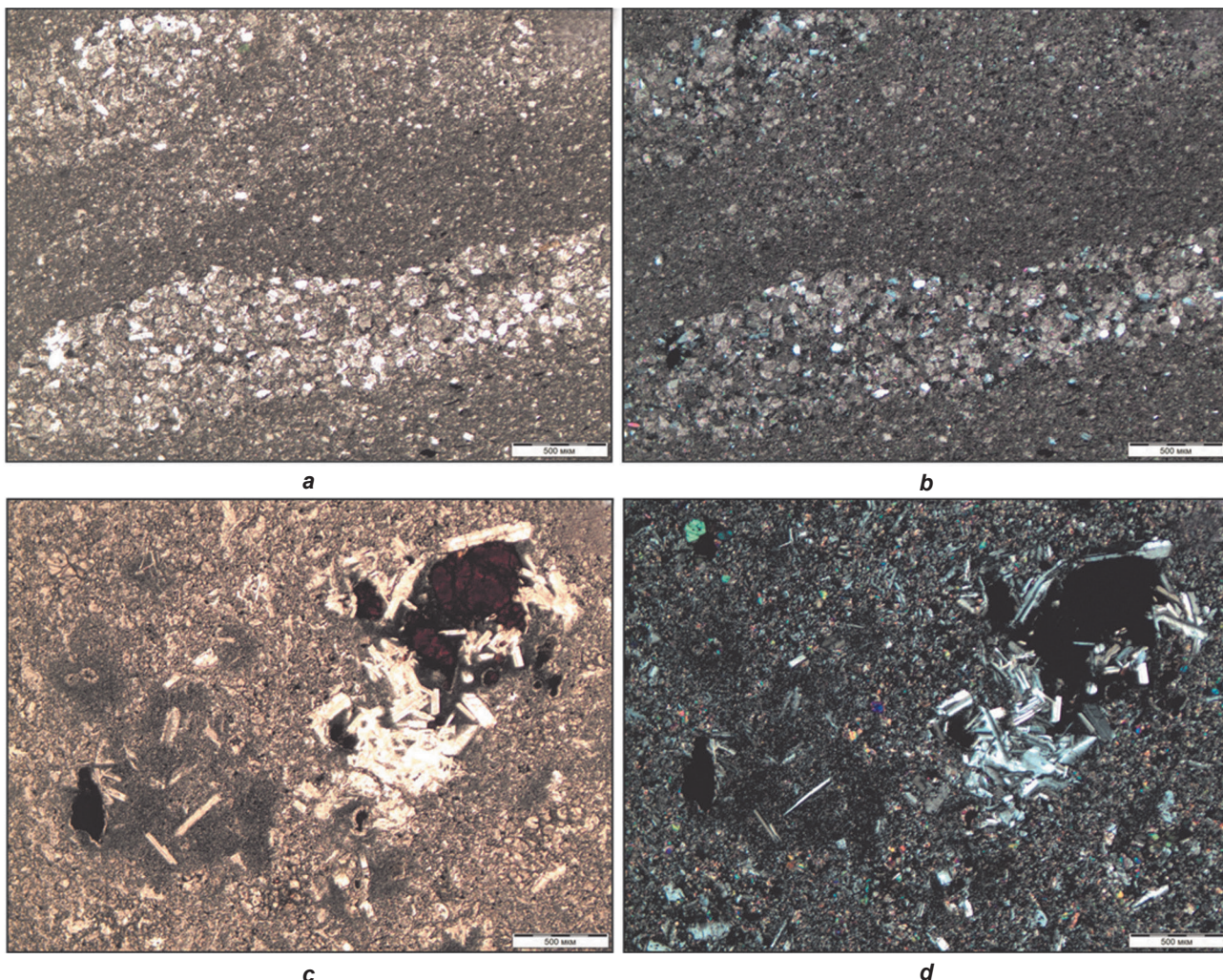
–  $K_{wrt}$  варьируется от 0,49 до 0,74 д. е., что по классификации ГОСТ 25100-2020<sup>2</sup> для осадочных пород соответствует слабо- и сильно-выветрелым разновидностям;

–  $K_{fr}$  находится в пределах 0,18–0,36 д. е., что позволяет говорить о широком спектре степени прочности обломков: от малопрочных до прочных.

По результатам проведения испытаний на устойчивость обломков к водной среде в системах «порода – вода» и «порода – рассол» установлено, что:

– прочные обломки без видимых повреждений при длительном нахождении в воде или рассоле не претерпевают каких-либо существенных изменений (рис 3, а, б);

– трещиноватые крупные обломки разрушаются до дресвяно-щебенистой и менее размерности при длительном нахождении в воде или рассоле. В случае последнего установлено, что возможность кристаллизации рассола оказывает существенное влияние на раскрытие трещин (рис. 3, с–е). Кристаллизованная соль заполняет свободное пространство и приводит к их дополнительному расширению,



**Рис. 2. Шлифы:**

*a – доломит неравномерно-зернистый, алевролитистый; b – доломит в скрещенных николях;  
c – микродолерит порфировый в параллельных николях;  
d – микродолерит порфировый в скрещенных николях*

**Fig. 2. Thin sections:**

*a – uneven-grained silty dolomite; b – dolomite in crossed nicols;  
c – porphyritic microdolerite in parallel nicols; d – porphyritic microdolerite in crossed nicols*



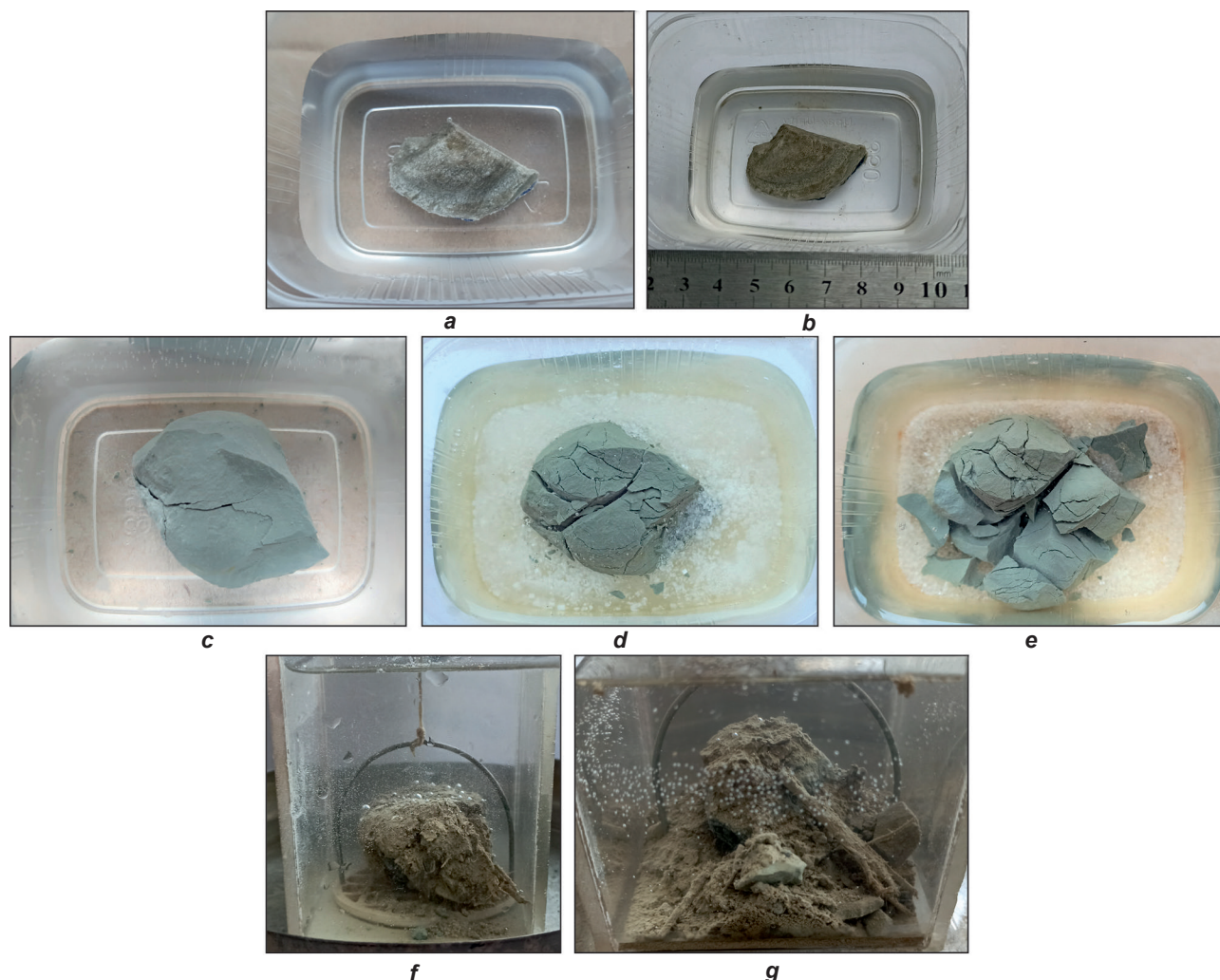
что в итоге способствует более быстрому разрушению обломков;

– слабосцементированные обломки при погружении в воду полностью теряют свою прочность и превращаются в рыхлую массу (рис. 3, *f, g*). В зависимости от гранулометрического состава время разрушения варьируется от десятков минут до нескольких часов, что позволяет говорить об их малой и средней водоустойчивости.

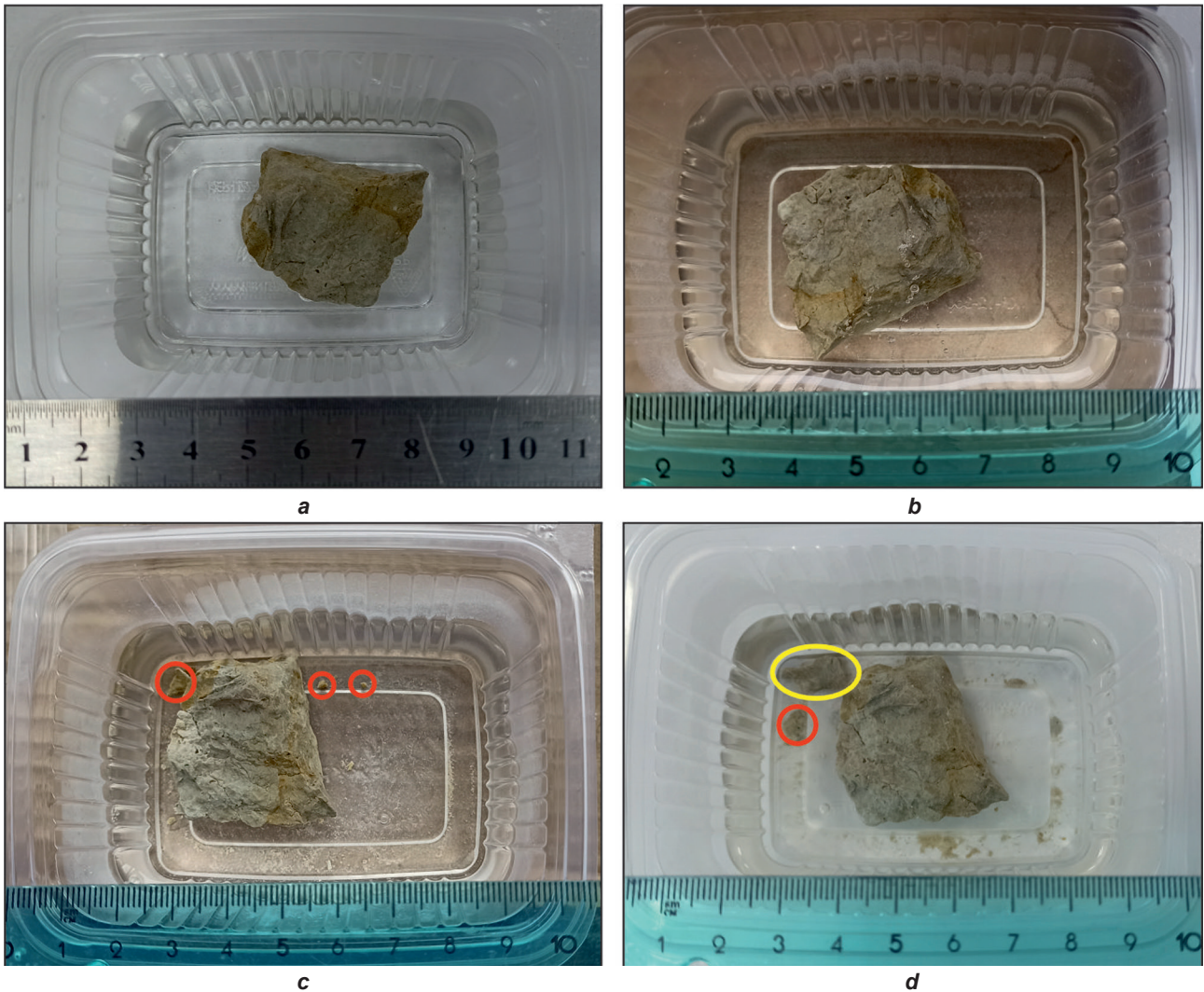
При проведении 10 циклов заморозания-оттаивания на водонасыщенных монолитных обломках не было выявлено существенных признаков их разрушения. У данных обломков также отмечаются достаточно низкие значения водопоглощения ( $W_n = 2-5,5 \%$ ). Такое малое количество воды, максимально содержащейся в порах, при заморозании не может привести к разрушению породы. Это позволяет утверждать, что ненарушенный крупнообломочный

материал имеет низкую предрасположенность к проявлению морозобойного растрескивания. Однако трещиноватые разновидности, устойчивые к воде и рассолам, после нескольких циклов заморозания-оттаивания начали разрушаться. После 5-го цикла по трещинам начали откалываться небольшие обломки размером до 0,5 см с образованием тонкодисперсного осадка на дне контейнера, после 7-го цикла – величиной до 1,5 см, при этом предыдущие ранее отделившиеся обломки разрушились до тонкодисперсного состояния (рис. 4).

**Тонкодисперсные грунты.** Эта группа представлена преимущественно супесью, реже встречаются суглинки. Среди минералов преобладает в основном доломит (23–65 %), кальцит (2–10 %), кварц (10–27 %), полевые шпаты (5–20 %), глины (4–25 %), в меньшем количестве присутствуют гипс и серпентинит. При этом состав глины – полиминеральный:



**Рис. 3. Характер взаимодействия обломков техногенных грунтов с водой/рассолом:**  
*a, b – прочный доломит; c–e – трещиноватый доломит; f, g – слабосцементированный агрегат*  
**Fig.3. Interaction nature of man-made soil fragments and water/brine:**  
*a, b – strong dolomite; c–e – fractured dolomite; f, g – weakly cemented aggregate*



**Рис. 4. Разрушение обломка трещиноватого доломита после нескольких циклов промерзания-оттаивания:**

*a – 0 циклов; b – 3 цикла; c – 5 циклов; d – 7 циклов*

**Fig. 4. Destruction of a fractured dolomite fragment after several freeze-thaw cycles:**

*a – 0 cycles; b – 3 cycles; c – 5 cycles; d – 7 cycles*

он представлен хлоритом, гидрослюдами и каолинитом; реже смектитом и смешанно-слоистыми минералами.

При исследовании структуроформирующих компонентов выявлен различный характер засоления грунтов: наиболее часто встречаются незасоленные ( $S_{sp} = 0,23-0,46 \%$ ) и избыточно засоленные ( $S_{sp} = 8,4-23,1 \%$ ) разновидности, в меньшей степени средне- ( $S_{sp} = 1,24-1,25 \%$ ) и сильнозасоленные ( $S_{sp} = 6,7-8,0 \%$ ). При этом для слабозасоленных преобладает хлоридно-сульфатный тип засоления, а для сильнозасоленных – сульфатный. Содержание полуторных оксидов ( $R_2O_3$ ) варьируется в пределах от 6,9 до

12,5 %. Отмечается крайне высокая степень карбонатизации отложений. Общее содержание карбонатных солей в среднем составляет 66,5–95,3 % с преобладанием  $CaCO_3$  и  $MgCO_3$ , что объясняется преимущественно карбонатным составом вскрышных пород.

Значения седиментационного объема для техногенных отложений в среднем варьируются в пределах от 3,5 до 6,7  $см^3$ , что соответствует II типу ( $V = 3,3-10,0 \text{ см}^3$ ) потенциально плавунных грунтов, характеризующихся пылевато-глинистым составом<sup>8</sup>.

Показатели водопропускных свойств исследуемых грунтов варьируются от водонепроницаемых до водопроницаемых. Для супесчаных

<sup>8</sup> Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: учеб. пособие для вузов. Л.: Недра, 1990. 328 с.



отложений коэффициент фильтрации  $K_f = 0,05-0,58$  м/сут., для суглинистых –  $0,004-0,03$  м/сут.

Относительная деформация набухания варьируется от 0,02 до 0,07 д. е. для супесчаных отложений, что соответствует ненабухающим и слабонабухающим грунтам. При этом влажность набухания составляет  $\approx 22-27\%$  и отмечаются достаточно низкие значения объемной усадки (5–9,8 %). У суглинистых отложений значения относительной деформации набухания значительно выше (0,06–0,14 д. е.), наиболее распространенными являются средне- и сильнонабухающие разновидности. Влажность набухания в данном случае уже составляет 30–41 %, а объемная усадка 12–20,5 %.

По результатам испытаний, проведенных методом одноплоскостного среза, установле-

но, что тонкодисперсные грунты независимо от своего состояния (твердая или пластичная консистенция) обладают достаточно низкими значениями прочностных параметров: для супесей –  $C = 0,003-0,04$  МПа,  $\varphi = 2,86-15,79^\circ$ ; для суглинков –  $C = 0,003-0,015$  МПа,  $\varphi = 3,84-13,48^\circ$ . К тому же при увеличении влажности падение удельного сцепления в случае супесчаного образца более существенно (рис. 5). Также стоит отметить, что во время проведения испытаний у образцов, находящихся в мягко- и текучепластичном состоянии ( $W = 25-27\%$ ), при росте касательной нагрузки не было установлено проявление релаксации напряжений. Данный процесс часто встречается у природных глинистых аналогов, склонных к проявлению реологических свойств [17, 18].

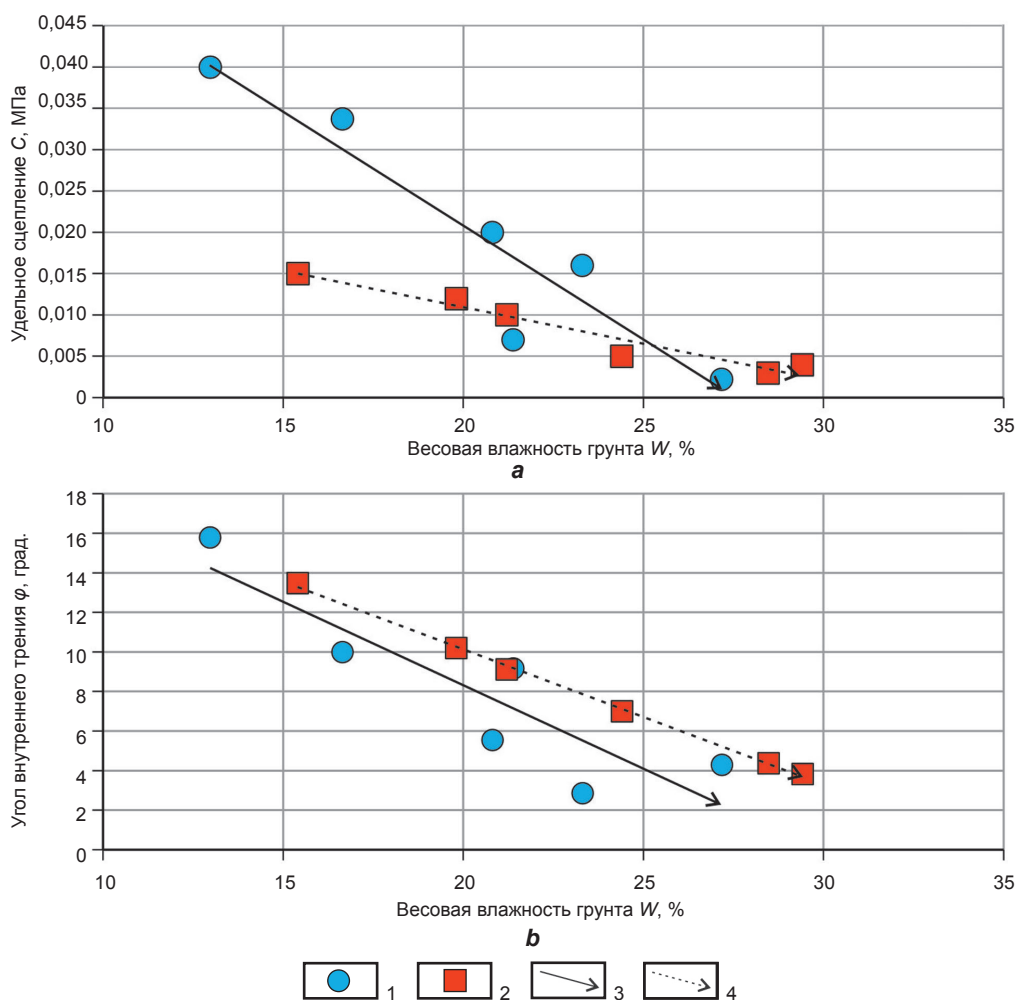


Рис. 5. Изменение прочностных параметров техногенных грунтов при увеличении влажности:

a – удельное сцепление  $C$ , МПа; b – угол внутреннего трения  $\varphi$ , град.

1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – линия тренда падения прочностных параметров супеси;

4 – линия тренда падения прочностных параметров суглинка

Fig. 5. Variations of strength parameters of man-made soils with increasing moisture content:

a – specific cohesion  $C$ , МПа; b – angle of internal friction  $\varphi$ , degrees

1 – sandy loam; 2 – loam; 3 – trend line of sandy loam strength parameters dip;

4 – trend line of loam strength parameters dip

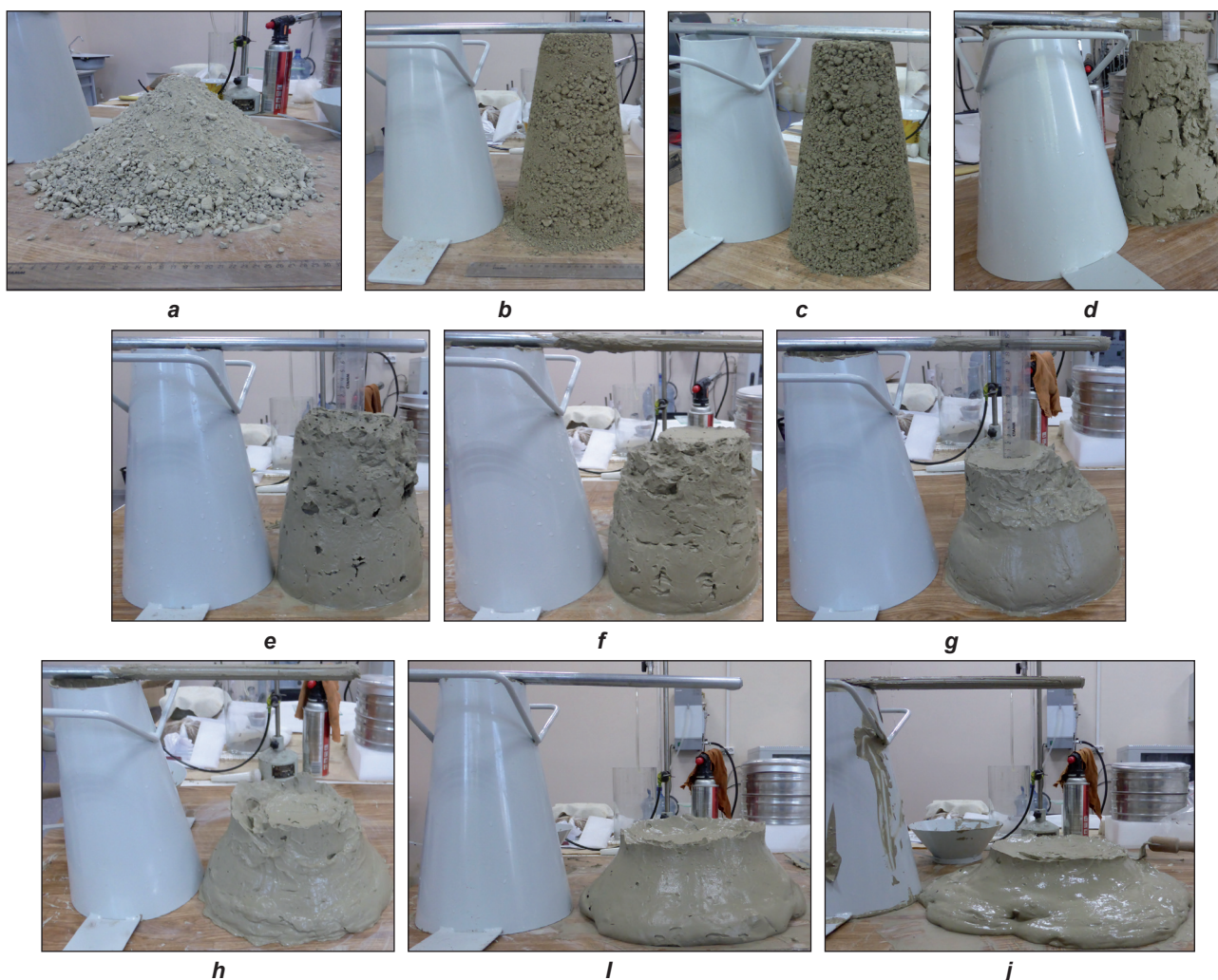


Исследуемые грунты характеризуются повышенной деформируемостью: для супесчаных образцов  $E = 1,9\text{--}2,2$  МПа, для суглинистых –  $E = 1,4\text{--}1,8$  МПа. Коэффициент Пуассона  $\nu$  составляет 0,4 для супесей и 0,43 для суглинков, что говорит о достаточной их упругости.

Выявленные низкие значения показателей деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов могут быть объяснены отсутствием у них нормальной структурной прочности, природа которой определяется способом формирования техногенного массива, незначительным

периодом его существования, специфическими условиями залегания, а также региональными геолого-структурными и природно-климатическими особенностями [19, 20]. Процесс изменения состава и структурных связей исследуемых грунтов при перемещении на дно карьера обуславливает их меньшую прочность по сравнению с природными отложениями.

Проведение экспериментального исследования подвижности грунтовой массы с использованием конуса Абрамса (рис. 6) выявило следующие особенности изменения ее состояния:



**Рис. 6. Исследование изменения формы грунтовой массы при увеличении влажности с использованием конуса Абрамса:**

*a* – грунт с  $W = 1,4\%$ ,  $\rho = 1,43$  г/см<sup>3</sup>, осадка 0 см; *b* – грунт с  $W = 10\%$ ,  $\rho = 1,5$  г/см<sup>3</sup>, осадка 0 см;  
*c* – грунт с  $W = 15\%$ ,  $\rho = 1,6$  г/см<sup>3</sup>, осадка 0 см; *d* – грунт с  $W = 20\%$ ,  $\rho = 1,98$  г/см<sup>3</sup>, осадка 0,5–2,2 см;  
*e* – грунт с  $W = 25\%$ ,  $\rho = 1,99$  г/см<sup>3</sup>, осадка 4,5–7,1 см; *f* – грунт с  $W = 27\%$ ,  $\rho = 1,95$  г/см<sup>3</sup>, осадка 10–11 см;  
*g* – грунт с  $W = 30\%$ ,  $\rho = 1,9$  г/см<sup>3</sup>, осадка 13,5–16 см; *h* – грунт с  $W = 32\%$ ,  $\rho = 1,88$  г/см<sup>3</sup>, осадка 17,5–18,5 см;  
*i* – грунт с  $W = 35\%$ ,  $\rho = 1,84$  г/см<sup>3</sup>, осадка 20–21 см; *j* – грунт с  $W = 40\%$ ,  $\rho = 1,78$  г/см<sup>3</sup>, осадка 23–23,5 см

**Fig. 6. Study of soil mass shape variations with increasing moisture content using an Abrams cone:**

*a* – soil with  $W = 1.4\%$ ,  $\rho = 1.43$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 0 cm; *b* – soil with  $W = 10\%$ ,  $\rho = 1.5$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 0 cm;  
*c* – soil with  $W = 15\%$ ,  $\rho = 1.6$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 0 cm; *d* – soil with  $W = 20\%$ ,  $\rho = 1.98$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 0.5–2.2 cm;  
*e* – soil with  $W = 25\%$ ,  $\rho = 1.99$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 4.5–7.1 cm; *f* – soil with  $W = 27\%$ ,  $\rho = 1.95$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 10–11 cm;  
*g* – soil with  $W = 30\%$ ,  $\rho = 1.9$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 13.5–16 cm; *h* – soil with  $W = 32\%$ ,  $\rho = 1.88$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 17.5–18.5 cm;  
*i* – soil with  $W = 35\%$ ,  $\rho = 1.84$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 20–21 cm; *j* – soil with  $W = 40\%$ ,  $\rho = 1.78$  g/cm<sup>3</sup>, settlement 23–23.5 cm



1. Переход из твердой в пластичную консистенцию происходит при достижении влажности грунта 20 %, в текучую – при 30 %.

2. При увеличении влажности грунтовой массы отмечается увеличение ее плотности. Максимальные значения ( $\rho \approx 1,99 \text{ г/см}^3$ ) достигаются при  $W = 25 \%$ , затем происходит ее уменьшение.

3. Сформированный конус сохраняет свою форму и не проявляет признаков деформации только при  $W < 15 \%$ . Далее с увеличением влажности отмечаются пластичные деформации, сопровождающиеся осадкой формы. Максимальную деформацию конус претерпевает при влажности 40 % (осадка формы составляет 23,0–23,5 см). При этом грунтовая масса только начинает растекаться.

4. На протяжении всего эксперимента вода в массе грунта содержится преимущественно в связанном виде.

Повышенное содержание глинистой фракции (до 14,5 %) в составе испытуемой массы, характеризующейся наличием таких глинистых минералов, как хлорит, гидрослюда, каолинит, смектит и смешаннослойные минералы, обуславливает низкую водопропускную способность и достаточно высокую влагоемкость грунтов (влажность набухания до 41 %). Такие отложения, как правило, обладают высокой гидрофильностью. В случае их существенного переувлажнения они продолжают удерживать в себе воду, позволяя ей оставаться в связанном виде. В пределах техногенного осыпного массива это в конечном итоге приведет к образованию опасной текучей подвижной массы, которая будет устремляться в зоны пониженного давления (карстовые полости, подземные горные выработки и т. п.).

### Заключение

Реализация комплексного подхода к исследованию деформационно-прочностных свойств техногенных грунтов карьера «Айхал» позволила выявить ряд следующих особенностей:

1. В составе техногенной толщи в значительном количестве присутствуют обломки доломитов щебенистой и дресвяной размерности с супесчано-суглинистым заполнителем.

2. Крупнообломочный материал характеризуется широким спектром показателей выветрелости и прочности. Встречаются разновидности от слабо- до сильновыветрелых ( $K_{wrt} = 0,49\text{--}0,74$  д. е.) и от малопрочных до прочных ( $K_{fr} = 0,18\text{--}0,36$  д. е.).

3. Экспериментальные исследования прочности крупных обломков в системах «порода – вода» и «порода – рассол» выявили их разнородный потенциал к разрушению: прочные монолитные разновидности при длительном нахождении в жидкости совсем не разрушаются, трещиноватые – до дресвяно-щебенистой и менее размерности, а слабосцементированные обломки полностью теряют свою прочность и превращаются в рыхлую массу.

4. Трещиноватые разновидности крупнообломочного материала, устойчивые к воде и рассолам, после 5–7 циклов заморозания-оттаивания начинают разрушаться.

5. Тонкодисперсные грунты характеризуются низкими значениями деформационно-прочностных параметров (для супесей:  $C = 0,003\text{--}0,04$  МПа,  $\varphi = 2,86\text{--}15,79^\circ$ ,  $E = 1,9\text{--}2,2$  МПа; для суглинков:  $C = 0,003\text{--}0,015$  МПа,  $\varphi = 3,84\text{--}13,48^\circ$ ,  $E = 1,40\text{--}1,8$  МПа), что позволяет характеризовать их как структурно-неустойчивые.

6. Повышенная гидрофильность тонкодисперсных грунтов определяется существенным присутствием глинистой фракции и наличием в ее составе смектита и смешаннослойных минералов.

7. По результатам экспериментальных исследований опытной грунтовой массы установлено, что данные образования при существенном увлажнении испытывают значительные деформации и предрасположены к проявлению текучести.

Таким образом, исследование различных техногенных грунтов должно сопровождаться проведением не только стандартных лабораторных работ, включающих определение их гранулометрического, минерального и химического состава, физического состояния, деформационно-прочностных и других свойств. Помимо этого необходимо проводить дополнительные (измерения влагоемкости, седиментационного объема и др.) и экспериментальные (замачивание, использование циклов заморозания-оттаивания, применение конуса Абрамса и др.) исследования, позволяющие расширить представление об особенностях техногенных отложений, выявить их потенциал к разрушению, деформациям, проявлению реологических свойств и т. д. В результате полученные данные будут способствовать более корректной характеристике и оценке как самих техногенных грунтов, так и техногенных литосистем в целом.



## Список источников

1. Огородникова Е.Н., Николаева С.К., Дургальян М.Г., Абакумова Н.В. Рациональное использование техногенных грунтов – отходов производств // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XVIII Всерос. науч.-практ. конф. / отв. ред. Т.Н. Ледащева (г. Москва, 23–24 ноября 2017 г.). М.: Изд-во РУДН, 2017. С. 201–206. EDN: YRJKWJ.
2. Несмеянов С.А., Воейкова О.А. Техногенная формация – характерный признак техногенного этапа истории Земли // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 18–21. <https://doi.org/10.31857/S0869780920010147>. EDN: MXHXM.
3. Huot H., Simonnot M.O., Morel J.L. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic materials // Soil Science. 2015. Vol. 180. Iss. 4/5. P. 182–192. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000135>.
4. Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry // Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. Iss. 10. P. 1133–1141. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100046>.
5. Uzarowicz Ł., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., et al. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives // Soil Science Annual. 2020. Vol. 71. Iss. 4. P. 281–299. <https://doi.org/10.37501/sVoloilsa/131615>.
6. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О необходимости комплексного изучения свойств техногенных грунтов и использования их в качестве оснований зданий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 98–106. EDN: RBQSIJ.
7. Лолаев А.Б., Рященко Т.Г., Акулова В.В., Бадоев А.С., Тваури И.В. Комплексное исследование состава, структуры и свойств техногенных грунтов // Научные труды Вольного экономического общества России: труды региональной площадки МАЭФ-2021: экономика, экология, энергетика отдаленных территорий. (г. Владикавказ, 22 мая 2021 года – 24 мая 2022 года). Владикавказ: Изд-во ГГАУ, 2021. С. 122–134. EDN: WQOOXT.
8. Сафиуллина И.С., Хайрулина Л.А., Шайнурова А.Р. К вопросу об изучении физико-механических свойств грунтов для инженерно-геологических целей. Исторические аспекты становления и развития грунтоведения и механики грунтов // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2022. Т. 43. № 2. С. 22–36. <https://doi.org/10.24412/1728-2022-2-22-36>. EDN: AVIMDB.
9. Гладков А.С., Дроздов А.В., Кошкарев Д.А., Потехина И.А., Афонькин А.М. Оценка структурно-тектонического строения глубоких горизонтов трубки «Айхал» для постановки гидрогеомеханического мониторинга // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 2. С. 46–56. EDN: ULFFIF.
10. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
11. Кисленко А.Б. Вещественный состав кимберлитов трубки Айхал (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле, республика Саха-Якутия) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXIII Междунар. симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К.В. Радугина. (г. Томск, 8–12 апреля 2019 г.). Томск: Изд-во НИТПУ, 2019. Т. 2. С. 40–42. EDN: NUDENY.
12. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Влияние частичного затопления карьера «Айхал» на напряженно-деформированное состояние рудной потолочины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 23–31. EDN: RADOUF.
13. Янников А.М., Трифонов Н.С., Лепокурова О.Е. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газоносность глубоких горизонтов трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>. EDN: ILANMX.
14. Курилко А.С., Дроздов А.В., Каймонов М.В. Оценка возможности ликвидации водного объекта в карьере «Айхал» // Наука и образование. 2013. № 4. С. 53–57. EDN: RYEYJL.
15. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь) / отв. ред. В.В. Ружич. Иркутск: Изд-во ИЭК СО РАН, 2010. 287 с. EDN: QKJFJF.
16. Янников А.М. Особенности формирования дезинтегрированных толщ в открытых горных выработках в зонах многолетнемерзлых пород месторождения трубки «Айхал» // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН (г. Якутск, 23–25 марта 2022 г.). Якутск: Изд-во СВФУ им. М.К. Аммосова, 2022. С. 513–515. [https://doi.org/10.52994/9785751332846\\_2022\\_106](https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_106). EDN: DPRDTJ.
17. Карпенко Ф.С. Физико-химическая природа прочности глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2019. № 5. С. 48–60. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>. EDN: HWRXZT.
18. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Кальберген Р.Г., Кутергин В.Н., Румянцева Н.А. Реологические свойства глинистых грунтов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 6. С. 41–51. EDN: ZRJAWL.
19. Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Астапенко Т.С., Шишкина В.С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11. С. 49–69. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_49](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49). EDN: EOTJVE.



20. Вознесенский Е.А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 5. С. 3–9. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5-3-9>. EDN: NWQUZB.

### References

1. Ogorodnikova E.N., Nikolaeva S.K., Durgalyan M.G., Abakumova N.V. Rational use of man-made soils – production wastes. In: Ledashcheva T.N. (ed.). *Aktual'nye problemy ehkologii i prirodopol'zovaniya: sbornik nauchnykh trudov XVIII Vseros. nauch.-prakt. konf. = Relevant problems of ecology and nature management: collected scientific papers of the 18<sup>th</sup> All-Russian scientific and practical conference*. 23–24 November 2017, Moscow. Moscow: People's Friendship University of Russia; 2017, p. 201-206. (In Russ.). EDN: YRJKWJ.
2. Nesmeyanov S.A., Voeikova O.A. Technogenic formation as a characteristic feature of the technogenic stage in the Earth's history. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2020;1:18-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869780920010147>. EDN: MXIHXM.
3. Huot H., Simonnot M.O., Morel J.L. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic materials. *Soil Science*. 2015;180(4/5):182-192. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000135>.
4. Hulisz P., Pindral S., Kobierski M., Charzyński P. Technogenic layers in organic soils as a result of the impact of the soda industry. *Eurasian Soil Science*. 2018;51(10):1133-1141. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100046>.
5. Uzarowicz L., Charzyński P., Greinert A., Hulisz P., Kabała C., Kusza G., et al. Studies of technogenic soils in Poland: past, present, and future perspectives. *Soil Science Annual*. 2020;71(4):281-299. <https://doi.org/10.37501/soilsa/131615>.
6. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. On the need for a comprehensive study of the properties of man-made soils and their use as building foundations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013;2:98-106. (In Russ.). EDN: RBQSIJ.
7. Lolaev A.B., Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Badoev A.S., Tvauro I.V. Complex research of structure and properties of the technogenic soils. In: *Nauchnye trudy Vol'nogo ehkonomicheskogo obshchestva Rossii: trudy regional'noi ploshchadki MAEF-2021: ekonomika, ekologiya, energetika otdalennykh territorii = Scientific Works of the Free Economic Society of Russia: Proceedings of the MAEF-2021 regional site: economics, ecology, energy of remote territories*. 22 May 2021 – 24 May 2022, Vladikavkaz. Vladikavkaz: Gorsky State Agrarian University; 2021; p. 122-134. (In Russ.). EDN: WQOOLT.
8. Safiullina I.S., Khairulina L.A., Shainurova A.R. Study of physical and mechanical properties of soils for engineering and geological purposes. Historical aspects and contemporary issues. *Herald of the academy of sciences of the republic of Bashkortostan*. 2022;43(2):22-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-2022-2-22-36>. EDN: AVIMDB.
9. Gladkov A.S., Drozdov A.V., Koshkarev D.A., Potekhina I.A., Afon'kin A.M. Evaluation of structural and tectonic framework of Aikhal kimberlite pipe deep horizons for hydrogeomechanical monitoring setting. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*. 2015;2:46-56. (In Russ.). EDN: ULFFIF.
10. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2008, 507 p. (In Russ.).
11. Kislenco A.B. Material composition of Aikhal pipe kimberlites (Alakite-Markha kimberlite field, Sakha Yakutia Republic). In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXIII Mezhdunar. simpoziuma im. akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya rozhdeniya akademika K.I. Satpayeva, 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora K.V. Radugina = Problems of Geology and Subsoil Development: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Symposium named after Academician M.A. Usov for students and young scientists dedicated to the 120<sup>th</sup> birth anniversary of Academician K.I. Satpayev, and the 120<sup>th</sup> birth anniversary of Professor K.V. Radugin*. 8–12 April 2019, Tomsk. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2019, vol. 2, p. 40-42. (In Russ.). EDN: NUDENY.
12. Kurlenya M.V., Baryshnikov V.D., Gakhova L.N. Influence of Aikhal mine partial flooding on the stress-strain state of the ore ceiling. *Fiziko-texnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013;4:23-31. (In Russ.). EDN: RADOUF.
13. Yannikov A.M., Trifonov N.S., Lepokurova O.E. The impact of faults on the water inflow and gas content of the deep levels of the Aikhal pipe (Republic of Sakha (Yakutia)). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2021;1:104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>. EDN: ILANMX.
14. Kurilko A.S., Drozdov A.V., Kaimonov M.V. Assessment of the possibility of water body liquidation in Aikhal mine. *Nauka i obrazovanie*. 2013;4:53-57. (In Russ.). EDN: RYELJ.
15. Ryashchenko T.G. *Regional soil science (Eastern Siberia)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science; 2010, 287 p. (In Russ.). EDN: QKJFJF.
16. Yannikov A.M. Formation features of disintegrated strata in open mine workings of Aikhal pipe deposit permafrost zones. In: *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy XII Vseros. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 65-letiyu Instituta geologii almaza i blagorodnykh metallov Sibirskogo otdeleniya RAN = Geology and mineral resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 12<sup>th</sup> All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 65<sup>th</sup> anniversary of the Institute of Geology of Diamond and Precious Metals of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*. 23–25 March 2022, Yakutsk. Yakutsk: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; 2022, p. 513-515. (In Russ.). [https://doi.org/10.52994/9785751332846\\_2022\\_106](https://doi.org/10.52994/9785751332846_2022_106). EDN: DPRDTJ.
17. Karpenko F.S. Physico-chemical nature of clayey soils strength. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2019;5:48-60 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019548-60>. EDN: HWRXZT.
18. Osipov V.I., Karpenko F.S., Kal'bergenov R.G., Kutergin V.N., Rummyantseva N.A. Rheological properties of the clay soils. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*. 2017;6:41-51. (In Russ.). EDN: ZRJAWL.



19. Karasev M.A., Pospekhov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress–strain behavior prediction models for weak manmade soil. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2023;11:49-69. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_49](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_49). EDN: EOTJVE.

20. Voznesenskii E.A. General genetic classification of technogenic soils. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2019;5:3-9. (In Russ.). <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-5-3-9>. EDN: NWQUZB.

### Информация об авторах / Information about the authors



**Душкин Егор Павлович,**

аспирант,  
ведущий инженер лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

✉ [dushkin@crust.irk.ru](mailto:dushkin@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0009-0004-2628-1071>

**Egor P. Dushkin,**

Postgraduate Student,  
Leading Engineer of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

✉ [dushkin@crust.irk.ru](mailto:dushkin@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0009-0004-2628-1071>



**Акулова Варвара Викторовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
ведущий эксперт лаборатории инженерной геологии и геоэкологии,  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

[akulova@crust.irk.ru](mailto:akulova@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6253-6140>

**Varvara V. Akulova,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Leading Expert of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

[akulova@crust.irk.ru](mailto:akulova@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-6253-6140>



**Рыбченко Артем Александрович,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией инженерной геологии и геоэкологии,  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

[rybchenk@crust.irk.ru](mailto:rybchenk@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

**Artem A. Rybchenko,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Head of the Laboratory of Engineering Geology and Geoecology,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

[rybchenk@crust.irk.ru](mailto:rybchenk@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0000-0003-2615-8423>

### Вклад авторов / Contribution of the authors

Е.П. Душкин – разработка концепции, проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи.  
В.В. Акулова – разработка методологии, научное руководство, проведение исследования, редактирование рукописи.

А.А. Рыбченко – проведение исследования, редактирование рукописи.

Egor P. Dushkin – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft.

Varvara V. Akulova – methodology, supervision, investigation, writing – editing.

Artem A. Rybchenko – investigation, writing – editing.



### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.06.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 28.06.2025; approved after reviewing 03.09.2025; accepted for publication 15.09.2025.



Обзорная статья

УДК 549.01:549.02:548.3:622.34

EDN: QDHESY

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-296-309



## Комплексный кристаллохимический анализ как этап минералого-технологической оценки руд твердых полезных ископаемых

Е.В. Канева<sup>a✉</sup><sup>a</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель данной статьи заключалась в обосновании важности роли комплексного кристаллохимического анализа при минералого-технологической оценке руд твердых полезных ископаемых. На примере редких силикатных минералов (тинаксит, токкоит, калий-гастингсит и других), отобранных из месторождений разных генетических типов, была продемонстрирована эффективность интеграции современных аналитических методов: рентгеноструктурного анализа, электронно-зондового микроанализа, мёссбауэровской, инфракрасной и спектроскопии комбинационного рассеяния, электронного парамагнитного резонанса, а также оптической спектроскопии и люминесценции. В ходе исследования были получены количественные данные о распределении катионов по структурным позициям, валентном состоянии железа, особенностях спектров, связанных с наличием ОН-колебаний и люминесцентных характеристиках. Установленные количественные корреляции «состав – структура – свойства» позволили решить фундаментальные задачи, такие как определение кристаллохимических формул и механизмов изоморфных замещений, исследование ионообменных и окислительно-восстановительных процессов, реконструирование условий минералообразования, анализ природы функциональных свойств. Полученные результаты дали возможность создать основу для прогнозирования технологического поведения минерального сырья и разработки генетических критериев. В числе прочего убедительно подтверждено, что комплексный подход при оценке руд твердых полезных ископаемых обеспечивает переход от эмпирического описания к прогностическому моделированию, внося существенный вклад как в развитие фундаментальной минералогии, так и в решение прикладных задач рационального недропользования. Установленные закономерности и разрабатываемые методические принципы открывают новые перспективы для создания энергоэффективных и экологически безопасных технологий переработки минерального сырья с целенаправленным использованием его функциональных свойств.

**Ключевые слова:** минералообразование, минералого-технологическая оценка, изоморфизм, силикаты, кристаллохимия, прогнозирование, функциональные свойства

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0284-2021-0005) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия).

**Благодарности:** Автор выражает искреннюю благодарность за многолетнее плодотворное сотрудничество и непосредственное участие в исследованиях, результаты и обсуждение которых легли в основу данной обзорной работы, коллегам из Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия): Р.Ю. Шендрику, Т.А. Радомской, М.А. Митичкину, О.Ю. Белозёровой, Л.Ф. Суворовой, В.М. Чубарову, А.Н. Сапожникову. Автор благодарит сотрудников Департамента по наукам о Земле Университета г. Бари (Италия): Э. Место, Ф. Скордари, М. Лакаламита и Э. Скингаро. Благодарность также выражается Н.В. Чуканову (Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, г. Черноголовка, Россия) и М.Ф. Вигасиной (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия).

**Для цитирования:** Канева Е.В. Комплексный кристаллохимический анализ как этап минералого-технологической оценки руд твердых полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 296–309. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-296-309>. EDN: QDHESY.



Rewiew article

## Comprehensive crystal chemical analysis as a stage of mineralogical and technological assessment of solid mineral ores

Ekaterina V. Kaneva<sup>a</sup>✉

<sup>a</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of this article is to substantiate the importance of comprehensive crystal chemical analysis in the mineralogical and technological assessment of solid mineral ores. On example of rare silicate minerals (tinaksite, tokkoite, potassium-hastingsite, and others) selected from the deposits of various genetic types the effectiveness of the integration of modern analytical methods including X-ray structural analysis, electron probe microanalysis, Mössbauer, infrared and Raman spectroscopy, electron paramagnetic resonance, as well as optical spectroscopy and luminescence was demonstrated. The study obtained quantitative data on cation distribution by structural positions, iron valence state spectra features associated with OH vibrations, and luminescent characteristics. The identified quantitative “composition-structure-properties” correlations enabled the solution of such fundamental tasks as determining crystal chemical formulas and mechanisms of isomorphic substitutions, studying ion exchange and redox processes, reconstructing mineral formation conditions, and analyzing the nature of functional properties. The obtained results provided a basis for predicting the technological behavior of mineral raw materials and developing genetic criteria. Among other things, it has been convincingly demonstrated that the comprehensive approach to assessing solid mineral ores enables a transition from empirical description to predictive modeling making a significant contribution to both the development of fundamental mineralogy and the solution of applied problems in rational subsoil use. The established patterns and developed methodological principles open up new prospects for the creation of energy-efficient and environmentally friendly technologies for processing mineral raw materials with the targeted use of their functional properties.

**Keywords:** mineral formation, mineralogical and technological assessment, isomorphism, silicates, crystal chemistry, forecasting, functional properties

**Funding:** This work was performed within the framework of a state assignment (project no. 0284-2021-0005) using the scientific equipment of the Shared Use Centre for Isotope and Geochemical Research of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia).

**Acknowledgements:** The author expresses his sincere gratitude for long-term fruitful collaboration and direct participation in the research, the results and discussion of which formed the basis of this review, to the colleagues from the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia): Roman Yu. Shendrik, Tatiana A. Radomskaya, Mikhail A. Mitichkin, Olga Yu. Belozeroва, Lyudmila F. Suvorova, Viktor M. Chubarov, and Anatoliy N. Sapozhnikov. The author also thanks colleagues from the Department of Earth and Geoenvironmental Sciences from the University of Bari (Italy): Ernesto Mesto, Fernando Scordari, Maria Lacalamita, and Emanuela Schingaro. The author also thanks Nikita V. Chukanov (Institute of Problems of Chemical Physics and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia) and Marina F. Vigasina (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.).

**For citation:** Kaneva E.V. Comprehensive crystal chemical analysis as a stage of mineralogical and technological assessment of solid mineral ores. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):296-309. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-296-309>. EDN: QDHESY.

### Введение

Современная минералогия развивается в сторону прогностической дисциплины, где на первый план выходит не только диагностика, но и предсказание функциональных свойств минерального вещества. Особый интерес в этом контексте представляют сложные силикаты, исключительное структурное и химическое разнообразие которых делает их уникальными природными моделями, демонстрирующими свойства, востребованные в современных технологиях: ионную проводимость, селективную сорбцию, каталитическую и нелинейно-оптическую активность.

Кристаллохимический анализ служит основой для понимания и прогнозирования этих свойств через установление количественных корреляций между химическим составом, параметрами кристаллической структуры и макроскопическими характеристиками минералов. Однако достоверность анализа невозможна без комплексного методологического подхода, интегрирующего данные современных методов аналитической химии.

Комплексный кристаллохимический анализ является неотъемлемым и критически важным этапом современной минералого-технологической оценки руд. На примере конкретных минеральных видов в данной работе



демонстрируется, как понимание их кристаллохимии позволяет прогнозировать их поведение в технологических процессах, оценивать возможность извлечения ценных компонентов и разрабатывать более эффективные и экологичные схемы обогащения, что в конечном итоге способствует решению стратегических задач в области недропользования.

В основе прогнозирования функциональных свойств минералов лежит установление количественных корреляций между кристаллохимическими параметрами и макроскопическими характеристиками. Ключевой концепцией является положение о том, что технологически значимые свойства (ионная проводимость, сорбционная емкость, термическая стабильность, оптические характеристики) не являются эмпирическими константами, а детерминируются комплексом кристаллохимических факторов. К числу таких кристаллохимических дескрипторов относятся размер и геометрия каналов и полостей структурного каркаса, валентные состояния и ионные радиусы катионов, природа химической связи, а также концентрация и тип точечных дефектов.

Таким образом, экспериментальная задача заключается в комплексном определении указанных параметров с последующей экстраполяцией установленных взаимосвязей для прогноза поведения минерала в условиях, моделирующих конкретные технологические процессы (обогащение, выщелачивание, термическая обработка). Интеграция данных, полученных всей совокупностью аналитических методов, создает основу для построения достоверных прогностических моделей, связывающих кристаллохимические параметры с функциональными свойствами минералов. Важно подчеркнуть, что эти же данные несут важнейшую геохимическую и минерагеническую информацию, позволяя реконструировать условия образования минералов, и, следовательно, могут использоваться для разработки генетических и поисковых критериев.

### Материалы и методы исследования

Кристаллохимическое исследование предъявляет строгие требования к аналитическому инструментарию, который может быть систематизирован по решаемым задачам.

*Методы определения элементного состава.* Электронно-зондовый микроанализ сохраняет статус референтного метода для коли-

чественного определения макро- и микрокомпонентного состава с пространственным разрешением на уровне микронных масштабов. Метод обеспечивает получение данных, необходимых для установления точных химических формул минералов и расчета коэффициентов распределения элементов. Для анализа ультранизких содержаний редких, редкоземельных и рудных элементов, а также изотопного состава ключевым инструментом является масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (LA-ICP-MS, *от англ.*: Laser ablation – inductively coupled plasma mass spectrometry).

*Рентгенодифракционные методы.* Рентгенодифракционные методы составляют основу структурных исследований. Методологически они разделяются на два основных направления:

1. Рентгенофазовый анализ (XRD, *от англ.*: X-ray diffraction) решает задачи качественной идентификации кристаллических фаз и полуколичественного определения их содержания в поликристаллических образцах, что критически важно для оценки минерального состава руд.

2. Рентгеноструктурный анализ (SCXRD, *от англ.*: Single-crystal X-ray diffraction) является основным методом расшифровки кристаллической структуры. Наиболее информативна монокристаллическая дифрактометрия, позволяющая с высокой точностью определить симметрию, параметры элементарной ячейки, координаты атомов и межатомные расстояния. Для полифазных образцов или в случаях, когда получение монокристаллов невозможно, высокоэффективен метод Ритвельда, основанный на полнопрофильном анализе порошковых дифрактограмм.

*Методы исследования локального атомного окружения и электронного состояния.* Важнейшим аспектом является применение методов, чувствительных к тонким эффектам, не всегда фиксируемым дифракционными методами:

1. Виброспектроскопические методы (инфракрасная – ИК-спектроскопия и спектроскопия комбинационного рассеяния – КР-спектроскопия) предоставляют прямую информацию о типах химических связей, составе и конфигурации анионных комплексов ( $\text{SiO}_4$ ,  $\text{BO}_3$ ,  $\text{CO}_3$ ), а также идентифицируют летучие компоненты (ОН-группы,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Их совместное применение обеспечивает верификацию структурных моделей.



2. Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) служит прямым методом детектирования парамагнитных центров (ионы  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ), позволяя изучать природу точечных дефектов и валентные состояния элементов-примесей.

3. Мёссбауэровская спектроскопия представляет собой селективный метод исследования локального окружения и электронного состояния железа, обеспечивая точное определение его валентности, типа координации и параметров кристаллографических позиций.

4. Рентгеноспектральные методы (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия – РФЭС, XANES, *от англ.*: X-ray absorption near edge structure и EXAFS, *от англ.*: Extended X-ray absorption fine structure) позволяют определять валентные состояния элементов и параметры локального координационного окружения даже в аморфных и нанокристаллических фазах.

В настоящей работе на примере конкретных представителей сложных силикатных минералов продемонстрирована практическая реализация комплексного методологического подхода, детально рассмотрены кейсы, иллюстрирующие, как целенаправленная интеграция данных рентгеновской дифракции, электронно-зондового микроанализа, мёссбауэровской, ИК- и КР-спектроскопии, ЭПР, оптической спектроскопии и люминесценции позволяет решать фундаментальные кристаллохимические задачи, в числе которых:

1) точный расчет сложных эмпирических формул с установлением стехиометрических коэффициентов и распределения катионов по структурным позициям;

2) установление ионообменных и окислительно-восстановительных механизмов в минералах при термовоздействии;

3) реконструкция условий минералообразования на основе кристаллохимических индикаторов;

4) анализ тонких структурных особенностей, включая позиционное разупорядочение и природу точечных дефектов;

5) изучение генетической природы макроскопических свойств, таких как окраска и люминесценция.

Совместная интерпретация результатов независимых методов обеспечивает построение достоверных кристаллохимических моделей и создает основу для прогнозирования технологического поведения минерального вещества, способствуя переходу к прогности-

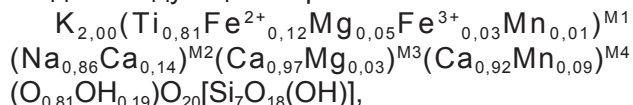
ческому моделированию обогатительных и функциональных свойств руд.

### Результаты исследования и их обсуждение

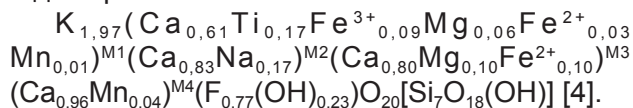
*Расчет сложных эмпирических формул.* В качестве иллюстрации практической реализации комплексного методологического подхода рассмотрены изоструктурные редкие силикатные минералы, такие как тинаксит ( $\text{K}_2\text{TiNaCa}_2[\text{Si}_7\text{O}_{18}\text{OH}]\text{O}$ ) и токкоит ( $\text{K}_2\text{Ca}_4[\text{Si}_7\text{O}_{18}\text{OH}](\text{OH},\text{F})$ ), содержащие гибридные силикатные анионы [1]. Ограниченная распространенность этих минералов обусловила их недостаточную кристаллохимическую изученность. Визуально исследуемые образцы характеризуются спектром окраски от ярко-коричневого до красно-оранжевого оттенка; тинаксит-содержащие разности чароитита имеют светло-коричневую окраску, а токкоит-содержащие – от светло-коричневой до бурой [2, 3]. Экспонаты представлены в коллекции Государственного минералогического музея имени А.В. Сидорова Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) (г. Иркутск, Россия).

Комплексное применение аналитических методов позволило установить кристаллохимические формулы минералов через распределение катионов по структурным позициям. Мёссбауэровская спектроскопия обеспечила количественное определение соотношения  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , выявив значительную долю трехвалентного железа: 40,0 (7) % в токкоите и 12,8 (3) % в тинаксите [4–8]. Методом ЭПР в тинаксите идентифицированы сигналы от  $\text{Mn}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , тогда как в токкоите обнаружено  $\text{Fe}^{3+}$  в двух неэквивалентных октаэдрических позициях, что подтвердило предложенные модели [9].

Таким образом, для изученного образца тинаксита кристаллохимическая формула выглядит следующим образом:



а для кристалла токкоита:



На основе интеграции химических и структурных данных установлено, что переход от токкоита к тинакситу осуществляется через изоморфное замещение по схеме:  $2\text{Ca}^{2+}_{(M1+M2)} + (\text{F},\text{OH})^{-}_{(O20)} \leftrightarrow \text{Ti}^{4+}_{(M1)} + \text{Na}^{+}_{(M2)} + \text{O}^{2-}_{(O20)}$  [4, 10].

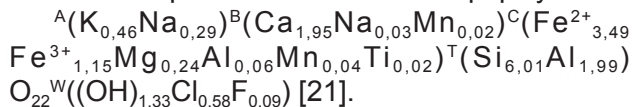


Данная катион-анионная замещающая группа является причиной локальных напряжений в структуре, затрагивающих, в первую очередь, позицию M1 и ее взаимодействие с позициями M2 и M3.

Спектроскопические исследования выявили полосы поглощения в области 600–800 нм, принадлежащие  $Mn^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , что обуславливает окраску минералов [9]. Исследования люминесценции показали термически стабильное свечение в зеленой области спектра, связанное с  $d-d$ -переходами в ионах  $Mn^{2+}$ , а в тинаксите – также с центрами на основе  $Ti^{3+}$  [9, 11–14]. Полученные результаты демонстрируют перспективность соединений со структурой тинаксита и токкоита, легированных ионами  $Mn^{2+}$  для создания люминофоров, не содержащих редкоземельные элементы [9].

Таким образом, интеграция методов аналитической химии и дифракционного анализа позволяет не только решать сложные кристаллохимические задачи для тонкоигольчатых и радиально-лучистых агрегатов, но и устанавливать количественные корреляции «состав – структура – свойства» для прогнозирования функциональных характеристик минерального сырья.

*Изучение ионообменных механизмов.* Амфиболы, обладая исключительной химической вариабельностью и кристаллохимической гибкостью, представляют собой идеальные модели для изучения ионообменных и окислительно-восстановительных процессов в минеральных системах [15–20]. В рамках данного исследования был изучен калий-гастингсит из Кедровского района Восточной Сибири (Россия). Его образец также представлен в коллекции Государственного минералогического музея имени А.В. Сидорова ИРНИТУ с кристаллохимической формулой:



Комплексное кристаллохимическое исследование включало высокотемпературный рентгенофазовый анализ, который выявил двухстадийный характер его термической эволюции:

- термическое расширение (30–350 °C), связанное с нагревом структуры;
- структурное сжатие (эффект отрицательного теплового расширения) в интервале 400–600 °C.

Для установления природы наблюдаемых структурных изменений важную роль сыграло

определение валентного состояния железа методом рентгеноспектрального микроанализа [21]. Спектроскопические исследования (оптическая спектроскопия, ЭПР) зафиксировали существенные изменения при термической обработке – в спектрах поглощения наблюдалось увеличение интенсивности полос, характерных для  $Fe^{3+}$ , при одновременном уменьшении интенсивности полос  $Fe^{2+}$  [22–25]. Спектры ЭПР [21] продемонстрировали увеличение интенсивности и изменение характера сигнала после отжига, что свидетельствует о появлении ионов  $Fe^{3+}$  в новой координационной среде.

Интеграция полученных данных позволила установить, что при нагревании свыше 400–500 °C в структуре калий-гастингсита протекает необратимый окислительно-восстановительный процесс по механизму [26]  $Fe^{2+} + OH^{-} \rightarrow Fe^{3+} + O^{2-} + 1/2H_2$ . Данная реакция является причиной наблюдаемого структурного сжатия и необратимого изменения окраски минерала [21].

Полученные результаты имеют важное минерагеническое и поисковое значение. Петрографический анализ рудного образца позволил отнести его к кальциево-железистым постмагматическим скарнам. Тот факт, что депротонирование и окисление железа в изученном калий-гастингсита являются необратимыми, свидетельствует о том, что после гидросиликатной и заключительной гидротермальной стадий формирования скарнов породы не подвергались воздействию температур выше 400–450 °C, то есть имели ретроградный характер [27–33]. Таким образом, кристаллохимический анализ термического поведения минерала позволяет реконструировать пострудную термальную историю месторождения и устанавливать верхний температурный предел для наложенных процессов.

*Реконструкция условий минералообразования.* Реконструкция условий минералообразования представляет собой одну из ключевых задач в минерагении, решение которой возможно на основе комплексного кристаллохимического анализа. Яркой иллюстрацией данного подхода служит исследование редкого слоистого силиката – федорита, имеющего формулу  $(Na,K)_{2-3}Ca_4Na_3(Si_{16}O_{38})F_2 \cdot 3,5H_2O$ , обнаруженного в различных парагенетических ассоциациях Мурунского массива (граница Иркутской области и Республики Саха (Якутия), Россия). Для сравнительного



анализа были отобраны образцы из брукит-анатаз-кварц-полевошпатовых пород Гавриловской зоны Мурунского массива и из чароитов Иркутского и Якутского районов [34], которые также были переданы в коллекцию Государственного минералогического музея имени А.В. Сидорова ИРНТУ.

Кристаллическая структура федорита характеризуется наличием силикатных и октаэдрических слоев, разделенных межслоевым пространством, содержащим катионы калия и молекулы воды, что предопределяет его ионообменные и сорбционные свойства [35]. Комплексное исследование выявило вариабельность химического состава, проявляющуюся в изменении содержания межслоевых катионов (K, Na) и молекул H<sub>2</sub>O [34]. Структурное исследование показало, что молекулы воды занимают несколько частично заселенных позиций (O20<sub>w</sub>–O24<sub>w</sub>) и характеризуются позиционным разупорядочением, степень которого варьирует между образцами.

Методами виброспектроскопии (ИК- и КР-спектроскопия) установлено, что состав и степень упорядочения летучих компонентов являются диагностическим признаком, позволяющим дифференцировать образцы из разных парагенезисов. Впервые для федорита получены спектры ЭПР, оптического поглощения и люминесценции [34]. Полоса люминесценции выявлена в области 740–800 нм и обусловлена электронными переходами в ионах Mn<sup>2+</sup> [36–38]. Установлено, что характерная бледно-малиновая окраска образцов связана с присутствием ионов Mn<sup>4+</sup> в октаэдрических позициях [39–41].

Эксперимент по высокотемпературной монокристаллической рентгеновской дифракции в интервале 25–600 °С выявил двухстадийный процесс дегидратации [42]:

- непрерывная дегидратация (25–300 °С) с потерей большей части молекул воды;
- миграция остаточной воды (выше 300 °С) с перераспределением оставшихся молекул H<sub>2</sub>O в единственную позицию O20<sub>w</sub>, что сопровождается сокращением межатомных расстояний Na–Na.

Интеграция данных о парагенезисах, составе расплавных и флюидных включений [43, 44] и кристаллохимических особенностях минералов позволила реконструировать условия образования федорита. Установлено, что образцы из чароитов кристаллизовались на ранних высокотемпературных стади-

ях (более 800 °С) в гетерофазной системе с участием карбонатно-силикатных расплавов, тогда как федорит из брукит-анатаз-парагенезиса Гавриловской зоны сформировался при более низких температурах (280–210 °С) в гидротермальных условиях. Этот вывод подтверждается более высоким содержанием и большей степенью разупорядочения молекул воды в структуре низкотемпературного федорита, что делает эти параметры надежными кристаллохимическими индикаторами температуры минералообразования.

Таким образом, комплексный кристаллохимический анализ, включающий изучение состава, структурных особенностей и термического поведения, позволяет не только диагностировать индивидуальные особенности минералов, но и количественно реконструировать параметры рудообразующей среды, что имеет фундаментальное значение для разработки генетических и поисковых моделей месторождений.

*Анализ тонких структурных особенностей.* Ярким примером решения сложных кристаллохимических задач посредством комплексного анализа минерального сырья является исследование минералов подгруппы быстри-та (быстри-т, Na<sub>7</sub>Ca[Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>24</sub>](S<sub>5</sub>)<sup>2-</sup>Cl, и сульфгидрилбыстри-т, Na<sub>5</sub>K<sub>2</sub>Ca[Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>24</sub>](S<sub>5</sub>)<sup>2-</sup>(SH)) – редких каркасных алюмосиликатов группы канкринита [45]. Принципиальное значение имело установление в их структурах ранее не идентифицированных в минеральных видах серосодержащих анионов: пентасульфидного кластера S<sub>5</sub><sup>2-</sup> и сульфгидрильной группы (SH)<sup>-</sup> [46].

Кристаллическая структура минералов образована каркасом из алюмоокислородных и кремнекислородных тетраэдров, формирующих систему CAN- и LOS-полостей (CAN, *от англ.*: cancrinite; LOS, *от англ.*: losod) [47]. Ключевое различие между быстри-том и сульфгидрилбыстри-том заключается в составе цепочек, локализованных в канкринитовых полостях: –Ca–Cl–Ca–Cl– в быстри-те и –Ca–(SH)–Ca–(SH)– в сульфгидрилбыстри-те.

Наличие (SH)<sup>-</sup>-группы, впервые достоверно установленное в минералах, было подтверждено следующей комбинацией методов: данные рентгеноструктурного анализа выявили позиции тяжелых атомов S [48], а КР-спектроскопия зафиксировала интенсивную полосу валентных колебаний H–S при ~2560 см<sup>-1</sup> [49], которая в спектре быстри-та проявляется



значительно слабее, что полностью согласуется с различиями в химическом составе [50].

Совместная интерпретация химических, структурных и спектроскопических данных позволила разрешить длительно существовавшее противоречие между химической и структурной формулами быстриита и обосновать регистрацию сульфгидрилбыстриита в качестве нового минерального вида, представленного в коллекции Государственного минералогического музея имени А.В. Сидорова ИРНТУ.

Установление сульфгидрильной группы имеет важное минерагеническое значение, так как она является индикатором высоковосстановительных условий минералообразования [49, 50]. Формирование этих минералов в мраморах, обогащенных графитом и пиритом, согласуется с такой геохимической обстановкой [51]. Отсутствие широкого изоморфизма между  $\text{Cl}^-$  и  $(\text{SH})^-$  в данном случае обусловлено, вероятно, не кристаллохимическими ограничениями (ионы близки по эффективным радиусам), а геохимическими факторами (различиями в локальных флюидных системах), что подчеркивает важность интеграции данных для корректной генетической интерпретации.

Таким образом, комбинация рентгеноструктурной диагностики, электронно-зондового микроанализа и виброспектроскопии позволила выявить уникальные тонкие структурные особенности (редкие серосодержащие анионы и специфические цепочки в структурных полостях), что имело решающее значение для систематики минералов и реконструкции условий их кристаллизации в восстановительной среде.

*Установление природы окраски минералов.* Установление генетической природы окраски минералов является классической задачей кристаллохимии, решение которой имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение для оценки декоративных свойств и прогнозирования поведения материалов в радиационных полях. Яркой иллюстрацией эффективности комплексного подхода служит исследование радиационно-индуцированной окраски у микропористых алюмосиликатов: канкринита и мейонита (скаполит).

Кристаллическая структура канкринита (эмпирическая формула  $\text{Na}_{6,47}\text{Ca}_{1,23}\text{K}_{0,01}[\text{Al}_{5,97}\text{Si}_{6,03}\text{O}_{24}](\text{CO}_3)^{2-}_{1,45}(\text{SO}_4)_{0,03}\text{Cl}_{0,01}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) характеризуется каркасом, формирующим систему канкринитовых полостей и каналов, содержащих карбонатные группы [52–55].

Комплексное исследование с применением электронно-зондового микроанализа, рентгеноструктурного определения, ИК- и КР-спектроскопии, а также спектроскопии поглощения и ЭПР выявило, что под воздействием ионизирующего излучения (доза  $\sim 10^4$  Гр) минерал приобретает устойчивую синюю окраску [56]. Метод ЭПР зафиксировал сигнал, однозначно соответствующий дырочным центрам на карбонатных группах анион-радикалам  $(\text{CO}_3)^{\cdot-}$ , что и является причиной возникновения окраски [57, 58].

Установленная для канкринита корреляция позволила систематизировать природу окраски у других синих минералов (например, карлтонита и фторкарлтонита) [59, 60]. У исследованного образца мейонита с формулой  $\text{Ca}_{3,13}\text{Na}_{0,68}\text{K}_{0,02}[\text{Al}_{5,40}\text{Si}_{6,60}\text{O}_{24}](\text{CO}_3)_{0,58}(\text{SO}_4)_{0,16}\text{Cl}_{0,08}$  и мейонитовым числом 82 % голубая окраска также обусловлена образованием стабильных анион-радикалов  $(\text{CO}_3)^{\cdot-}$  [61]. Это подтверждается данными оптической спектроскопии (широкая полоса поглощения с максимумом  $\sim 600$  нм) и ЭПР [62].

Исследование другого образца мейонита, экземпляра серо-желтого цвета с формулой  $\text{Ca}_{2,12}\text{Na}_{1,81}\text{K}_{0,04}[\text{Al}_{4,49}\text{Si}_{7,51}\text{O}_{24}](\text{CO}_3)_{0,55}\text{Cl}_{0,26}(\text{SO}_4)_{0,12}$  и мейонитовым числом 53 %, выявило альтернативный хромофорный механизм. В данном случае окраска и интенсивная желтая люминесценция обусловлены присутствием анион-радикалов  $\text{S}_2^{\cdot-}$  [63], что демонстрирует высокую чувствительность оптических свойств скаполитов к вариациям химического состава и степени окисления анионных составляющих.

Выявленная способность канкринита и мейонита к образованию стабильных радиационных центров окраски открывает перспективы их применения в качестве природных моделей для создания функциональных материалов, таких как люминофоры белого света и оптической маркировки на основе скаполита (демонстрирующего собственную люминесценцию в видимой области), дозиметры ионизирующего излучения (где стабильные анион-радикальные центры служат индикатором накопленной дозы), а также материалы для систем визуализации с управляемыми оптическими характеристиками.

Таким образом, комплексный кристаллохимический анализ, интегрирующий спектроскопические и дифракционные методы, позволяет не только установить природу окраски, но и



выявить корреляции «состав – дефект – свойство», являющиеся основой для целенаправленного прогнозирования и дизайна функциональных свойств минерального сырья.

### Заключение

Проведенные кристаллохимические исследования на примере ряда сложных силикатных минералов (тинаксит, токкоит, калий-гастингсит, федорит, быстрил, сульфидрилбыстрил, канкринит, мейонит) наглядно демонстрируют, что комплексное применение современных методов аналитической химии – рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа, электронной микросондовой диагностики, мёссбауэровской, ИК- и КР-спектроскопии, ЭПР, оптической спектроскопии и люминесценции – позволяет выявлять фундаментальные корреляции между составом, структурой и функциональными свойствами минерального вещества.

На конкретных примерах показано, что интеграционный подход, примененный в данном исследовании, позволяет решать ключевые задачи, имеющие непосредственное значение для геологии, поисков и разведки твердых полезных ископаемых:

1) точный расчет формул и расшифровка изоморфных замещений (тинаксит – токкоит, быстрил – сульфидрилбыстрил) обеспечивают достоверную диагностику минеральных видов и понимание эволюции минералообразующих систем;

2) расшифровка механизмов термических и окислительно-восстановительных превращений (калий – гастингсит, федорит) позво-

ляет не только прогнозировать поведение минералов в технологических процессах, но и реконструировать пострудную термальную историю месторождений;

3) реконструкция условий минералообразования на основе кристаллохимических индикаторов (степень гидратации и разупорядочения в федорите, наличие сульфидрильных групп в быстрил и сульфидрилбыстрил как маркеров восстановительной обстановки) создает основу для разработки генетических и поисковых моделей;

4) установление природы функциональных свойств (радиационно-индуцированная окраска в канкрините и мейоните, люминесценция в скаполитах) открывает путь к оценке технологического потенциала минерального сырья и созданию на его основе перспективных функциональных материалов.

Таким образом, комплексный кристаллохимический анализ является неотъемлемым и критически важным этапом современной минералого-технологической оценки руд. Он обеспечивает переход от эмпирического описания к прогностическому моделированию поведения минерального вещества в процессах обогащения и высокотехнологичных применениях. Данный подход вносит значительный вклад как в развитие фундаментальных основ минералогии и геохимии, устанавливая обобщающие корреляции «генезис – структура – свойства», так и в решение прикладных задач рационального недропользования, определяя стратегические направления глубокой переработки минерального сырья.

### Список источников

1. Liebau F. Structural chemistry of silicates: structure, bonding, and classification. Heidelberg: Springer, 2012. 354 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-50076-3>.
2. Порог Ю.Г., Порова В.П., Воронков А.А., Молева В.А. Тинаксит,  $\text{NaK}_2\text{Ca}_2\text{TiSi}_7\text{O}_{19}(\text{OH})$  – новый минерал // Доклады Академии наук СССР. 1965. Т. 162. № 3. С. 658–661.
3. Лазебник К.А., Никишова Л.В., Лазебник Ю.Д. Токкоит – новый минерал чароититов // Минералогический журнал. 1986. Т. 8. № 3. С. 85–89.
4. Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Schingaro E., Kaneva E., Vladyskin N. [et al.]. Structure refinement and crystal chemistry of tokkoite and tinaksite from the Murun massif (Russia) // Mineralogical Magazine. 2017. Vol. 81. Iss. 2. P. 251–272. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.094>. EDN: BTXUHW.
5. Dyar M.D., Sklute E.C., Agresti D.G., Schaefer M.W., Grant C.A. Mössbauer spectroscopy of earth and planetary materials // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2006. Vol. 34. P. 83–125. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125049>. EDN: MJCQKP.
6. Lacalamita M., Schingaro E., Scordari F., Ventrucci G., Fabbrizio A., Pedrazzi G. Substitution mechanisms and implications for the estimate of water fugacity for Ti-rich phlogopite from Mt. Vulture, Potenza, Italy // American Mineralogist. 2011. Vol. 96. Iss. 8–9. P. 1381–1391. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3772>. EDN: PQUXGJ.
7. Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Schingaro E. Chemical and structural study of 1M- and 2M<sub>1</sub>-phlogopites coexisting in the same Kasenyi kamafugitic rock (SW Uganda) // Physics and Chemistry of Minerals. 2012. Vol. 39. Iss. 8. P. 601–611. <https://doi.org/10.1007/s00269-012-0515-y>. EDN: WVDTLM.



8. Schingaro E., Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Kullerud K., Ravna E.J.K. [et al.]. Yangzhumingite and phlogopite from the Kvaløya lamproite (North Norway): Structure, composition and origin // *Lithos*. 2014. Vol. 210. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.020>. EDN: UFCJAD.
9. Kaneva E., Shendrik R. Tinaksite and tokkoite: X-ray powder diffraction, optical and vibrational properties // *Crystals*. 2022. Vol. 12. Iss. 3. P. 377. <https://doi.org/10.3390/cryst12030377>. EDN: HUOCM.
10. Рождественская И.В., Никишова Л.В. Кристаллохимические особенности щелочных кальциевых силикатов из чароититов. I. Конечные проективные плоскости и определяемые ими особые кластеры алмазоподобных структур // *Кристаллография*. 2002. Т. 47. № 4. С. 602–611.
11. Zhou Q., Wang Z., Wu M., Dolgov L., Zhou L., Shi J. [et al.]. Mn<sup>2+</sup> and Mn<sup>4+</sup> red phosphors: Synthesis, luminescence and applications in WLEDs. A review // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. Vol. 6. Iss. 11. P. 2652–2671. <https://doi.org/10.1039/C8TC00251G>. EDN: VGBYDY.
12. Yarovoy P.N. Laser-induced luminescence identification of materials. Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 1996. 176 p.
13. Rogers E.G., Dorenbos P. Vacuum energy referred Ti<sup>3+/4+</sup> donor/acceptor states in insulating and semiconducting inorganic compounds // *Journal of Luminescence*. 2014. Vol. 153. P. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.03.002>. EDN: SRVYUT.
14. Naik R., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Girish K.M. Electrochemical, photoluminescence and EPR studies of Fe<sup>3+</sup> doped nano Forsterite: Effect of doping on tetra and octahedral sites // *Journal of Luminescence*. 2018. Vol. 197. Iss. 5. P. 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.01.051>.
15. Oberti R., Boiocchi M., Zema M. Thermoelasticity, cation exchange, and deprotonation in Fe-rich holmquistite: Toward a crystal-chemical model for the high-temperature behavior of orthorhombic amphiboles // *American Mineralogist*. 2019. Vol. 104. Iss. 12. P. 1829–1839. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6966>.
16. Oberti R., Boiocchi M., Zema M., Hawthorne F.C., Redhammer G.J., Susta U. [et al.]. The high-temperature behavior of riebeckite: expansivity, deprotonation, selective Fe oxidation and a novel cation disordering scheme for amphiboles // *European Journal of Mineralogy*. 2018. Vol. 30. Iss. 3. P. 437–449. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2712>. EDN: VHCYAK.
17. Della Ventura G., Mihailova B., Susta U., Cestelli Guidi M., Marcelli A., Schlüter J. [et al.]. The dynamics of Fe oxidation in riebeckite: A model for amphiboles // *American Mineralogist*. 2018. Vol. 103. Iss. 7. P. 1103–1111. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6382>.
18. Oberti R., Boiocchi M., Zema M., Della Ventura G. Synthetic potassic-ferro-richterite: 1. Composition, crystal structure refinement, and HT behavior by in operando single-crystal X-ray diffraction // *The Canadian Mineralogist*. 2016. Vol. 54. Iss. 1. P. 353–369. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500073>.
19. Della Ventura G., Susta U., Bellatreccia F., Marcelli A., Redhammer G.J., Oberti R. Deprotonation of Fe-dominant amphiboles: Single-crystal HT-FTIR spectroscopic studies of synthetic potassic-ferro-richterite // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102. Iss. 1. P. 117–125. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5859>.
20. Kaneva E., Radomskaya T., Shendrik R., Chubarov V., Danilovsky V. Potassic-hastingsite from the Kedrov district (East Siberia, Russia): petrographic description, crystal chemistry, spectroscopy, and thermal behavior // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 10. P. 1049. <https://doi.org/10.3390/min11101049>. EDN: VECKYE.
21. Burns R.G. Mineralogical application of crystal field theory. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 557 p.
22. Goldman D.S., Rossman G.R., Dollase W.A. Channel constituents in cordierite // *American Mineralogist*. 1977. Vol. 62. Iss. 11–12. P. 1144–1157.
23. Taran M.N., Langer K. Electronic absorption spectra of Fe<sup>2+</sup> ions in oxygen-based rock-forming minerals at temperatures between 297 and 600 K // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2001. Vol. 28. Iss. 3. P. 199–210. <https://doi.org/10.1007/s002690000148>. EDN: XJMZWX.
24. Fontana I., Lauria A., Spinolo G. Optical absorption spectra of Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> in aqueous solutions and hydrated crystals // *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 2007. Vol. 244. Iss. 12. P. 4669–4677. <https://doi.org/10.1002/pssb.200743103>.
25. Abragam A., Bleaney B. Electron paramagnetic resonance of transition ions. Oxford: Oxford University Press, 2012. 928 p.
26. Skogby H., Rossman G.R. OH<sup>-</sup> in pyroxene: An experimental study of incorporation mechanisms and stability // *American Mineralogist*. 1989. Vol. 74. P. 1059–1069.
27. Burt D.M. Metasomatic zoning in Ca-Fe-Si exoskarns // *Geochemical Transport and Kinetics: papers presented at a conference* / eds A.W. Hofmann, B.J. Giletti, H.S. Yoder Jr., R.A. Yund. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1974. Vol. 634. P. 287–293.
28. Pertsev N.N. Skarns as magmatic and as postmagmatic formations // *International Geology Review*. 1974. Vol. 16. Iss. 5. P. 572–582. <https://doi.org/10.1080/00206817409471840>.
29. Burt D.M. Mineralogy and petrology of skarn deposits // *Rendiconti – Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*. 1977. Vol. 33. Iss. 2. P. 859–873.
30. Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. World skarn deposits // *Economic Geology*. 100<sup>th</sup> Anniversary Volume 1905–2005: Chapter: World Skarn Deposits / eds J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2005. P. 299–336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>.
31. Einaudi M.T., Burt D.M. Introduction – terminology, classification, and composition of skarn deposits // *Economic Geology*. 1982. Vol. 77. Iss. 4. P. 745–754. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.4.745>.



32. Meinert L.D. Skarns and skarn deposits // *Geoscience Canada*. 1992. Vol. 19. Iss. 4. P. 145–162.
33. Alaminia Z., Mehrabi B., Razavi S.M.H., Tecce F. Mineral chemistry, petrogenesis and evolution of the Ghorveh-Seranjic skarn, Northern Sanandaj Sirjan Zone, Iran // *Mineralogy and Petrology*. 2020. Vol. 114. Iss. 1. P. 15–38. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00688-6>. EDN: NUVCKL.
34. Kaneva E.V., Shendrik R.Yu., Radomskaya T.A., Suvorova L.F. Fedorite from Murun alkaline complex (Russia): spectroscopy and crystal chemical features // *Minerals*. 2020. Vol. 10. Iss. 8. P. 1–23. <https://doi.org/10.3390/min10080702>. EDN: XSHQEQ.
35. Mitchell R.H., Burns P.C. The structure of fedorite: a re-appraisal // *The Canadian Mineralogist*. 2001. Vol. 39. Iss. 3. P. 769–777. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.3.769>.
36. Яровой П.Н., Бадеников В.Я. Люминесценция и взаимодействие лазерного излучения с диэлектриками. Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2004. 275 с.
37. Hasegawa T., Nishiwaki Y., Fujishiro F., Kamei S., Ueda T. Quantitative determination of the effective Mn<sup>4+</sup> concentration in a Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>:Mn<sup>4+</sup> phosphor and its effect on the photoluminescence efficiency of deep red emission // *ACS Omega*. 2019. Vol. 4. Iss. 22. P. 19856–19862. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02798>.
38. Khaidukov N.M., Brekhovskikh M.N., Kirikova N.Yu., Kondratyuk V.A., Makhov V.N. Luminescence of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel ceramic containing some 3<sup>d</sup> ions // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. Iss. 13. P. 21351–21359. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.231>. EDN: XPDYGM.
39. Zhang Y., Liu Y., Yang L., Hu S., Wang Z., Nian H. [et al.]. Preparation and luminescence properties of thermally stable Mn<sup>4+</sup> doped spinel red-emitted ceramic phosphors // *Journal of Luminescence*. 2020. Vol. 220. P. 117016. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.117016>. EDN: SCTSCH.
40. Tanabe Y., Sugano S. On the absorption spectra of complex ions II // *Journal of the Physical Society of Japan*. 1954. Vol. 9. Iss. 5. P. 766–779. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.9.766>.
41. Lacalamita M., Mesto E., Kaneva E., Shendrik R., Radomskaya T., Schingaro E. High-temperature behaviour of fedorite, Na<sub>2.5</sub>(Ca<sub>4.5</sub>Na<sub>2.5</sub>)[Si<sub>16</sub>O<sub>38</sub>]F<sub>2</sub>·2.8H<sub>2</sub>O, from the Murun Alkaline Complex, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2023. Vol. 87. Iss. 4. P. 542–553. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.31>. EDN: DCAVOS.
42. Vladykin N.V., Borokovikov A.A., Dokuchits E.Yu., Thomas V.G. Genesis of charoite rocks in the Murun Massif, Aldan Shield, Russia // *Geochemistry International*. 2018. Vol. 56. Iss. 12. P. 1135–1147. <https://doi.org/10.1134/S0016702918120108>. EDN: QWEMQR.
43. Borovikov A.A., Tretiakova I.G., Vladykin N.V., Dokuchits E.Y. Physicochemical conditions of formation of hydrothermal titanium mineralization on the Murunskiy alkaline massif, western Aldan (Russia) // *Ore Geology Reviews*. 2018. Vol. 95. P. 1066–1075. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.007>. EDN: XRPML.
44. Bonaccorsi E., Ballirano P., Cámara, F. The crystal structure of sacrofanite, the 74 Å phase of the cancrinite-sodalite supergroup // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2012. Vol. 147. Iss. 1. P. 318–326. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.06.033>. EDN: PHALXD.
45. Sapozhnikov A.N., Kaneva E.V., Suvorova L.F., Levitsky V.I., Ivanova L.A. Sulfhydrylbystrite, Na<sub>5</sub>K<sub>2</sub>Ca(Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>24</sub>)(S<sub>5</sub>)(SH), a new mineral with the LOS framework, and re-interpretation of bystrite: cancrinite-group minerals with novel extra-framework anions // *Mineralogical Magazine*. 2017. Vol. 81. Iss. 2. P. 383–402. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.106>. EDN: BMRHBP.
46. McCusker L.B., Liebau F., Engelhardt G. Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts (IUPAC Recommendations 2001) // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2003. Vol. 58. Iss. 1. P. 3–13. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00545-0](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00545-0). EDN: BFUXGT.
47. Chukanov N., Sapozhnikov A., Kaneva E., Varlamov D., Vigasina M. Bystrite, Na<sub>7</sub>Ca(Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>24</sub>)S<sub>5</sub><sup>2-</sup>Cl<sup>-</sup>: formula redefinition and relationships with other four-layer cancrinite-group minerals // *Mineralogical Magazine*. 2023. Vol. 87. Iss. 3. P. 455–464. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.29>. EDN: FYFBCF.
48. Chukanov N.V., Shendrik R.Yu., Vigasina M.F., Pekov I.V., Sapozhnikov A.N., Shcherbakov I.D. [et al.]. Crystal chemistry, isomorphism, and thermal conversions of extra-framework components in sodalite-group minerals // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 7. P. 887. <https://doi.org/10.3390/min12070887>. EDN: YTPUHN.
49. Chukanov N.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Vigasina M.F., Yapaskurt V.O., Pushcharovsky D.Yu. [et al.]. Sapozhnikovite, Na<sub>8</sub>(Al<sub>6</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>24</sub>)(HS)<sub>2</sub>, a new sodalite-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // *Mineralogical Magazine*. 2022. Vol. 86. Iss. 1. P. 49–59. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.94>. EDN: IQEYSQ.
50. Сапожников А.Н., Иванов В.Г., Пискунова Л.Ф., Кашаев А.А., Терентьева Л.Е., Победимская Е.А. Быстрит Ca(Na,K)<sub>7</sub>(Si<sub>6</sub>Al<sub>6</sub>O<sub>24</sub>)(S<sub>3</sub>)<sub>1.5</sub>·H<sub>2</sub>O – новый канкринитоподобный минерал // *Записки всесоюзного минералогического общества*. 1991. Т. 120. № 3. С. 97–100.
51. Della Ventura G., Gatta G.D., Redhammer G.J., Bellatreccia F., Loose A., Parodi G.C. Single-crystal polarized FTIR spectroscopy and neutron diffraction refinement of cancrinite // *Physics and Chemistry of Minerals*. 2009. Vol. 36. Iss. 4. P. 193–206. <https://doi.org/10.1007/s00269-008-0269-8>. EDN: MMQRNT.
52. Pekov I.V., Olysyh L.V., Chukanov N.V., Zubkova N.V., Pushcharovsky D.Yu., Van K.V. [et al.]. Crystal chemistry of cancrinite-group minerals with an AB-type framework: a review and new data. I. Chemical and structural variations // *The Canadian Mineralogist*. 2011. Vol. 49. Iss. 5. P. 1129–1150. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.5.1129>. EDN: PEQOGJ.
53. Chukanov N.V., Pekov I.V., Olysyh L.V., Zubkova N.V., Vigasina M.F. Crystal chemistry of cancrinite-group minerals with an AB-type framework: a review and new data. II. IR spectroscopy and its crystal-chemical implications // *The Canadian Mineralogist*. 2011. Vol. 49. Iss. 5. P. 1151–1164. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.5.1151>. EDN: PEQOCD.



54. Bonaccorsi E., Merlino S. Modular microporous minerals: cancrinite-davyne group and C–S–H phases // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2005. Vol. 57. Iss. 1. P. 241–290. <http://doi.org/10.2138/RMG.2005.57.8>. EDN: MJGPBV.
55. Shendrik R., Kaneva E., Radomskaya T., Sharygin I., Marfin A. Relationships between the structural, vibrational, and optical properties of microporous cancrinite // *Crystals*. 2021. Vol. 11. Iss. 3. P. 280. <https://doi.org/10.3390/cryst11030280>. EDN: ZXTDGF.
56. Hossain F.M., Murch G.E., Belova I.V., Turner B.D. Electronic, optical and bonding properties of CaCO<sub>3</sub> calcite // *Solid State Communications*. 2009. Vol. 149. Iss. 29–30. P. 1201–1203. <http://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.04.026>.
57. Thøgersen J., Weidner T., Jensen F. The primary photolysis of aqueous carbonate di-anions // *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*. 2023. Vol. 25. Iss. 20. P. 14104–14116. <http://doi.org/10.1039/d3cp00236e>. EDN: KAMAOW.
58. Kaneva E., Radomskaya T., Shendrik R. Fluorcarletonite – a new blue gem material // *The Journal of Gemmology*. 2022. Vol. 38. Iss. 4. P. 376–385. <https://doi.org/10.15506/JoG.2022.38.4.376>. EDN: YYZGYF.
59. Kaneva E., Bogdanov A., Radomskaya T., Belozeroва O., Shendrik R. Crystal-chemical characterisation and spectroscopy of fluorcarletonite and carletonite // *Mineralogical Magazine*. 2023. Vol. 87. Iss. 3. P. 356–368. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.15>. EDN: LEKMER.
60. Kaneva E., Shendrik R. Radiation defects and intrinsic luminescence of cancrinite // *Journal of Luminescence*. 2022. Vol. 243. P. 118628. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118628>. EDN: GGGFBU.
61. Shendrik R., Chukanov N.V., Bogdanov A., Myasnikova A., Pankrushina E., Zolotarev A.A. [et al.]. Nature of scapolite color: Ab initio calculations, spectroscopy, and structural study // *Minerals*. 2024. Vol. 14. Iss. 9. P. 937. <https://doi.org/10.3390/min14090937>. EDN: DTCHYK.
62. Shendrik R., Kaneva E., Pankratova V., Pankrushina E., Radomskaya T., Gavrilenko V. [et al.]. Intrinsic luminescence and radiation defects in scapolite // *Chemical Physics Letters*. 2024. Vol. 838. P. 141081. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2024.141081>. EDN: QHVTFF.

### References

1. Liebau F. *Structural chemistry of silicates: structure, bonding, and classification*. Heidelberg: Springer; 2012, 354 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-50076-3>.
2. Rogov Y.G., Rogova V.P., Voronkov A.A., Moleva V.A. Tinaksite, NaK<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>TiSi<sub>7</sub>O<sub>19</sub>(OH), a new mineral. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1965;162:658-661. (In Russ.).
3. Lazebnik K.A., Nikishova L.V., Lazebnik Y.D. Tokkoite, a new mineral of charoitites. *Mineralogicheskii zhurnal*. 1986;8:85-89. (In Russ.).
4. Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Schingaro E., Kaneva E., Vladykin N., et al. Structure refinement and crystal chemistry of tokkoite and tinaksite from the Murun massif (Russia). *Mineralogical Magazine*. 2017;81(2):251-272. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.094>. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.135>. EDN: BTXUHW.
5. Dyar M.D., Sklute E.C., Agresti D.G., Schaefer M.W., Grant C.A. Mössbauer spectroscopy of earth and planetary materials. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2006;34:83-125. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125049>. EDN: MJCQKP.
6. Lacalamita M., Schingaro E., Scordari F., Ventrucci G., Fabbrizio A., Pedrazzi G. Substitution mechanisms and implications for the estimate of water fugacity for Ti-rich phlogopite from Mt. Vulture, Potenza, Italy. *American Mineralogist*. 2011;96(8-9):1381-1391. <https://doi.org/10.2138/am.2011.3772>. EDN: PQUXGJ.
7. Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Schingaro E. Chemical and structural study of 1M- and 2M<sub>1</sub>-phlogopites coexisting in the same Kasenyi kamafugitic rock (SW Uganda). *Physics and Chemistry of Minerals*. 2012;39(8):601-611. <https://doi.org/10.1007/s00269-012-0515-y>. EDN: PQUXGJ.
8. Schingaro E., Lacalamita M., Mesto E., Scordari F., Kullerud K., Ravna E.J.K., et al. Yangzhumingite and phlogopite from the Kvaløya lamproite (North Norway): Structure, composition and origin. *Lithos*. 2014;210:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.09.020>. EDN: UFCJAD.
9. Kaneva E., Shendrik R. Tinaksite and tokkoite: X-ray powder diffraction, optical and vibrational properties. *Crystals*. 2022;12(3):377. <https://doi.org/10.3390/cryst12030377>. EDN: HUOCM.
10. Rozhdestvenskaya I.V., Nikishova L.V. Crystallochemical features of alkali calcium silicates from charoitites I. Finite projective planes and the special clusters of diamond-like structures determined by them. *Kristallografiya*. 2002;47(4):602-611. (In Russ.).
11. Zhou Q., Wang Z., Wu M., Dolgov L., Zhou L., Shi J., et al. Mn<sup>2+</sup> and Mn<sup>4+</sup> red phosphors: Synthesis, luminescence and applications in WLEDs. A review. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018;6(11):2652-2671. <https://doi.org/10.1039/C8TC00251G>. EDN: VGBYDY.
12. Yarovoy P.N. *Laser-induced luminescence identification of materials*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 1996, 176 p.
13. Rogers E.G., Dorenbos P. Vacuum energy referred Ti<sup>3+/4+</sup> donor/acceptor states in insulating and semiconducting inorganic compounds. *Journal of Luminescence*. 2014;153:40-45. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.03.002>. EDN: SRVYUT.
14. Naik R., Prashantha S.C., Nagabhushana H., Girish K.M. Electrochemical, photoluminescence and EPR studies of Fe<sup>3+</sup> doped nano Forsterite: Effect of doping on tetra and octahedral sites. *Journal of Luminescence*. 2018;197(5):233-241. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.01.051>.



15. Oberti R., Boiocchi M., Zema M. Thermoelasticity, cation exchange, and deprotonation in Fe-rich holmquistite: Toward a crystal-chemical model for the high-temperature behavior of orthorhombic amphiboles. *American Mineralogist*. 2019;104(12):1829-1839. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6966>.
16. Oberti R., Boiocchi M., Zema M., Hawthorne F.C., Redhammer G.J., Susta U., et al. The high-temperature behavior of riebeckite: expansivity, deprotonation, selective Fe oxidation and a novel cation disordering scheme for amphiboles. *European Journal of Mineralogy*. 2018;30(3):437-449. <https://doi.org/10.1127/ejm/2018/0030-2712>. EDN: VHCYAK.
17. Della Ventura G., Mihailova B., Susta U., Cestelli Guidi M., Marcelli A., Schlüter J., et al. The dynamics of Fe oxidation in riebeckite: A model for amphiboles. *American Mineralogist*. 2018;103(7):1103-1111. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6382>.
18. Oberti R., Boiocchi M., Zema M., Della Ventura G. Synthetic potassic-ferro-richterite: 1. Composition, crystal structure refinement, and HT behavior by in operando single-crystal X-ray diffraction. *The Canadian Mineralogist*. 2016;54(1):353-369. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500073>.
19. Della Ventura G., Susta U., Bellatreccia F., Marcelli A., Redhammer G.J., Oberti R. Deprotonation of Fe-dominant amphiboles: Single-crystal HT-FTIR spectroscopic studies of synthetic potassic-ferro-richterite. *American Mineralogist*. 2017;102(1):117-125. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5859>.
20. Kaneva E., Radomskaya T., Shendrik R., Chubarov V., Danilovsky V. Potassic-hastingsite from the Kedrov district (East Siberia, Russia): petrographic description, crystal chemistry, spectroscopy, and thermal behavior. *Minerals*. 2021;11(10):1049. <https://doi.org/10.3390/min11101049>. EDN: VECKYE.
21. Burns R.G. *Mineralogical application of crystal field theory*. Cambridge: Cambridge University Press; 1993, 557 p.
22. Goldman D.S., Rossman G.R., Dollase W.A. Channel constituents in cordierite. *American Mineralogist*. 1977;62(11-12):1144-1157.
23. Taran M.N., Langer K. Electronic absorption spectra of Fe<sup>2+</sup> ions in oxygen-based rock-forming minerals at temperatures between 297 and 600 K. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2001;28(3):199-210. <https://doi.org/10.1007/s002690000148>. EDN: XJMZW.
24. Fontana I., Lauria A., Spinolo G. Optical absorption spectra of Fe<sup>2+</sup> and Fe<sup>3+</sup> in aqueous solutions and hydrated crystals. *Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics*. 2007;244(12):4669-4677. <https://doi.org/10.1002/pssb.200743103>.
25. Abragam A., Bleaney B. *Electron paramagnetic resonance of transition ions*. Oxford: Oxford University Press, 2012. 928 p.
26. Skogby H., Rossman G.R. OH<sup>-</sup> in pyroxene; an experimental study of incorporation mechanisms and stability. *American Mineralogist*. 1989;74:1059-1069.
27. Burt D.M. Metasomatic zoning in Ca-Fe-Si exoskarns. In: Hofmann A.W., Giletti B.J., Yoder Jr. H.S., Yund R.A. (eds). *Geochemical Transport and Kinetics*. Washington: Carnegie Institution of Washington; 1974, vol. 634, p. 287-293.
28. Pertsev N.N. Skarns as magmatic and as postmagmatic formations. *International Geology Review*. 1974;16(5):572-582. <https://doi.org/10.1080/00206817409471840>.
29. Burt D.M. Mineralogy and petrology of skarn deposits. *Rendiconti – societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*. 1977;33(2):859-873.
30. Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. *World skarn deposits*. In: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. (eds). *Economic Geology. 100<sup>th</sup> Anniversary Volume 1905–2005: Chapter: World Skarn Deposits*. Amsterdam: Elsevier Science B.V.; 2005, p. 299-336. <https://doi.org/10.5382/AV100.11>.
31. Einaudi M.T., Burt D.M. Introduction – terminology, classification, and composition of skarn deposits. *Economic Geology*. 1982;77(4):745-754. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.4.745>.
32. Meinert L.D. Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*. 1992;19(4):145-162.
33. Alaminia Z., Mehrabi B., Razavi S.M.H., Tecce F. Mineral chemistry, petrogenesis and evolution of the Ghorveh-Seranjic skarn, Northern Sanandaj Sirjan Zone, Iran. *Mineralogy and Petrology*. 2020;114(1):15-38. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00688-6>. EDN: NUVCKL.
34. Kaneva E.V., Shendrik R.Yu., Radomskaya T.A., Suvorova L.F. Fedorite from Murun alkaline complex (Russia): spectroscopy and crystal chemical features // *Minerals*. 2020;10(8):1-23. <https://doi.org/10.3390/min10080702>. EDN: XSHQEQ.
35. Mitchell R.H., Burns P.C. The structure of fedorite: a re-appraisal. *The Canadian Mineralogist*. 2001;39(3):769-777. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.39.3.769>.
36. Yarovoy P.N., Badenikov V.Ya. *Luminescence and interaction of laser irradiation with dielectrics*. Angarsk: Angarsk State Technical Academy; 2004, 275 p. (In Russ.).
37. Hasegawa T., Nishiwaki Y., Fujishiro F., Kamei S., Ueda T. Quantitative determination of the effective Mn<sup>4+</sup> concentration in a Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>:Mn<sup>4+</sup> phosphor and its effect on the photoluminescence efficiency of deep red emission. *ACS Omega*. 2019;4(22):19856-19862. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02798>.
38. Khaidukov N.M., Brekhovskikh M.N., Kirikova N.Y., Kondratyuk V.A., Makhov V.N. Luminescence of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel ceramics containing some 3<sup>d</sup> ions. *Ceramics International*. 2020;46(13):21351-21359. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.231>. EDN: XPDYGM.
39. Zhang Y., Liu Y., Yang L., Hu S., Wang Z., Nian H., et al. Preparation and luminescence properties of thermally stable Mn<sup>4+</sup> doped spinel red-emitted ceramic phosphors. *Journal of Luminescence*. 2020;220:117016. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.117016>. EDN: SCTSCH.
40. Tanabe Y., Sugano S. On the absorption spectra of complex ions II. *Journal of the Physical Society of Japan*. 1954;9(5):766-779. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.9.766>.



41. Lacalamita M., Mesto E., Kaneva E., Shendrik R., Radomskaya T., Schingaro E. High-temperature behaviour of fedorite,  $\text{Na}_{2.5}(\text{Ca}_{4.5}\text{Na}_{2.5})[\text{Si}_{16}\text{O}_{38}]\text{F}_2 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ , from the Murun Alkaline Complex, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2023;87(4):542-553. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.31>. EDN: DCAVOS.
42. Vladykin N.V., Borokovikov A.A., Dokuchits E.Yu., Thomas V.G. Genesis of charoite rocks in the Murun Massif, Aldan Shield, Russia. *Geochemistry International*. 2018;56(12):1135-1147. <https://doi.org/10.1134/S0016702918120108>. EDN: QWEMQR.
43. Borovikov A.A., Tretiakova I.G., Vladykin N.V., Dokuchits E.Y. Physicochemical conditions of formation of hydrothermal titanium mineralization on the Murunskiy alkaline massif, western Aldan (Russia). *Ore Geology Reviews*. 2018;95:1066-1075. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.007>. EDN: XRRPML.
44. Bonaccorsi E., Ballirano P., Cámara, F. The crystal structure of sacrofanite, the 74 Å phase of the cancrinite-sodalite supergroup. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2012;147(1):318-326. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.06.033>. EDN: PHALXD.
45. Sapozhnikov A.N., Kaneva E.V., Suvorova L.F., Levitsky V.I., Ivanova L.A. Sulfhydrylbystrite,  $\text{Na}_5\text{K}_2\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})$  ( $\text{S}_5$ )(SH), a new mineral with the LOS framework, and re-interpretation of bystrite: cancrinite-group minerals with novel extra-framework anions. *Mineralogical Magazine*. 2017;81(2):383-402. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.106>. EDN: BMRHBP.
46. McCusker L.B., Liebau F., Engelhardt G. Nomenclature of structural and compositional characteristics of ordered microporous and mesoporous materials with inorganic hosts (IUPAC Recommendations 2001). *Microporous and Mesoporous Materials*. 2003;58(1):3-13. [https://doi.org/10.1016/S1387-1811\(02\)00545-0](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(02)00545-0). EDN: BFUXGT.
47. Chukanov N., Sapozhnikov A., Kaneva E., Varlamov D., Vigasina M. Bystrite,  $\text{Na}_7\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{S}_5^{2-}\text{Cl}$ : formula redefinition and relationships with other four-layer cancrinite-group minerals. *Mineralogical Magazine*. 2023;87(3):455-464. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.29>. EDN: FYFBCF.
48. Chukanov N.V., Shendrik R.Yu., Vigasina M.F., Pekov I.V., Sapozhnikov A.N., Shcherbakov I.D., et al. Crystal chemistry, isomorphism, and thermal conversions of extra-framework components in sodalite-group minerals. *Minerals*. 2022;12(7):887. <https://doi.org/10.3390/min12070887>. EDN: YTPUHN.
49. Chukanov N.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., Vigasina M.F., Yapaskurt V.O., Pushcharovsky D.Yu., et al. Sapozhnikovite,  $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{HS})_2$ , a new sodalite-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula. *Mineralogical Magazine*. 2022;86(1):49-59. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.94>. EDN: IQEYSQ.
50. Sapozhnikov A.N., Ivanov V.G., Piskunova L.F., Kashaev A.A., Terentieva L.E., Pobedimskaya E.A. Bystrite  $\text{Ca}(\text{Na,K})_7(\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24})(\text{S}_3)_{1.5} \cdot \text{H}_2\text{O}$ , a new cancrinite-like mineral. *Zapiski Vsesyuznogo Mineralogicheskogo Obshchestva*. 1991;120(3):97-100 (In Russ.).
51. Della Ventura G., Gatta G.D., Redhammer G.J., Bellatreccia F., Loose A., Parodi G.C. Single-crystal polarized FTIR spectroscopy and neutron diffraction refinement of cancrinite. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2009;36(4):193-206. <https://doi.org/10.1007/s00269-008-0269-8>. EDN: MMQRNT.
52. Pekov I.V., Oltych L.V., Chukanov N.V., Zubkova N.V., Pushcharovsky D.Yu., Van K.V., et al. Crystal chemistry of cancrinite-group minerals with an AB-type framework: a review and new data. I. Chemical and structural variations. *The Canadian Mineralogist*. 2011;49(5):1129-1150. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.5.1129>. EDN: PEQOGJ.
53. Chukanov N.V., Pekov I.V., Oltych L.V., Zubkova N.V., Vigasina M.F. Crystal chemistry of cancrinite-group minerals with an AB-type framework: a review and new data. II. IR spectroscopy and its crystal-chemical implications. *The Canadian Mineralogist*. 2011;49(5):1151-1164. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.5.1151>. EDN: PEQOCD.
54. Bonaccorsi E., Merlino S. Modular microporous minerals: cancrinite-davyne group and C–S–H phases. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2005;57(1):241-290. <https://doi.org/10.2138/RMG.2005.57.8>. EDN: MJGPBV.
55. Shendrik R., Kaneva E., Radomskaya T., Sharygin I., Marfin A. Relationships between the structural, vibrational, and optical properties of microporous cancrinite // *Crystals*. 2021;11(3):280. <https://doi.org/10.3390/cryst11030280>. EDN: ZXTDGF.
56. Hossain F.M., Murch G.E., Belova I.V., Turner B.D. Electronic, optical and bonding properties of  $\text{CaCO}_3$  calcite. *Solid State Communications*. 2009;149(29-30):1201-1203. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2009.04.026>.
57. Thøgersen J., Weidner T., Jensen F. The primary photolysis of aqueous carbonate di-anions. *PCCP: Physical Chemistry Chemical Physics*. 2023;25(20):14104-14116. <http://doi.org/10.1039/d3cp00236e>. EDN: KAMAOW.
58. Kaneva E., Radomskaya T., Shendrik R. Fluorcarletonite – a new blue gem material. *The Journal of Gemmology*. 2022;38(4):376-385. <https://doi.org/10.15506/JoG.2022.38.4.376>. EDN: YYZGYF.
59. Kaneva E., Bogdanov A., Radomskaya T., Belozero O., Shendrik R. Crystal-chemical characterisation and spectroscopy of fluorcarletonite and carletonite. *Mineralogical Magazine*. 2023;87(3):356-368. <https://doi.org/10.1180/mgm.2023.15>. EDN: LEKMER.
60. Kaneva E., Shendrik R. Radiation defects and intrinsic luminescence of cancrinite. *Journal of Luminescence*. 2022;243:118628. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2021.118628>.
61. Shendrik R., Chukanov N.V., Bogdanov A., Myasnikova A., Pankrushina E., Zolotarev A.A., et al. Nature of scapolite color: Ab initio calculations, spectroscopy, and structural study. *Minerals*. 2024;14(9):937. <https://doi.org/10.3390/min14090937>. EDN: DTCHYK.
62. Shendrik R., Kaneva E., Pankratova V., Pankrushina E., Radomskaya T., Gavrilenko V., et al. Intrinsic luminescence and radiation defects in scapolite. *Chemical Physics Letters*. 2024;838:141081. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2024.141081>. EDN: QHVVTF.



### Информация об авторе / Information about the author



**Канева Екатерина Владимировна**,  
доктор геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории рентгеновских методов анализа,  
профессор отдела магистратуры и аспирантуры,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [kaneva@igc.irk.ru](mailto:kaneva@igc.irk.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7155-6784>  
**Ekaterina V. Kaneva**,  
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher of the Laboratory of X-ray Analysis Methods,  
Professor at the Graduate and Postgraduate Department,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [kaneva@igc.irk.ru](mailto:kaneva@igc.irk.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-7155-6784>

### Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*  
*The final manuscript has been read and approved by the author.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 12.08.2025; одобрена после рецензирования 27.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 12.08.2025; approved after reviewing 27.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.



Обзорная статья

УДК 550.8.053

EDN: WAUKUO

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320



## Интеграция искусственного интеллекта в обработку геолого-геофизических данных при разведке твердых полезных ископаемых

А.К. Кричинский<sup>а</sup>, А.В. Поспеев<sup>б</sup>✉<sup>а,б</sup>*Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия*<sup>а</sup>*ООО «Эгитинский горно-обогатительный комбинат», Иркутск, Россия*

**Резюме.** В статье представлен систематизированный обзор современных подходов к применению методов искусственного интеллекта для обработки и интерпретации геолого-геофизических данных при поиске и разведке месторождений твердых полезных ископаемых. В работе рассмотрены ключевые направления интеграции искусственного интеллекта в геолого-разведочные процессы: автоматизацию анализа сейсмических, магнитных, гравиметрических и электромагнитных данных; распознавание структурных и аномальных объектов на основе алгоритмов машинного обучения и глубоких нейронных сетей; комплексирование разнородных источников геoinформации с использованием многомодальных архитектур. Освещены подходы к прогнозированию рудоносности, построению трехмерных геологических моделей, а также к оценке вероятностных сценариев размещения рудных тел с учетом геологической неопределенности. Особое внимание уделено проблемам интерпретируемости моделей искусственного интеллекта, влиянию качества и полноты исходных данных на достоверность получаемых результатов, а также институциональным, техническим и кадровым ограничениям, сдерживающим широкое внедрение искусственного интеллекта в геолого-разведочную практику. Обсуждены перспективы развития гибридных интеллектуальных систем, объединяющих экспертные знания и алгоритмические методы, возможность создания цифровых двойников месторождений как основы для цифровой трансформации минерально-сырьевого комплекса. Статья основана на анализе актуальных публикаций российских и зарубежных авторов и может служить методологическим ориентиром для проведения научных исследований, создания прикладных программных решений и повышения эффективности цифровой геологии в условиях возрастающей сложности и стоимости геолого-разведочных работ.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, геологоразведка, геофизика, твердые полезные ископаемые, машинное обучение, нейросети, моделирование месторождений, прогноз рудоносности, интерпретация данных, цифровизация геологии

**Для цитирования:** Кричинский А.К., Поспеев А.В. Интеграция искусственного интеллекта в обработку геолого-геофизических данных при разведке твердых полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 310–320. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320>. EDN: WAUKUO.

Review article

## Integration of artificial intelligence into geological and geophysical data processing in solid minerals exploration

Aleksey K. Krichinsky<sup>а</sup>, Alexander V. Pospeev<sup>б</sup>✉<sup>а,б</sup>*Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*<sup>а</sup>*Egitsky Mining and Processing Plant LLC, Irkutsk, Russia*

**Abstract.** The article provides a systematic review of modern approaches to the use of artificial intelligence methods for processing and interpreting geological and geophysical data in the prospecting and exploration of solid mineral deposits. The key areas of artificial intelligence integration into geological exploration processes are considered: automation of seismic, magnetic, gravimetric and electromagnetic data analysis, recognition of structural and anomalous objects based on machine learning algorithms and deep neural networks, integration of heterogeneous sources of geoinformation using multimodal architectures. The article explores approaches to ore content forecasting, constructing of three-dimensional geological models, and assessing of probabilistic scenarios for ore body location taking into account geological uncertainty. Particular attention is paid to the issues of interpretability of artificial intelligence models, the effect of the quality and completeness of the input data on the reliability of the

© Кричинский А.К., Поспеев А.В., 2025



results obtained, as well as institutional, technical and personnel limitations that hinder the widespread implementation of artificial intelligence in geological exploration practice. The article discusses the development prospects of hybrid intelligent systems that combine expert knowledge and algorithmic methods, as well as the possibility to create digital twins of deposits as a basis for the digital transformation of the mineral resource complex. The article is based on the analysis of relevant publications by Russian and foreign authors and can serve as a methodological guideline for conducting scientific research, creating applied software solutions and increasing the efficiency of digital geology in the context of increasing complexity and cost of geological exploration.

**Keywords:** artificial intelligence, geological exploration, geophysics, solid minerals, machine learning, neural networks, deposit modeling, ore content forecast, data interpretation, digitalization of geology

**For citation:** Krichinsky A.P., Pospeev A.V. Integration of artificial intelligence into geological and geophysical data processing in solid minerals exploration. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):310-320. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320>. EDN: WAUKUO.

## Введение

Появление электронных вычислительных машин произвело революцию практически во всех отраслях человеческой жизнедеятельности. Не стала исключением и геология. В первую очередь здесь были развиты и реализованы задачи обработки массовых данных, что в ряде случаев привело к созданию новых технологий, в частности геофизических исследований. Ярким примером является метод общей глубинной точки в сейсморазведке. Значительные успехи были достигнуты и в инверсии геофизических данных благодаря реализованному использованию прямых задач и методов минимизации функционалов невязки [1].

Что касается геологической интерпретации геологических, геохимических и геофизических данных, то здесь ситуация оказалась сложнее. Представление геологических параметров в виде многомерных матриц дает возможность реализовывать различные математические алгоритмы, формализующие взаимосвязи внутренней структуры матриц. Часть из них, например регрессионный и дисперсионный анализ, стали рядовыми инструментами, позволяющими выявлять взаимную обусловленность различных параметров, что во многих случаях упрощает понимание ситуации [2]. В геохимии и петрологии одним из эффективных инструментов геологического анализа стали методы кластеризации [3]. Своеобразной вершиной математических методов комплексного анализа<sup>1</sup> в свое время стали методы факторного анализа, которым в начале своего развития прочилось прорывное значение.

Тем не менее методы факторного анализа не стали панацеей, позволившей полностью автоматизировать процесс геологической ин-

терпретации данных. Свертка информации, осуществляемая методами дискриминантного и факторного анализа, не формализовывала следующие из них геологические выводы. Таким образом, проблема геологической интерпретации фактически не решалась, а переносилась из пространства наблюдаемой, обработанной и количественно проинтерпретированной информации в пространство факторов, что требовало собственной геологической интерпретации.

Новые шаги в области машинного анализа данных связаны прежде всего с развитием методов распознавания образов или многомерного шкалирования, реализуемых искусственными нейронными сетями. Данная отрасль познания стала называться искусственным интеллектом (ИИ). В последние годы в горно-геологической отрасли наблюдается устойчивый тренд на интеграцию этих методов в процессы обработки и анализа геолого-геофизических данных. Это связано как с объективным усложнением условий ведения разведки, так и с необходимостью оптимизации затрат на этапе поисково-оценочных работ. В условиях ограниченности традиционных ресурсных баз, истощения легко доступных месторождений и усиления конкуренции за минерально-сырьевые ресурсы ключевым фактором эффективности геолого-разведочной деятельности становится качество и скорость обработки информации [4, 5].

Геолого-геофизическая информация представляет собой массив разнотипных данных, поступающих с различных источников: результаты геофизических и геохимических съемок, данных бурения, каротажа, лабораторных исследований и других методов. При этом характер информации зачастую разнороден не

<sup>1</sup> Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт / сост. М.В. Наумов, Е.А. Кухаренко, А.Е. Костин, Д.Н. Ремизов. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2017. 168 с. EDN: UTPUAM.



только по природе происхождения, но и по шкале точности, разрешающей способности, частоте измерений, временным и пространственным привязкам. Стандартизировать и интерпретировать такие объемы информации с применением только классических геостатистических или визуальных методов становится все менее эффективно [6].

Именно в этом контексте все большую актуальность приобретает использование инструментов ИИ, прежде всего методов машинного и глубокого обучения, которые способны выявлять закономерности в сложных, многомерных и слабо структурированных данных. Потенциал ИИ особенно высок в задачах классификации геологических объектов, прогнозирования содержания полезных компонентов, пространственного моделирования месторождений, анализа текстурных и спектральных характеристик пород, а также в оптимизации процессов планирования буровых и геофизических работ.

При этом важным аспектом является то, что применение ИИ в геологоразведке не ограничивается только автоматизацией рутинных задач. Речь идет о качественном переходе к новым способам принятия решений, основанным на вероятностном моделировании, обучении на эмпирических данных и использовании обратных связей. ИИ позволяет не только ускорить интерпретацию данных, но и повысить точность, снизить субъективность и минимизировать вероятность пропуска перспективных аномалий.

Целью настоящей статьи является всесторонний обзор направлений использования ИИ в геолого-разведочной практике, в первую очередь при анализе геофизических и сопряженных геологических данных. В обзоре рассматриваются существующие решения, принципы реализации интеллектуальных моделей, основные подходы к обучению алгоритмов, а также ограничения и вызовы, с которыми сталкиваются специалисты при внедрении ИИ в прикладной геолого-разведочный контекст.

Особое внимание уделяется интеграционному аспекту, то есть способности ИИ объединять разнородные источники информации и формировать на их основе единые интерпретационные модели, адаптированные под конкретные геологические условия. Анализируются примеры из отечественной и зарубежной практики, а также научные исследования, иллюстрирующие текущее состояние и пер-

спективы применения ИИ в геологических и геофизических работах [7].

Настоящая статья носит обзорный характер и ориентирована как на исследователей, занимающихся вопросами цифровизации геологоразведки, так и на практиков, стремящихся к внедрению ИИ в прикладные процессы поиска и оценки месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ).

### **Применение искусственного интеллекта в интерпретации геофизических данных**

Одним из важнейших направлений использования методов искусственного интеллекта в геологоразведке является автоматизация и интеллектуализация процессов обработки и интерпретации геофизических данных. Последние, несмотря на различия в методах получения, обладают рядом общих особенностей: они характеризуются большим объемом, высокой степенью зашумленности, пространственной неоднородностью и зачастую неочевидными взаимосвязями между измеряемыми параметрами и геологическими объектами, которые необходимо интерпретировать [1]. Искусственный интеллект (прежде всего алгоритмы машинного обучения (МО) и нейросетевые модели) демонстрирует высокую эффективность в решении задач анализа таких данных, начиная с фильтрации и выделения аномалий, заканчивая построением вероятностных моделей залежей и классификацией типов рудных тел.

### **Сейсмическая разведка**

Сейсморазведка остается основным методом структурного и стратиграфического анализа подповерхностного пространства в большинстве разведочных проектов. Однако интерпретация сейсмических данных, особенно в сложнопостроенных районах, остается одной из наиболее трудоемких задач. Типичная сейсмическая запись представляет собой многомерный временной ряд, содержащий отражения различных типов волн от геологических границ и осложненный шумами геологического и негеологического характера. Обработка данных 3D-съемок по технологии общей глубинной точки позволяет получать временные либо глубинные кубы данных. Использование ИИ, в частности сверточных нейронных сетей (CNN, от англ.: Convolutional neural network), дает возможность обучать модели на размеченных сейсмических кубах и исполь-



зовать их для автоматического распознавания границ слоев, фациальных зон и даже прогнозирования литологических характеристик [8]. Особенно эффективными оказались архитектуры типа U-Net, изначально разработанные для задач медицинской сегментации, но прекрасно адаптированные к геофизике. Эти модели позволяют с высокой точностью выделять разломы, локальные аномалии и другие структурные особенности, что существенно ускоряет процесс анализа больших объемов данных и снижает вероятность субъективной ошибки интерпретатора.

Дополнительно применяются рекуррентные нейронные сети (RNN, *от англ.*: Recurrent neural network) и трансформер-архитектуры, способные учитывать временные зависимости в сейсмических сериях и использовать их для прогнозирования изменения свойств пород с глубиной. Это особенно ценно при построении 3D-моделей сложных разрезов, где традиционные методы стратиграфического коррелирования оказываются малоприменимыми [9].

### Магнитометрия и гравиметрия

Методы потенциальных полей, такие как магнитометрия и гравиметрия, применяются для выявления и картирования тел, отличающихся по плотности или намагниченности от окружающих пород. Эти методы особенно полезны при поиске глубоко залегающих или скрытых под осадочным чехлом рудных тел. Основная сложность при их интерпретации заключается в том, что наблюдаемое поле представляет собой интегральный отклик множества источников, и его разложение на компоненты требует решения обратной задачи, которая, как правило, некорректна.

ИИ позволяет по-новому подойти к решению данной задачи. С помощью алгоритмов кластеризации (например, k-средних или DBSCAN, *от англ.*: Density-based spatial clustering of applications with noise) можно выявлять группировки аномальных значений, соответствующие потенциальным источникам. Кроме того, применение моделей градиентного бустинга (XGBoost, *от англ.*: Extreme gradient boosting и CatBoost, *от англ.*: Categorical boosting), а также метода случайного леса (*от англ.*: Random forest) дает возможность классифицировать участки по типу предполагаемой минерализации на основе магнитных и гравиметрических признаков [4, 10].

Особый интерес представляет интеграция магнитной информации с данными других ме-

тодов (например, с сейсмикой и электроразведкой) при помощи многомодальных нейросетей. Такие подходы позволяют учесть комплексное геофизическое поведение рудных тел и существенно повысить точность локализации объектов интереса.

### Электроразведка

Методы электроразведки используются для оценки проводимости, естественной и вызванной поляризуемости, а также для анализа диэлектрических свойств пород. В целом геоэлектрические свойства пород крайне дифференцированы и в значительной степени связаны с присутствием в горных породах ионных (прежде всего водных растворов) и электронных (металлов, сульфидов, ряда окислов) проводников. Они чувствительны к изменениям многих косвенных и прямых признаков наличия широкого класса полезных ископаемых: углеводородов, сульфидных руд, угля и мн. др.

Основной проблемой при использовании таких данных является их зависимость от условий съемки и шумов, в том числе связанных с рельефом, поверхностными неоднородностями и промышленными помехами. Применение ИИ позволяет формализовать этапы предварительной обработки, автоматически фильтровать шумы, а также интерпретировать отклики без необходимости ручной привязки к известным геологическим объектам [10].

Разработка моделей, основанных на глубоких нейронных сетях, позволила формировать картографические оценки электрических свойств с разрешением, ранее недоступным при стандартных методах инверсии. Кроме того, активно развиваются подходы, сочетающие ИИ с методами геостатистики и Байесовской инверсии, что позволяет формировать аппроксимации проводимости пород с учетом априорной геологической информации [7].

### Результаты исследования и их обсуждение

*Интеграция разнородных геолого-геофизических данных с использованием искусственного интеллекта.* Современные геолого-разведочные проекты все чаще требуют комплексного анализа данных, полученных не только из различных методов геофизики, но и из смежных областей: геохимии, геологии, петрофизики, бурения, дистанционного зондирования Земли и др. Это объясняется тем,



что ни один из источников информации не может обеспечить полноту и достоверность интерпретации отдельно от других. Интеграция разнородных данных позволяет существенно повысить надежность моделирования геологической среды, а также точность прогноза наличия и параметров залежей полезных ископаемых.

Однако ключевой проблемой в интеграции информации различной природы является их несовместимость по форматам, шкалам измерения, точности, полноте и структуре. Классические методы статистической обработки оказываются малоприменимыми в условиях большого количества пропусков, разнотипных входов и высокой размерности признаков. В этой ситуации применение ИИ становится не только целесообразным, но и необходимым [11].

*Объединение многомодальных данных.* Многомодальными называются данные, характеризующие один и тот же объект, но полученные разными методами наблюдений. В контексте геологоразведки это может быть, например, совокупность магнитной карты, сейсмического куба, данных геохимического анализа проб и буровых журналов. Прямое сопоставление этих источников требует предварительного преобразования информации в единую интерпретируемую форму.

Одним из таких методов является использование автоэнкодеров и мультимодальных нейронных сетей, способных сжимать и реконструировать входные данные различной природы в общем латентном пространстве. Таким образом удастся выявить скрытые закономерности, неочевидные при анализе каждого источника по отдельности [12].

Кроме того, применяется методика объединения представления признаков (*от англ.: Feature fusion*), при которой данные разных типов (например, категориальные литологические, непрерывные геофизические, бинарные геохимические) конкатенируются на уровне признакового вектора и подаются на вход модели градиентного бустинга или нейросети. Эффективность таких подходов подтверждена в работах по моделированию глубинных залежей меди, золота и железа.

*Геоинформационные системы как основа интеграции.* Геоинформационные системы (ГИС) уже давно являются базовой платформой хранения, визуализации и анализа пространственной информации в геологии. Однако традиционные ГИС-средства чаще

всего оперируют готовыми картографическими слоями и не предполагают динамического машинного анализа данных. Интеграция ГИС с ИИ позволяет перейти к новой парадигме работы – автоматизированному построению моделей на основе первичных и промежуточных геоданных.

В последние годы активно развиваются ГИС-платформы с ИИ-модулями, позволяющие запускать обучение моделей прямо внутри среды пространственного анализа. Примером может служить интеграция библиотек TensorFlow или PyTorch с инструментами QGIS или ArcGIS Pro. На этой базе создаются решения для автоматической классификации участков по вероятности минерализации, построения прогнозных карт, тепловых карт глубин, анализа тектонических разломов и др. [13].

Важным преимуществом ГИС-ИИ интеграции является возможность учитывать пространственные корреляции, которые традиционные модели МО игнорируют. Например, использование графовых нейросетей (*от англ.: Graph neural networks*), основанных на геообъектах и их связях, позволяет учитывать не только локальные параметры, но и их топологическое положение в геологической структуре [14].

*Работа с временными рядами и историческими базами данных.* Многие данные в геологоразведке носят временной характер. Это касается, прежде всего, результатов мониторинга, повторных съемок, буровых операций, пробоотбора и др. Работа с временными рядами требует специализированных методов, способных учитывать тренды, сезонность и стохастические флуктуации.

ИИ предлагает ряд решений на базе долгосрочной памяти (LSTM, *от англ.: Long short-term memory*) и трансформер-архитектур, которые успешно применяются в задачах прогноза изменения параметров среды, продуктивности зон, корреляции между изменением свойств флюидов и геофизическими параметрами. При этом возможно использование как непрерывных данных (например, скорость сейсмических волн по времени), так и дискретных последовательностей (периоды бурения, интервалы каротажа, интервалы минерализации) [5].

Еще одним актуальным направлением является обработка исторических геолого-разведочных архивов, содержащих значительное количество неполных, неструктурированных



и рукописных данных. Здесь применяются методы обработки естественного языка (NLP, от англ.: Natural language processing) для оцифровки, систематизации и предварительной разметки текстов, что позволяет включать даже устаревшие, но ценные сведения в современные модели [13].

*Прогнозирование рудоносности и моделирование залежей.* Одна из приоритетных задач в системе геолого-разведочных работ заключается в построении достоверных прогностических моделей, позволяющих не только выявить потенциальные месторождения, но и оценить их промышленную значимость. Речь идет о возможности предсказать наличие, конфигурацию, объем и качество залежей ТПИ еще до проведения дорогостоящих буровых и горнопроходческих работ. Методы искусственного интеллекта предлагают новый уровень инструментов для решения этой задачи – посредством анализа сложных связей между множеством геофизических, геохимических, структурных и тектонических факторов [15].

*Моделирование трехмерной структуры залежей.* Построение трехмерной модели месторождения традиционно основывается на интерполяции данных бурения, геофизики и лабораторных анализов. Классические методы – такие как кригинг, методы обратного расстояния и полиномиальной аппроксимации – имеют ограниченные возможности при высокой изменчивости параметров или недостатке информации. В отличие от них, алгоритмы МО и особенно глубокие нейросети обладают способностью обобщать закономерности даже при высокой степени гетерогенности среды.

Так, модели трехмерных сверточных нейросетей (3D-CNN), обученные на объемных геоданных, могут строить цифровые геологические модели, учитывающие неоднородности в литологии, минеральном составе и структурной организации залежей. Их преимуществом является возможность прямой работы с воксельными представлениями пространства без необходимости предварительной интерполяции, что уменьшает потери информации.

Дополнительно используются глубокие генеративные модели, в том числе вариационные автоэнкодеры (VAE, от англ.: Variational autoencoder) и генеративно-состязательные сети (GAN, от англ.: Generative adversarial networks), позволяющие создавать вероятностные представления геологических разрезов с учетом неопределенности. Это важно

при работе в условиях дефицита данных или высокой геологической сложности, где предпочтительнее многовариантный прогноз, нежели единственный детерминированный результат.

*Оценка содержания полезных компонентов.* Одним из ключевых параметров рудного тела является содержание полезных компонентов: металлов, минералов, угля и других ископаемых. Прогноз этого содержания на основе не прямых данных (например, геофизических аномалий, геохимических индикаторов, структуры пород) остается важнейшей задачей, от которой напрямую зависит экономическая эффективность дальнейших работ.

Методы ИИ позволяют создавать регрессионные модели, связывающие характеристики среды с концентрацией элементов. Так, градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM, от англ.: Light gradient-boosting machine) и глубокие полносвязные нейросети (например, DNN, от англ.: Deep neural network) демонстрируют высокую точность при прогнозировании содержания меди, золота, железа, редкоземельных элементов и других компонентов на основе комплекса признаков, включая данные каротажа, минералогии, геофизики и пробоотбора.

Важно отметить, что такие модели могут учитывать нелинейные зависимости и взаимодействия между переменными, что невозможно при использовании традиционных линейных моделей. Кроме того, они устойчивы к наличию пропусков, шумов и мультиколлинеарности, типичных для геолого-разведочных данных.

Одним из подходов к повышению надежности прогнозов является построение ансамблей моделей – например, объединение нескольких схем регрессионных деревьев, нейросетей и статистических алгоритмов. Это позволяет учитывать разнообразные аспекты модели и снижать общее отклонение прогноза от реального содержания [16].

*Пространственное прогнозирование и выделение перспективных зон.* ИИ находит широкое применение в задачах пространственного прогноза, то есть построения карт вероятности наличия ТПИ на основе комплексной интерпретации признаков. При этом используются алгоритмы обучения с учителем, которые настраиваются по известным месторождениям и обучаются распознавать их «геологический почерк» – характерные со-



четания признаков, повторяющихся в различных локациях.

Ключевым этапом является формирование признаков пространства, включающего как первичные измерения (геофизические параметры, геохимию, тектонику), так и производные показатели (индекс контрастности, тектоно-литологическую обстановку, плотность разломов и др.). После обучения прогностическая модель способна оценивать степень перспективности любых участков в пределах заданного района [17].

Особое внимание уделяется использованию пространственно-зависимых моделей, учитывающих автокорреляцию между участками и влияние соседних зон. Это достигается с помощью методов геостатистики, а также графовых нейросетей, которые интерпретируют пространство как сеть взаимосвязанных узлов и формируют прогнозы с учетом топологической информации.

*Учет экономических факторов при построении прогностических моделей.* Современные подходы к прогнозированию в геологоразведке выходят за рамки чисто геологических критериев. Все чаще в прогностические модели включаются параметры, связанные с логистикой, инфраструктурой, стоимостью бурения, доступностью ресурсов, экологическими ограничениями и правовым режимом недропользования. ИИ способен обрабатывать такие многослойные и взаимосвязанные данные в едином цикле, создавая так называемые интеллектуальные геоэкономические модели.

Это особенно важно при выборе участков для разведочного бурения или при планировании маршрутов работ, где важна не только вероятность нахождения полезных ископаемых, но и рентабельность их извлечения.

*Проблемы и перспективы применения искусственного интеллекта в геологоразведке.* Несмотря на очевидные успехи применения ИИ в геологоразведке, процесс его внедрения в практику сопровождается рядом системных трудностей. Эти проблемы затрагивают как технологические, так и методологические, институциональные и когнитивные аспекты. Устранение этих барьеров является необходимым условием для широкомасштабной цифровизации геолого-разведочного комплекса [18].

*Ограниченность и неоднородность исходных данных.* Качество и полнота обучаю-

щей выборки являются ключевыми факторами при построении эффективных моделей ИИ. В геологической практике данные зачастую разрознены, получены по различным методикам, не стандартизированы и включают значительное число пропусков. Более того, существенная часть информации хранится в неструктурированном виде: в отчетах, картах, журналах, рукописных документах. Это затрудняет прямое использование таких данных в обучении прогностических моделей.

Отдельную сложность представляет малая репрезентативность данных. Так, известные месторождения часто сконцентрированы в небольшом числе регионов, в то время как другие территории остаются практически неизученными. Это приводит к искажению статистических закономерностей и снижению обобщающей способности прогностических моделей.

Для преодоления этих проблем необходимы усилия по цифровизации архивов, стандартизации форматов данных, внедрению автоматических систем предобработки информации и формированию открытых репрезентативных обучающих выборок. В перспективе это позволит существенно увеличить объем доступной информации для обучения и проверки прогностических моделей.

*Отсутствие интерпретируемости (Explainability).* Одним из важнейших ограничений использования ИИ в геологических задачах является проблема интерпретируемости результатов. Алгоритмы, особенно глубокие нейросети, часто рассматриваются как «черный ящик» – они выдают предсказание, но не объясняют, на основе каких факторов было принято то или иное решение. Это вызывает недоверие у специалистов и затрудняет внедрение моделей в практике принятия решений.

В ответ на этот вызов развивается направление объяснимого искусственного интеллекта (XAI, *от англ.*: Explainable artificial intelligence). Его задача – создание моделей или надстройки над моделями, способных раскрыть, какие признаки оказали наибольшее влияние на результат. На практике применяются такие подходы, как LIME (*от англ.*: Local interpretable model-agnostic explanations), SHAP (*от англ.*: Shapley additive explanations), LRP (*от англ.*: Layer-wise relevance propagation) и др.

В георазведке XAI имеет особую ценность, так как специалисты должны не просто видеть



результат, но и понимать его геологическое обоснование. Например, при прогнозе рудоносности важно указать, какие геофизические, геохимические и структурные факторы способствовали получению высокого балла и как он соотносится с аналогами. В перспективе использование ХАИ будет обязательным условием для внедрения ИИ в нормативно-утвержденные процедуры оценки запасов [19].

*Институциональные и кадровые барьеры.* Внедрение ИИ в геологоразведку требует пересмотра существующих производственных процессов, а также наличия специалистов, обладающих как геологическими, так и цифровыми компетенциями. В настоящее время наблюдается дефицит кадров, способных одновременно понимать специфику геофизических данных и владеть методами машинного обучения.

Институциональные барьеры проявляются также в отсутствии стандартов на формат представления данных, процедуры валидации моделей и юридически признанные критерии доверия к результатам, полученным с помощью ИИ. Это особенно важно при государственной экспертизе материалов геологоразведки и постановке запасов на государственный баланс.

Решение этих проблем требует внедрения образовательных программ двойной подготовки (геоинформатика, геоаналитика, цифровая геология), а также разработки профессиональных стандартов, норм и регламентов, обеспечивающих правовое и методическое сопровождение использования ИИ в геологоразведке [19].

*Перспективы развития интеллектуальных геологических систем.* Несмотря на перечисленные ограничения, развитие интеллектуальных технологий в геологоразведке имеет выраженную позитивную динамику. Наиболее перспективным направлением в ближайшие годы считается формирование гибридных систем, сочетающих алгоритмы ИИ с экспертными знаниями геологов. Такие системы обеспечивают более точную, устойчивую и интерпретируемую обработку данных, поскольку учитывают как эмпирические зависимости, так и формализованные знания, накопленные в отрасли.

Развиваются подходы к созданию цифровых двойников месторождений, объединяющих в себе геологические модели, данные мониторинга, информацию о добыче и результа-

ты моделирования. Эти цифровые двойники управляются интеллектуальными модулями и способны адаптироваться по мере поступления новых данных.

Кроме того, особый интерес представляют облачные платформы для геологоразведки, включающие инструменты для хранения, обработки, визуализации и совместного использования данных и моделей. На таких платформах ИИ становится доступным даже для небольших геологических организаций, что способствует демократизации технологий и ускоряет их распространение в отрасли [20].

### Заключение

В условиях растущей сложности геолого-разведочных задач, увеличения объемов данных и потребности в ускорении процессов интерпретации применение методов ИИ становится неотъемлемым элементом современного подхода к разведке месторождений ТПИ. Обзор существующих решений и направлений исследований показывает, что ИИ способен не только выполнять функции автоматизации рутинных задач, но и служить инструментом глубокого анализа, интеграции разнородной информации и построения комплексных прогностических моделей.

Наиболее эффективно ИИ применяется в обработке и интерпретации геофизических данных, в том числе сейсмических, магнитометрических, гравиметрических и электромагнитных. Нейросетевые модели и методы МО обеспечивают высокую точность в задачах классификации, сегментации и моделирования, превосходя традиционные алгоритмы в условиях высокой геологической сложности.

Интеграция данных различных источников – геофизики, геохимии, буровых данных, ГИС и архивных текстов – возможна благодаря мультимодальным архитектурам, обучаемым на гетерогенных выборках. Это открывает путь к построению единого цифрового пространства данных, обеспечивающего полноценную интеллектуальную поддержку принятия решений.

Особое значение имеет применение ИИ в прогнозировании рудоносности и моделировании трехмерных структур залежей. Такие технологии позволяют не только локализовать перспективные зоны, но и рассчитать экономическую эффективность их освоения, учитывая технические, логистические и инфраструктурные ограничения.



Тем не менее широкомасштабное внедрение ИИ в геологоразведку сдерживается рядом факторов: ограниченностью и неструктурированностью данных, проблемой интерпретируемости моделей, дефицитом квалифицированных кадров, а также отсутствием нормативного сопровождения и единых стандартов. Преодоление этих барьеров требует комплексного подхода, включающего развитие методологии объяснимого ХАИ, формирование открытых баз обучающих данных, модернизацию образовательных программ и разработку гибридных человеко-машинных систем.

В перспективе ключевую роль будут играть облачные платформы и цифровые двойники

месторождений, способные интегрировать различные модули ИИ и обеспечивать сквозную аналитику на всех этапах геолого-разведочного цикла – от сбора полевых данных до оценки запасов и технико-экономического моделирования освоения.

Таким образом, искусственный интеллект в сфере геологоразведки из инструмента экспериментальной аналитики постепенно трансформируется в системообразующий элемент цифровой трансформации отрасли. Его применение позволяет выйти на качественно новый уровень эффективности, точности и устойчивости решений в области поиска и оценки ТПИ.

#### Список источников

1. Qadrouh A.N., Carcione J.M., Alajmi M., Alyousif M.M. A tutorial on machine learning with geophysical applications // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2019. Vol. 60. Iss. 3. P. 375–402. <https://doi.org/10.4430/bgta0274>.
2. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 8. P. 816. <https://doi.org/10.3390/min11080816>.
3. Йёреског К.Г., Клован Д.И., Реймент Р.А. Геологический факторный анализ / пер. с англ. Л.: Недра, 1980. 223 с.
4. Rimola A. Mineral exploration technologies: advancements and applications // *Journal of Powder Metallurgy & Mining*. 2024. Vol. 13. Iss. 6. P. 449. Режим доступа: <https://www.omicsonline.org/open-access/mineral-exploration-technologies-advancements-and-applications-134337.html> (дата обращения: 17.05.2025).
5. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization // *The Extractive Industries and Society*. 2024. Vol. 17. P. 101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>. EDN: EKFNHY.
6. Степанов И.Ю. Использование методов машинного обучения в геoinформационных моделях при решении задач геофизической разведки // *Вестник СГУГиТ*. 2024. Т. 29. № 2. С. 108–117. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117>. EDN: ВHXCBY.
7. Sun K., Chen Y., Geng G., Lu Z., Zhang W., Song Z., et al. A review of mineral prospectivity mapping using deep learning // *Minerals*. 2024. Vol. 14. Iss. 10. P. 1021. <https://doi.org/10.3390/min14101021>.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep learning*. Cambridge: The MIT Press, 2016. 800 p.
9. Шиверский Г.В., Кривощёков С.Н. Перспективы применения методов искусственного интеллекта в нефтегазовой геологии // *Master's Journal*. 2022. № 2. С. 57–67. EDN: MXLKEW.
10. Царегородцева Т.К., Горкин Г.М. Применение искусственного интеллекта в разведке и добыче углеводородов // *Недропользование XXI век*. 2022. № 2. С. 12–15. EDN: FRHXVC.
11. Останин В.А. Перспективы использования автоматического машинного обучения в задачах комплексной интерпретации геофизических данных на примере районирования территории Томской области по вероятной нефтегазоносности // *Перспективы развития науки в современном мире: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 7 апреля 2023 г.)*. Уфа: Изд-во ООО «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. Т. 2. С. 137–156. EDN: MGKIUP.
12. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // *Nature*. 2015. Iss. 521. P. 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.
13. Шагарова Л.В. Применение искусственного интеллекта и систем больших геоданных для мониторинговых геологических задач // *Новые идеи в науках о Земле. Том 1. Геофизика, геoinформатика, математическое моделирование и искусственный интеллект в недропользовании: материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Москва, 3–4 апреля 2025 г.)*. М.: Изд-во МГРИ РАЕН, 2025. Т. 1. С. 37–40.
14. Jung H.-S., Lee S. Special issue on machine learning techniques applied to geoscience information system and remote sensing // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Iss. 12. P. 2446. <https://doi.org/10.3390/app9122446>.
15. Панина О.В., Беляев А.М., Завалько Н.А., Еремин С.Г., Сагина О.А. Применение методов глубокого машинного обучения для структурного анализа рудных тел и прогнозирования оптимальных зон добычи // *Горная промышленность*. 2025. № 1. С. 177–183. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>. EDN: YAJMMM.
16. Alzubaidi L.S., Zhang J., Humaidi A.J., Al-Dujaili A., Duan Y. Al-Shamma O., et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions // *Journal of Big Data*. 2021. Vol. 8. Iss. 53. P. 1–74. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.
17. Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Минаев В.А., Петров В.А. Подход к созданию пространственных прогнозно-поисковых моделей месторождений на основе сверточных нейронных сетей (на примере территории



Юго-Восточного Забайкалья) // Наука и технологические разработки. 2024. Т. 103. № 2. С. 75–90. <https://doi.org/10.21455/std2024.2-5>.

18. Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y., Yao Y., et al. Review of the application of Big Data and artificial intelligence in geology // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1684. Iss. 1. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1684/1/012007>.

19. McGaughey J. Artificial intelligence and Big Data analytics in mining geomechanics // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol 120. Iss. 1. P. 15–21. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/847/2020>.

20. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности // *Горная промышленность*. 2022. № 3. С. 89–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>. EDN: OEXFGE.

### References

1. Qadrouh A.N., Carcione J.M., Alajmi M., Alyousif M.M. A tutorial on machine learning with geophysical applications. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 2019;60(3):375-402. <https://doi.org/10.4430/bgta0274>.

2. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry. *Minerals*. 2021;11(8):816. <https://doi.org/10.3390/min11080816>.

3. Jöreskog K.G., Klován D.I., Reymont R.A. Geological factor analysis; 1976, 178 p. (Russ. ed.: *Geologicheskii faktornyj analiz*. Leningrad: Nedra; 1980, 223 p.).

4. Rimola A. Mineral exploration technologies: advancements and applications. *Journal of Powder Metallurgy & Mining*. 2024;13(6):449. Available from: <https://www.omicsonline.org/open-access/mineral-exploration-technologies-advancements-and-applications-134337.html> [Accessed 17<sup>th</sup> May 2025].

5. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17:101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>. EDN: EKFAQY.

6. Stepanov I.Yu. The use of machine learning methods in geoinformation models in solving problems of geophysical exploration. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(2):108-117. (In Russ.). <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117>. EDN: BHXCBY.

7. Sun K., Chen Y., Geng G., Lu Z., Zhang W., Song Z., et al. A review of mineral prospectivity mapping using deep learning. *Minerals*. 2024;14(10):1021. <https://doi.org/10.3390/min14101021>.

8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep learning*. Cambridge: The MIT Press; 2016, 800 p.

9. Shiverskii G.V., Krivoschekov S.N. Prospects for the application of artificial intelligence methods in the geology of oil and gas. *Master's journal*. 2022;2:57-67. (In Russ.). EDN: MXLKEW.

10. Tsaregorodtseva T.K., Gorkin G. M. Application of artificial intelligence in hydrocarbon exploration and production. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;2:12-15. (In Russ.). EDN: FRHXVC.

11. Ostanin V.A. Application prospects of automatic machine learning in the problems of integrated interpretation of geophysical data for the case of Tomsk region zoning by probable oil and gas content. In: *Perspektivy razvitiya nauki v sovremennom mire: materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Science development prospects in the modern world: Proceedings of the 12<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 7 April 2023, Ufa. Ufa: Scientific and Publishing Center Herald of Science LLC; 2023, vol. 2, p. 137-156. (In Russ.). EDN: MGKIUP.

12. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. 2015;521:436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>.

13. Shagarova L.V. Application of artificial intelligence and Big Geodata systems for geological monitoring tasks. In: *Novye idei v nauках o Zemle. Tom 1. Geofizika, geoinformatika, matematicheskoe modelirovanie i iskusstvennyi intellekt v nedropol'zovanii: materialy XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = New Ideas in Earth Sciences. Vol. 1. Geophysics, Geoinformation Sciences, Mathematical Modeling, and Artificial Intelligence in Subsoil Use: Proceedings of the 17<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 3–4 April 2025, Moscow. Moscow: Russian State University for Geological Prospecting of the Russian Academy of Natural Sciences; 2025, vol. 1, p. 37-40. (In Russ.).

14. Jung H.-S., Lee S. Special issue on machine learning techniques applied to geoscience information system and remote sensing. *Applied Sciences*. 2019;9(12):2446. <https://doi.org/10.3390/app9122446>.

15. Panina O.V., Belyaev A.M., Zaval'ko N.A., Eremin S.G., Sagina O.A. Application of deep machine learning methods for structural analysis of ore bodies and prediction of optimal mining zones. *Mining industry journal*. 2025;1:177-183. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-177-183>. EDN: YAJMMM.

16. Alzubaidi L.S., Zhang J., Humaidi A.J., Al-Dujaili A., Duan Y. Al-Shamma O., et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*. 2021;8(53):1-74. <https://doi.org/10.1186/s40537-021-00444-8>.

17. Grishkov G.A., Nafigin I.O., Ustinov S.A., Minaev V.A., Petrov V.A. An approach to the creation of spatial predictive prospecting models of deposits based on convolutional neural networks (using the example of the territory of Southeastern Transbaikalia). *Science and Technological Developments*. 2024;103(2):75-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.21455/std2024.2-5>.

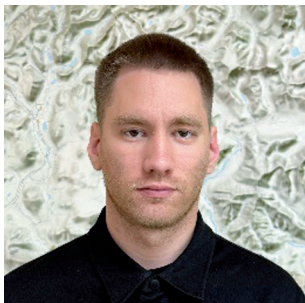
18. Chen L., Wang L., Miao J., Gao H., Zhang Y., Yao Y., et al. Review of the application of Big Data and artificial intelligence in geology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1684(1):012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1684/1/012007>.

19. McGaughey J. Artificial intelligence and Big Data analytics in mining geomechanics. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2020;120(1):15-21. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/847/2020>.



20. Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Kadochnikov M.V. Application of artificial intelligence and the future of Big Data analytics in the mining industry. *Mining industry journal*. 2022;3:89-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>. EDN: OEXFGE.

### Информация об авторах / Information about the authors



**Кричинский Алексей Константинович,**

аспирант,  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
геолог,  
ООО «Эгитинский горно-обогатительный комбинат»,  
г. Иркутск, Россия,  
leha\_29@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0007-1102-2562>

**Aleksey K. Krichinsky,**

Postgraduate Student,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
Geologist,  
Egitinsky Mining and Processing Plant LLC,  
Irkutsk, Russia,  
leha\_29@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0007-1102-2562>



**Поспеев Александр Валентинович,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории Арктики,  
Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ [avp@crust.irk.ru](mailto:avp@crust.irk.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5938-1942>

**Alexander V. Pospееv,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,  
Leading Researcher at the Arctic Laboratory,  
Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
✉ [avp@crust.irk.ru](mailto:avp@crust.irk.ru)  
<https://orcid.org/0000-0001-5938-1942>

### Вклад авторов / Contribution of the authors

А.К. Кричинский – проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

А.В. Поспеев – научное руководство, разработка концепции, редактирование рукописи.

Aleksey K. Krichinsky – investigation, formal analysis, writing – original draft.

Alexander V. Pospееv – supervision, conceptualization, writing – editing.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; одобрена после рецензирования 07.08.2025; принята к публикации 18.08.2025.

The article was submitted 28.07.2025; approved after reviewing 07.08.2025; accepted for publication 18.08.2025.



Краткое сообщение

УДК 550.834.3

EDN: SBBOVB

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334



## Исследование структуры и свойств грунтов по данным инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования на территории г. Петропавловска-Камчатского

А.В. Марычева<sup>a✉</sup>, М.Д. Сидоров<sup>b</sup>, Т.В. Пантелеймонова<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения  
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

**Резюме.** Важную роль в инженерной геологии играют геофизические методы, позволяющие эффективно исследовать структуру и свойства грунтов для определения сейсмического микрорайонирования при проектировании зданий и сооружений в промышленном и гражданском строительстве. Для оценки эффективности применения методов разведочной геофизики были выбраны территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук и кинотеатра «Горизонт» города Петропавловска-Камчатского (Россия), где были проведены исследования тонкой структуры и скоростных параметров грунтов методом сейсмического 2D-профилирования. Цель работы заключалась в получении и отслеживании изменения физико-механических параметров грунтов в естественном залегании пород как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Анализ сейсмичности площадок выполнялся методами многоволновой сейсмической разведки, базирующейся на регистрации продольных, поперечных и обменных волн с различной поляризацией. Для проведения сейсморазведочных работ была использована цифровая 24-канальная инженерная сейсморазведочная станция «Лакколит 24М». Для возбуждения упругих колебаний был применен импульсный невзрывной источник – тампер. Типы регистрируемых волн и природа их колебаний были определены как традиционными методами, так и с помощью теоретических расчетов волновых полей с использованием методики конструирования сейсмического разреза по наблюдаемому волновому полю. Результатом исследований стало построение сейсмических разрезов, анализ сейсмограмм которых в дальнейшем был подтвержден при бурении скважин до глубин 20–25 м. В ходе проведенных работ было установлено, что невозможно выбрать место для бурения одной уникальной скважины, которая позволила бы охарактеризовать площадку в целом. В связи с этим наиболее эффективным является проведение сейсмического профилирования, которое дает возможность измерения параметров для всей площадки как по латерали, так и на глубину.

**Ключевые слова:** сейсмическое микрорайонирование, годограф, инженерные изыскания, сейсмограммы, физико-механические свойства грунтов, Камчатка

**Для цитирования:** Марычева А.В., Сидоров М.Д., Пантелеймонова Т.В. Исследование структуры и свойств грунтов по данным инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования на территории г. Петропавловска-Камчатского // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 321–334. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334>. EDN: SBBOVB.

Brief report

## Investigation of soil structure and properties based on engineering seismic survey data for seismic microzoning in Petropavlovsk-Kamchatsky

Anastasia V. Marycheva<sup>a✉</sup>, Mikhail D. Sidorov<sup>b</sup>, Tatiana V. Panteleimonova<sup>c</sup>

<sup>a-c</sup>Scientific Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

**Abstract.** An important role in engineering geology belongs to geophysical methods that enable effective study of soil structure and properties to determine seismic microzoning when designing buildings and structures in industrial and civil engineering. To assess the effectiveness of exploration geophysics methods, the territories of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Horizon cinema in Petropavlovsk-Kamchatsky (Russia) were selected. The fine structure and velocity parameters of soils were conducted on those sites

© Марычева А.В., Сидоров М.Д., Пантелеймонова Т.В., 2025



using seismic 2D-profiling. The purpose of the work was to obtain and monitor changes in the physical and mechanical parameters of soils in their natural rock bedding, both horizontally and vertically. Seismicity analysis of the sites was performed using multiwave seismic exploration methods based on the recording of longitudinal, transversal, and converted waves with different polarizations. A Laccolith 24M digital 24-channel seismic survey station was used for seismic exploration. A pulsed non-explosive source (tamper) was used to excite elastic vibrations. The types of recorded waves and the nature of their oscillations were determined using both traditional methods and theoretical calculations of wave fields using a technique for constructing a seismic section based on the observed wave field. The study resulted in the construction of seismic sections, the analysis of which was subsequently confirmed by drilling wells to depths of 20–25 meters. Conducted studies showed impossibility to select a single unique site for drilling a well that would allow to provide a detailed description of the site as a whole. Therefore, seismic profiling was recognized as the most effective method enabling parameter measurement for the entire site, both laterally and at depth.

**Keywords:** seismic microzoning, time curve, engineering surveys, seismograms, soil physical and mechanical properties, Kamchatka

**For citation:** Marycheva A.V., Sidorov M.D., Panteleimonova T.V. Investigation of soil structure and properties based on engineering seismic survey data for seismic microzoning in Petropavlovsk-Kamchatsky. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):321-334. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-321-334>. EDN: SBBOBB.

### Введение

Камчатский полуостров, расположенный на стыке тектонических плит, характеризуется высокой сейсмоактивностью, что делает его уникальным объектом для изучения и применения методов сейсмического районирования. Выполняемые в составе инженерных изысканий, они обеспечивают надежность и безопасность объектов строительства в сейсмоактивных регионах [1]. Правильное применение принципов сейсмического районирования становится особенно актуальным в условиях интенсивной застройки в свете растущего интереса к развитию туристической инфраструктуры [2].

При сейсмическом микрорайонировании выполняется оценка реакции на воздействия грунтов в зависимости от их тонкой структуры и физико-механических параметров, характерных для заданной строительной площадки. Анализ научных работ по оценке сейсмостойкости, состава пород, их мощности и обводненности на территории г. Петропавловска-Камчатского показывает, как значительно меняются эти факторы по простиранию из-за резко расчлененного рельефа и насколько это, в свою очередь, влияет на изменения физико-механических параметров геосреды.

Оценка эффективности применения методов разведочной геофизики для определения физико-механических характеристик грунтов при сейсмическом микрорайонировании в промышленном и гражданском строительстве рассмотрена на примере двух площадок на территории г. Петропавловска-Камчатского: в районе Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН) и кинотеатра «Горизонт».

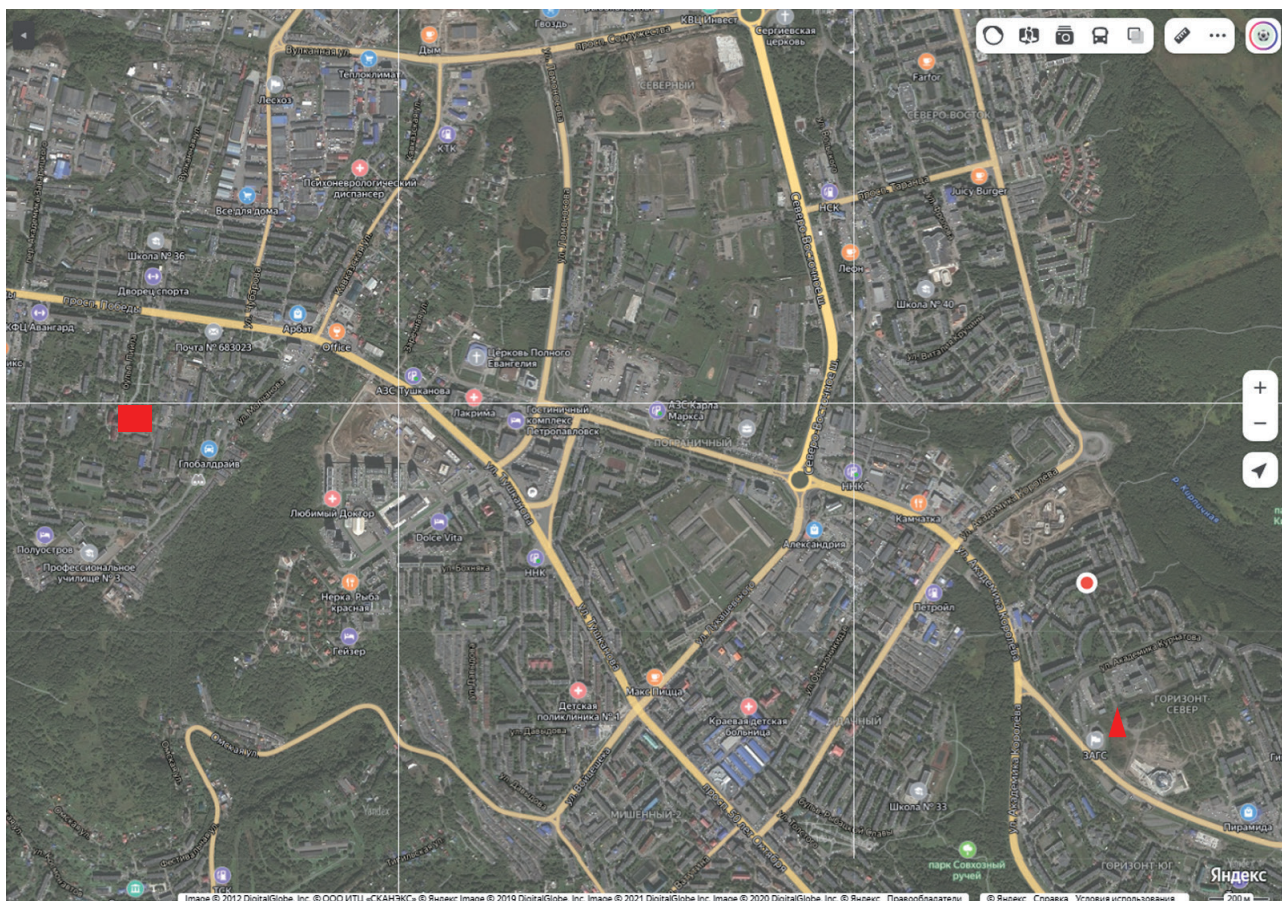
Исследование свойств грунтов является важным аспектом в принятии проектных решений при строительстве зданий и сооружений [3]. Важно отметить, что недостаток информации о грунтовых условиях, в том числе их сейсмических свойствах, может привести к катастрофическим последствиям, включая разрушение зданий и угрозу жизни людей [4].

### Материалы и методы исследования

*Методика полевых исследований и аппаратура.* Изучение характеристик грунтов с целью анализа сейсмичности площадки выполнялось методами многоволновой сейсмической разведки, базирующейся на регистрации продольных, поперечных и обменных волн с различной поляризацией [5]. При решении инженерных задач сейсморазведку обычно применяют в тесном комплексе с другими геофизическими методами: электроразведкой и бурением. Сейсмическая разведка является одним из важнейших видов геофизической разведки и представляет собой совокупность методов исследований геологического строения земной коры, основанных на изучении распространения в ней искусственно возбужденных упругих волн.

На исследуемых участках территории ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» сейсморазведка выполнялась методом преломленных волн в комплексе с бурением (рис. 1).

Способы наблюдений и интерпретации по методу преломленных волн позволяют определять глубины до преломляющих границ, строить разрезы и карты изоглубин; определять граничные скорости распространения волн вдоль преломляющих границ по годогра-



**Рис. 1. Обзорная карта расположения участков исследования:**

1 – на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; 2 – на территории кинотеатра «Горизонт»

**Fig. 1. Overview map of study sites location:**

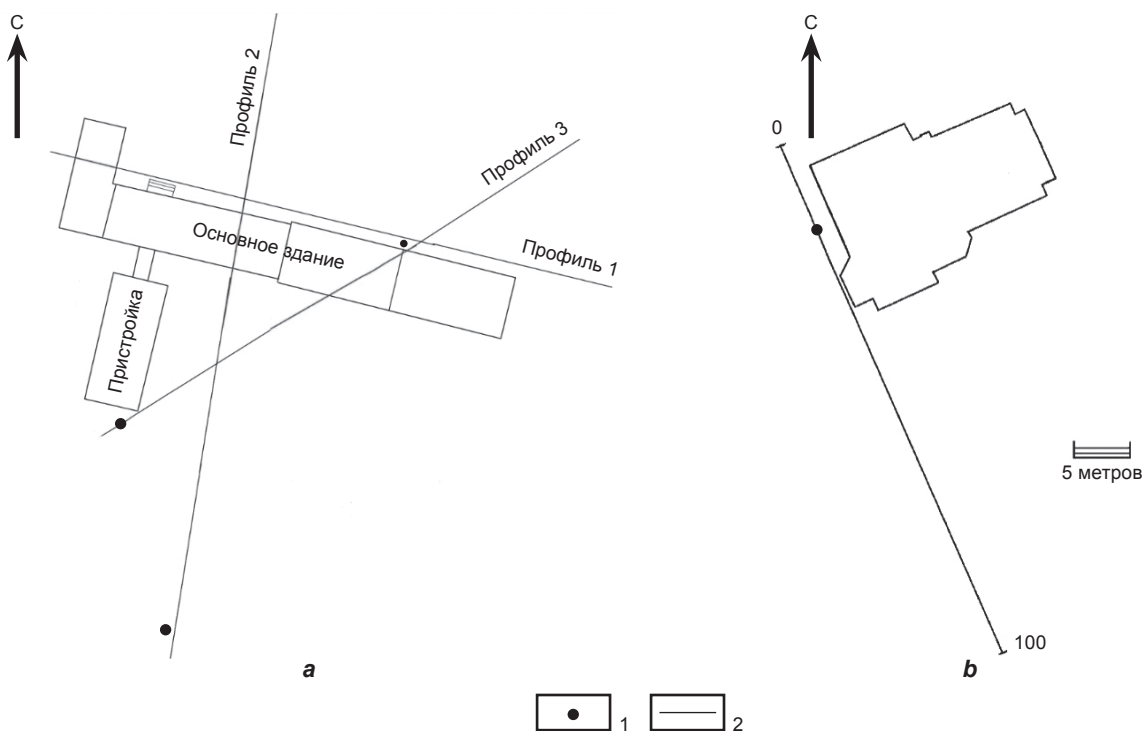
1 – on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2 – on the territory of the Horizon cinema

фам головных и слабо рефрагированных волн с введением поправки за рефракцию; оценивать зависимость региональной компоненты поля скоростей от глубины по годографам рефрагированных волн; строить разрезы в изолиниях скорости; вычислять коэффициенты поглощения в преломляющем слое по графикам амплитуд головных волн; находить модули упругости при совместной регистрации продольной и поперечной волн; трассировать в плане тектонические нарушения [6].

Преимущество метода заключается в возможности определять скорости распространения сейсмических волн вдоль глубинных сейсмических границ, по которым можно судить о физических свойствах преломляющих горизонтов, их литологическом составе, о принадлежности сейсмических границ к геологическому разрезу [7]. Недостаток метода – его меньшая точность, детальность

и разрешающая способность по сравнению с методом отраженных волн, особенно при изучении криволинейных границ. Метод преломленных волн является основным при проектировании инженерных сооружений и разведке грунтовых вод. Этот метод дает наиболее надежную информацию о глубине границ грунтов геологического разреза, а также является экономичным, транспортабельным и экологичным.

Для проведения сейсмических работ на участках ИВиС ДВО РАН были разбиты три взаимно пересекающиеся профиля и один профиль на участке кинотеатра «Горизонт» общей протяженностью 120 м (рис. 2). Расстояние между приемниками на сейсмических профилях участков ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» составляло 2,5 м, глубина исследований – 65 и 35 м соответственно.



**Рис. 2. План расположения сейсмических профилей:**

*a* – на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук; *b* – на территории кинотеатра «Горизонт»

1 – скважины; 2 – сейсмические профили

**Fig. 2. Seismic profile location plan:**

*a* – on the grounds of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; *b* – on the territory of the Horizon Cinema

1 – wells; 2 – seismic profiles

Для проведения сейсморазведочных работ была использована цифровая 24-канальная инженерная сейсморазведочная станция «Лакколит 24М». Для возбуждения упругих колебаний использовался импульсный невзрывной источник – ударный инструмент для малоглубинной сейсмической разведки (тампер) высотой 80 см и весом 50 кг. Преобразование механических колебаний в электрическое напряжение осуществлялось с помощью вертикальных сейсмоприемников СВ-10, представляющих собой инертную массу, подвешенную на пружине, жестко связанной с корпусом приемника [8, 9].

В комплект блока «Лакколит 24М» входит источник питания 12 В, зарядное устройство, кабель питания, кабель связи, программное обеспечение управлением сейсмостанцией. Компьютер обеспечивает управление блоками через локальную сеть Интернет, последующую обработку информации и отображение результатов. Скорость обмена по локальной сети 10 Мб. Параметры, установленные в программе, отмечаются в журнале оператора. По окончании полевых работ полученные сей-

смограммы обрабатываются в дальнейшем в камеральных условиях.

**Методика обработки и интерпретация материалов.** Типы регистрируемых волн и природа их колебаний были определены как традиционными методами, так и с помощью теоретических расчетов волновых полей с использованием методики конструирования сейсмического разреза по наблюдаемому волновому полю [10]. Основа этого поля представляет собой направленное трассирование сейсмических лучей в неоднородно-слоистых средах в пакете программ SEIS83 с добавлениями (*от англ.*: Seismic Experiment for Interior Structure – сейсмический эксперимент внутренней структуры), адаптированном для целей инженерной сейсморазведки [11].

Эта методика позволяет получать детальные геометрические и упругие характеристики сейсмических разрезов, а результаты построений с ее использованием к настоящему времени достоверно подтверждены бурением практически во всех районах, где проводились сейсмические работы [12].



Расчеты прекращались при расхождении времени прихода экспериментальных и теоретических вступлений до одной четверти периода колебаний. Далее рассчитывались теоретические сейсмограммы.

Расчеты выполнялись отдельно для каждого типа элементарных волн, а затем индивидуальные сейсмограммы суммировались в одну синтетическую для каждого пункта возбуждения. Пакет программ дает возможность суммировать до 99 независимо рассчитанных элементарных волн. Такая методика позволяет наиболее точно определить природу волн, а также получить достоверные значения скоростей распространения продольных и поперечных сейсмических колебаний [13].

Использованная методика обработки экспериментальных данных состоит из двух этапов:

- ручного – с построением системы встречных и нагоняющих годографов и определением границ раздела традиционными методами;

- машинного – с уточнением построенных разрезов путем последовательного решения прямых задач сейсморазведки методом лучевого трассирования с использованием пакета специализированных программ SEIS83 с дополнительными модулями.

*Ручная обработка сейсмических данных.*

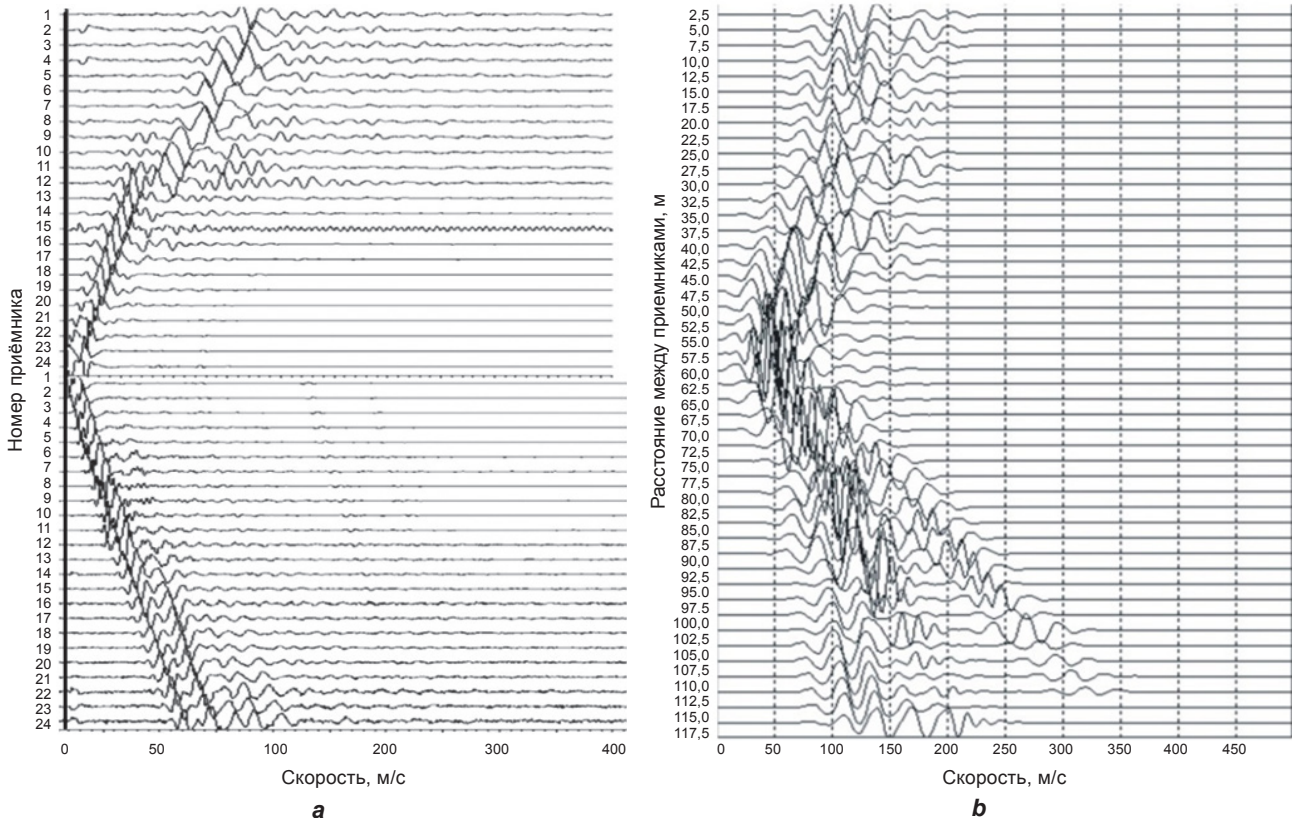
Одной из основных задач на данном этапе исследований было построение сейсмического разреза по преломляющим границам. Эти границы строились по годографам преломленных волн первых вступлений. Так как уверенно зафиксировать момент прихода волны из-за мешающего фона колебаний обычно не удается, на сейсмограммах выполняется фазовая корреляция, представляющая собой процесс прослеживания волн во времени и пространстве и основывающаяся на совокупности динамических и кинематических признаков. При волновой корреляции опираются на следующие признаки: полезная волна выделяется в виде импульса конечной длительности; амплитуда волны превышает амплитуду общего фона колебаний; форма записи (видимые периоды, соотношения основных и дополнительных экстремумов) повторяется на соседних трассах; время и кажущиеся скорости изменяются плавно [14]. Последние два признака основаны на предположении выдержанности или плавного изменения геометрии и физических свойств

границы и покрывающей ее среды и поэтому применимы в условиях относительно простого геологического строения. Из-за сложности определения начала и конца импульса волновая корреляция в чистом виде трудно осуществима. Фазовая корреляция ведется с прослеживанием одного или нескольких экстремумов записи. Линия, соединяющая одинаковые фазы колебаний, связанных с одной и той же волной на различных трассах, называется осью синфазности и представляет собой годограф фазы. Поскольку от правильного выполнения фазовой корреляции зависит форма полученных годографов, этот этап обработки играет важнейшую роль в процессе интерпретации [15].

В отличие от отраженных волн по определенному элементу годографа преломленных волн нельзя однозначно определить положение соответствующего элемента границы, поэтому для построения преломляющей границы используют системы встречных и нагоняющих годографов. Следующий этап – расчет глубины залегания границ. Для всех участков исследования ручным способом были схематично построены сейсмические разрезы, что является подготовительным этапом для дальнейшей обработки сейсмических данных и уточнения границ разреза в программном пакете SEIS83.

*Машинная обработка сейсмических данных.* Машинная обработка сейсмических данных позволяет уточнить разрез, построенный вручную. Поэтому при совпадении синтетической или экспериментальной (рассчитанной в пакете программ SEIS83) и теоретической (полученной посредством ручной обработки) сейсмограмм для одного и того же пункта взрыва более точным будет разрез, рассчитанный автоматически, чем разрез, построенный вручную во время полевых работ (рис. 3).

Программный пакет SEIS83 предназначен для численного решения прямой задачи сейсмике лучевым методом для двухмерной модели Земли, представляющей собой горизонтально неоднородную среду с криволинейными границами. Вычисление синтетических сейсмограмм лучевым методом выполняет программа SYNTPL, предназначенная для создания записей волновых полей, используемых для анализа реальных наблюдений методами сейсморазведки. При этом вертикально-неоднородные слои пред-



**Рис. 3. Сопоставление сейсмограмм сейсмического профиля на территории кинотеатра «Горизонт»:**

*a* – теоретическая сейсмограмма; *b* – экспериментальная сейсмограмма

**Fig. 3. Comparison of seismic profile seismograms on the territory of the Horizon cinema:**  
*a* – theoretical seismogram; *b* – experimental seismogram

ставляются в виде тонкослоистой среды, состоящей из однородных слоев с плоскими параллельными границами. В этом случае воспроизводятся только отраженные волны, преломленные волны формируются автоматически как сумма отражений от фиктивных границ. Входными файлами для SYNTPL является файл *au* вместе с *LU2*, созданные программой SEIS83.

Указанные файлы содержат всю информацию для лучевого метода: данные о границах, расположении приемников, скорости в слоях, соотношении скоростей и т. д. Границы задаются множеством точек, представляющих собой координаты *X* и *Z*, где *Z* – глубина, увеличивающаяся вниз, а *X* – горизонтальная координата, увеличивающаяся слева направо. Границы могут иметь угловые точки и быть фиктивными в некоторых частях, т. е. совпадать, но не пересекаться. Приемники располагаются на поверхности земли либо равномерно, либо в заданных пользователем точках. Скорости могут изменяться как по вертикали, так и по горизонтали. Расчеты производятся для продоль-

ной, поперечной и обменных волн. Результаты расчетов (лучи, годографы, амплитудные графики) выводятся в числовом виде в файлы *LU1*, *LU2* с произвольным названием по выбору пользователя.

Вывод информации в графическом виде выполняется программой RAYPLT\_D. Входной файл *de* для RAYPLT\_D содержит наблюдаемые годографы для одного пункта взрыва и информацию о размерах выходного рисунка, время редукции и прочее для вывода на экран результатов расчета программы SEIS83 в графическом виде. Возможен вывод как всей рассчитанной модели, так и любой ее части. Лучевая диаграмма, годограф и амплитуда выводятся в трех отдельных окнах, размер и масштаб которых можно менять. Пользователь может вывести как все лучи, так и лучи с заданными номерами.

### Результаты исследования и их обсуждение

Решение проблем оценки сейсмической опасности в различных геологических условиях рассмотрены в работах [16–18].



*Построение и изучение сейсмических разрезов на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук.* Волновое поле, зарегистрированное на трех сейсмических профилях с общей протяженностью 585 м на площадке ИВиС ДВО РАН (всего более 150 записей многоканальных сейсмограмм), соответствует тонкослоистому разрезу грунтов, внутри которого отмечено чередование высокоскоростных и низкоскоростных прослоев, что приводит к возникновению эффекта выпадения пласта. Например, если одна из границ имеет меньшую скорость, это приводит к тому, что преломленная волна от нее не фиксируется в области первых вступлений, а переходит в область вторых вступлений.

Эффект выпадения сейсмического слоя (выпадение пласта) – это явление, при котором преломленная волна, соответствующая какой-либо преломляющей границе, не регистрируется в области первых вступлений при сейсморазведке.

Это происходит в трехслойном (многослойном) разрезе, когда преломленная волна от первой границы раздела сред не появляется в области первых вступлений, а регистрируется только во вторых вступлениях.

Выпадение пласта может вызывать ошибки в определении глубин до второй границы раздела сред, так как вместо трехслойного разреза представляется двухслойный, состоящий из пластов со скоростями.

Однако при работе методом вторых вступлений выпадение пласта не опасно, так как преломленные волны этим методом можно проследить не только в первых вступлениях, а интерпретация наблюдений позволяет правильно сделать вывод о строении среды.

В целом регистрируемое волновое поле обеспечивает построение сейсмических границ в верхней части с использованием волн первых вступлений и последующим наращиванием разреза сверху вниз, введением в интерпретацию волн последующих вступлений с применением интеграционных процедур в процессе математического направленного моделирования [19].

В результате проведенных работ были изучены разрезы грунтов вдоль трех взаимно-пересекающихся профилей на территории ИВиС

ДВО РАН. Максимальная глубина исследований составила 65 м, а количество выделенных границ – 13. Все разрезы подстилаются толщей пород, скорость продольных волн в которых не менее 2,5 км/с. Прямых измерений этого параметра нет, но по соотношениям параметров падающих и отраженных волн полученные величины могут рассматриваться как предельные, т. е. нижний слой подстилается слоем со скоростями не более 2,5 км/с. Пример одного из трех сейсмических разрезов грунта представлен ниже (рис. 4).

Важной особенностью строения всех трех разрезов является обнаружение слоя пониженных скоростей на глубине приблизительно 18,5–20 м, который связан с озерными отложениями, что не является благоприятным условием для строительства.

При обработке сейсмических данных в программном пакете SEIS83 создаются файлы с физико-механическими параметрами грунтов, которые содержат информацию о скорости и коэффициенте затухания продольных и поперечных волн, плотности, мощности слоя и глубины залегания каждой границы, а также модули сдвига и сжатия. Для исследования горизонтальных неоднородностей грунтов, позволяющих оценить изменения литологического состава пород в слое, на сейсмические разрезы были нанесены изолинии скоростей, которые позволили более наглядно проследить изменение скоростей по горизонтали и вертикали вдоль профиля (рис. 5).

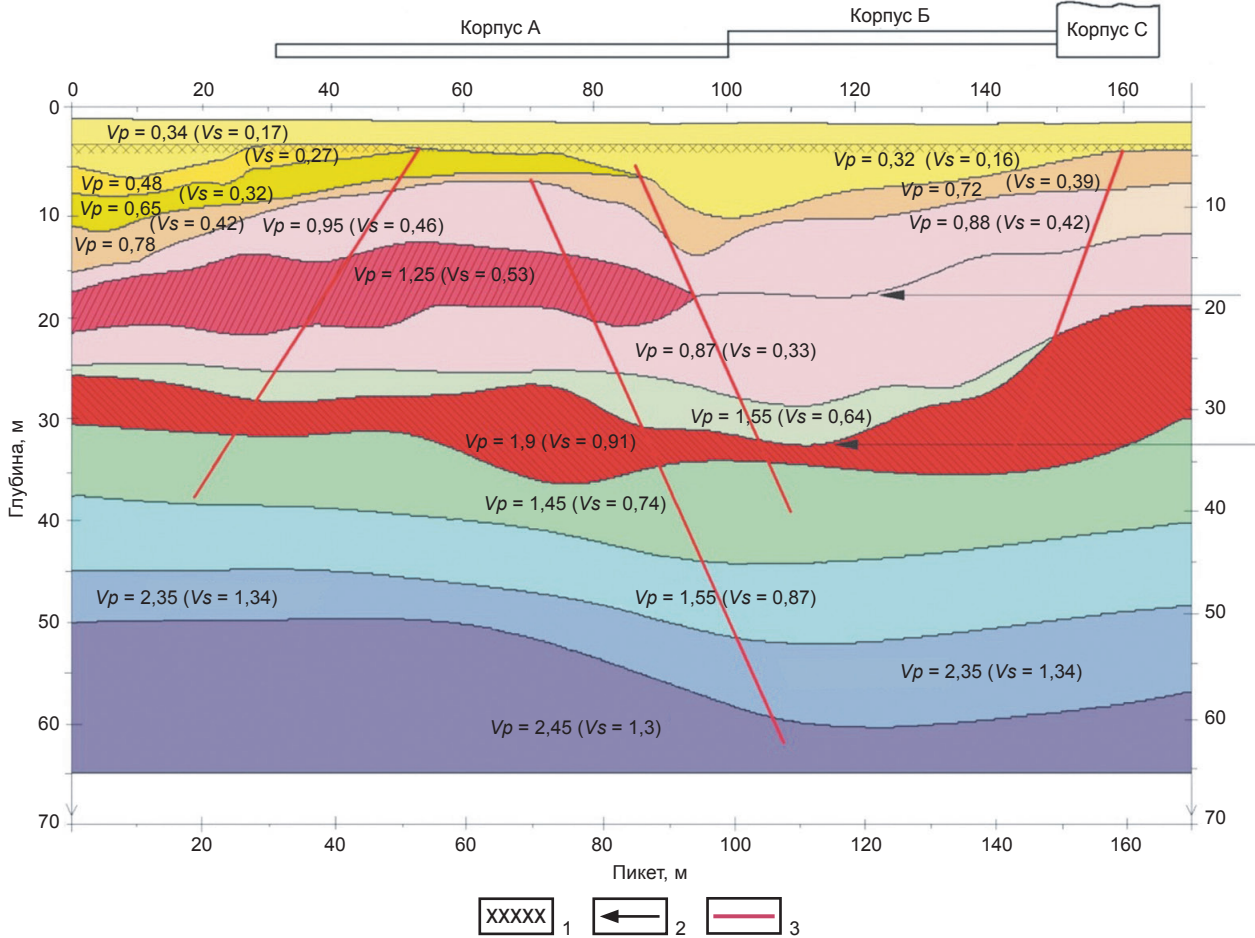
Неоднородности грунтов прослеживаются по горизонтали вдоль всех трех профилей. Это дает возможность утверждать, что на исследуемой площадке невозможно выбрать точку бурения инженерно-геологической скважины, которая позволит охарактеризовать площадку в целом. В соответствии с картой А ОСП-2015<sup>1</sup> площадка ИВиС ДВО РАН располагается в зоне 9-балльных сотрясений без учета локальных условий. Вместе с тем особенности структуры местных грунтов могут способствовать как уменьшению, так и увеличению этих значений.

*Построение и изучение сейсмических разрезов на территории площадки кинотеатра «Горизонт».* Методика конструирования сейсмического разреза по экспериментальному

<sup>1</sup> СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах». Актуализированная редакция СНиП II-7-81. М.: Стандартинформ, 2018. 114 с.



Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук



**Рис. 4. Сейсмический разрез грунта вдоль профиля 1 на территории Института Вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук:**

1 – уровень строительного фундамента здания; 2 – высокоскоростные слои;

3 – возможные разломы (границы резкой смены физических (геологических) параметров);  
Vp – сейсмические скорости продольных волн; Vs – сейсмические скорости поперечных волн

**Fig. 4. Seismic soil cross-section along profile 1 on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences:**

1 – building foundation level; 2 – high-velocity layers;

3 – possible faults (boundaries of abrupt changes in physical (geological) parameters);  
Vp – seismic velocities of longitudinal waves; Vs – seismic velocities of transversal waves

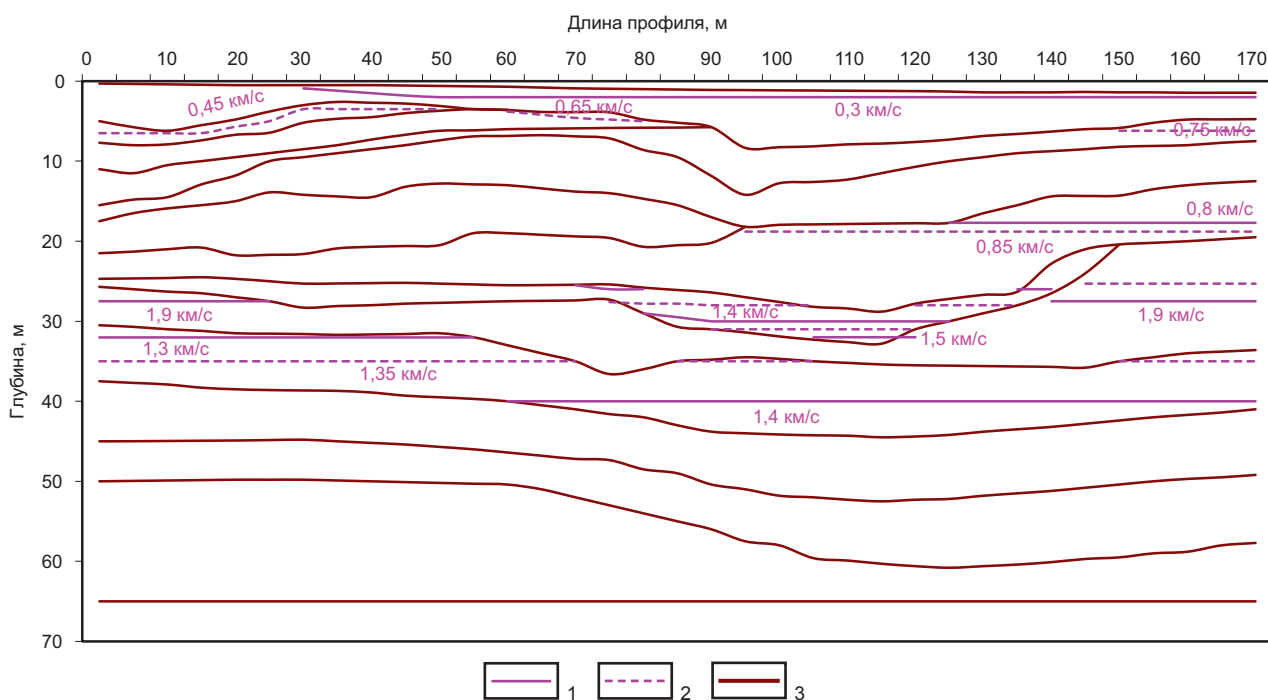
волновому полю, основа которого представляет направленное трассирование сейсмических лучей в неоднородно-слоистых средах по пакету программ SEIS83, позволяет более точно определить природу волн, а также получить более достоверные значения скоростей продольных и поперечных сейсмических волн (см. рис. 3)

На сейсмограммах профиля на территории кинотеатра «Горизонт» хорошо прослеживаются волны первых вступлений. Волны вторых вступлений – низкоскоростные, они имеют низкочастотные колебания. Это связано с процессом обмена продольных волн на поперечные и обратно, что позволяет регистрировать на вертикальных приборах ком-

поненты поперечных колебаний и, соответственно, получать информацию о сдвиговых характеристиках грунтов в большом диапазоне глубин.

В целом регистрируемое волновое поле обеспечивает построение сейсмических границ в верхней части с использованием волн первых вступлений с последующим наращиванием разреза сверху вниз и введением в интерпретацию волн последующих вступлений (рис. 6).

На сейсмическом разрезе показаны не только сейсмические границы (их геометрия), но также значения скоростей распространения продольных и поперечных волн (в километрах в секунду) и глубины (в метрах от

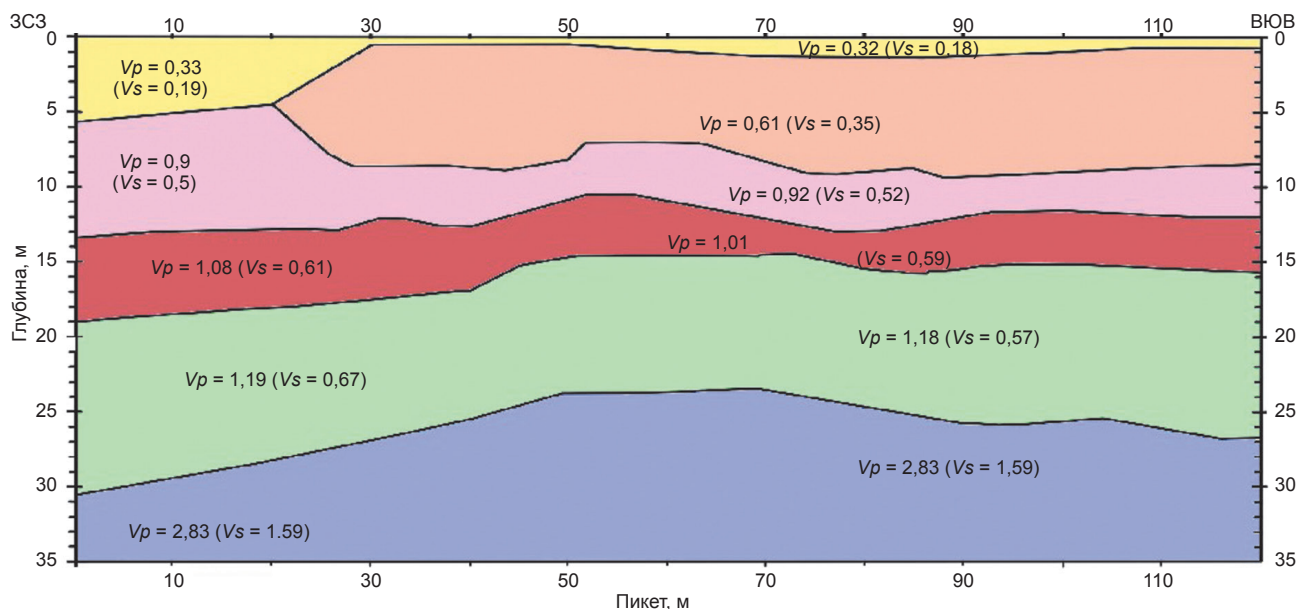


**Рис. 5. Сейсмический разрез грунта по профилю 1 с нанесенными изолиниями скоростей на территории Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук:**

1, 2 – изолинии скоростей; 3 – границы грунтов

**Fig. 5. Seismic soil cross-section along profile 1 with plotted velocity isolines on the territory of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences:**

1, 2 – velocity isolines; 3 – soil boundaries



**Рис. 6. Сейсмический разрез по профилю на территории кинотеатра «Горизонт»:**

$V_p$  – сейсмические скорости продольных волн;  $V_s$  – сейсмические скорости поперечных волн

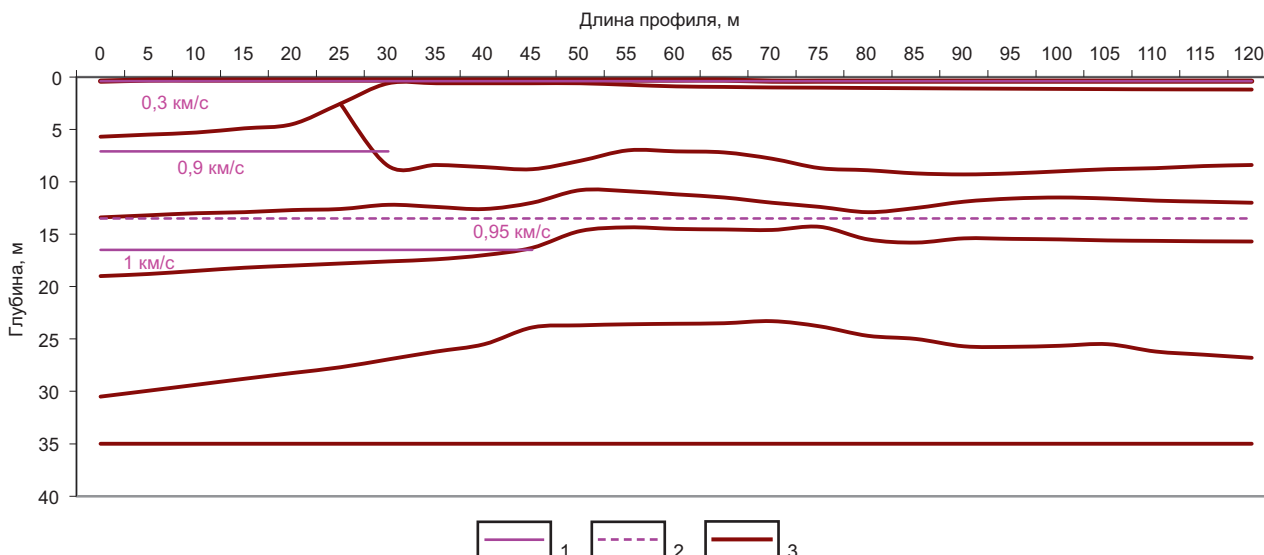
**Fig. 6. Seismic profile section on the territory of the Horizon cinema:**

$V_p$  – seismic velocities of longitudinal waves;  $V_s$  – seismic velocities of transversal waves

дневной поверхности). Рассчитанная модель разреза имеет 5 границ, причем максимальная глубина исследования составляет 35 м. Все слои подстилаются толщей пород, ско-

рость продольных волн в которых составляет 2,83 км/с.

Скоростные характеристики верхних 10 м грунта, за исключением слоя почвенно-пирокла-



**Рис. 7. Сейсмический разрез по профилю 1 с нанесенными изолиниями скоростей на территории кинотеатра «Горизонт»:**

1, 2 – изолинии скоростей; 3 – границы грунтов

**Fig. 7. Seismic section along the profile with plotted velocity isolines on the territory of the Horizon cinema:**

1, 2 – velocity isolines; 3 – soil boundaries

стических отложений (1,5–5,5 м), по сейсмическим свойствам соответствуют грунтам II категории.

Используя данные скоростей, полученных в расчетных методах, на разрез были нанесены изолинии скоростей для более наглядного наблюдения за изменением скоростей по вертикали и горизонтали вдоль профиля (рис. 7).

Как видно из рис. 7, изолинии скоростей не повторяют геометрию границ. Это дает возможность утверждать о значительной неоднородности литологического состава пород в слоях грунта вдоль профиля. Это значит, что на исследуемом профиле невозможно выбрать точку бурения инженерно-геологической скважины, позволяющую охарактеризовать площадку в целом, поскольку изменение скоростей вдоль профиля относительно точки исследования может давать как увеличение, так уменьшение сейсмической балльности.

### Заключение

В соответствие с картой А ОСР-2015<sup>1</sup> площадки ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» располагаются в зоне 9-балльных сотрясений без учета локальных условий. Более детальное изучение сейсмических разрезов, а именно точное наблюдение за изменением скоростей на небольших участках, позволило выделить в пределах исследуемой территории зоны с различной

сейсмической интенсивностью, которая может не соответствовать аналогичным характеристикам, определяемым на карте сейсмического районирования входящих в состав строительных норм и правил [20].

На территории ИВиС ДВО РАН и кинотеатра «Горизонт» проведены исследования тонкой структуры и скоростных параметров грунтов методом сейсмического 2D-профилирования, полученные материалы были обработаны и интерпретированы. В результате исследования были построены сейсмические разрезы, анализ сейсмограмм которых в дальнейшем был подтвержден при бурении скважин до глубины 20–25 м на всех участках работ. При сравнении изменения скоростных характеристик была отмечена неоднородность геологической структуры участков исследования по вертикали и горизонтали. Такая неоднородность наблюдается не только в строении, но и в физико-механических свойствах грунта и может влиять на уменьшение или увеличение сейсмической балльности исследуемого участка. Исследования достоверно показали, что выбрать место для бурения одной уникальной скважины, которая позволила бы охарактеризовать площадку в целом, невозможно. Поэтому наиболее эффективным является проведение сейсмического 2D-профилирования, которое даст возможность трехмерного измерения физико-механических параметров.



### Список источников

1. Ершов И.А. Об оценке сейсмической опасности для города Петропавловска-Камчатского // Труды Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: Наука, 1984. Вып. 25. Прогноз сейсмических воздействий. С. 82–90.
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation // Journal of Geophysics and Engineering. 2007. Vol. 4. Iss. 1. P. 94–103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Ершов И.А., Медведев С.В., Федотов С.А., Штейнберг В.В. Сейсмическое микрорайонирование г. Петропавловска-Камчатского // Вопросы инженерной сейсмологии / отв. ред. С.В. Медведев. М.: Изд-во АН СССР, 1965. Вып. 10. Сейсмическое микрорайонирование. С. 3–33
4. Obare J.O., Mariiata N.O., NjengaMburu. Application of geophysical methods in foundation investigation for construction purposes at Olkaria (V) fields, Kenya // Global Scientific Journals. 2020. Vol. 8. Iss. 3. P. 121–147. Режим доступа: [https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION\\_OF\\_GEOPHYSICAL\\_METHODS\\_IN\\_FOUNDATION\\_INVESTIGATION\\_FOR\\_CONSTRUCTION\\_PURPOSES\\_AT\\_OLKARIA\\_V\\_FIELDS\\_KENYA.pdf](https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION_OF_GEOPHYSICAL_METHODS_IN_FOUNDATION_INVESTIGATION_FOR_CONSTRUCTION_PURPOSES_AT_OLKARIA_V_FIELDS_KENYA.pdf) (дата обращения: 28.11.2024).
5. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.
6. Kumar M., Saini R. Reflection and refraction of attenuated waves at boundary of elastic solid and porous solid saturated with two immiscible viscous fluids // Applied Mathematics and Mechanics. English Edition. 2012. Vol. 33. Iss. 6. P. 797–816. <https://doi.org/10.1007/s10483-012-1587-6>.
7. Ершов И.А. Сопоставление инструментальных данных о скоростях распространения волн в грунте, амплитудах и периодах для сейсмического микрорайонирования // Труды Института физики Земли. М.: Наука, 1965. Вып. 36. Сейсмическое микрорайонирование. С. 46–60.
8. Egor A.O. Characterization of sub-surface structure, using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods in Ajere Ekoru Yakurr LGA of cross river state // GSC Advanced Research and Reviews. 2023. Vol. 16. Iss. 1. P. 188–200. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2023.16.1.0311>.
9. Fkirin M.A., Badawy S., El deery M.F. Seismic refraction method to study subsoil structure // Journal of Geology & Geophysics. 2016. Vol. 5. P. 259–265. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000259>.
10. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>. EDN: YHXPNN.
11. Крук П.Н. Опыт использования отечественного программного обеспечения для комплексной интерпретации данных сейсморазведки 2D/3D // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли: сборник докладов науч.-практ. конф. журнала «Нефтяное хозяйство», 2019 г. (г. Санкт-Петербург – Самара – Анапа – Волгоград, 16 марта – 31 октября 2019 г.). М.: ЗАО «Издательство “Нефтяное хозяйство”», 2020. С. 206–209. EDN: MWGBGJ.
12. Сакулина Т.С., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А. Глубинные сейсмические зондирования по профилю 1-AP в Баренцевом море: методика и результаты // Физика Земли. 2016. № 4. С. 107–124. <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086>. EDN: WALRKJ.
13. Сенин Л.Н., Сенина Т.Е. Инструментальные данные малоглубинной сейсморазведки в расчетах сейсмических жесткостей при сейсмическом микрорайонировании // Уральский геофизический вестник. 2020. Т. 42. № 4. С. 29–35. <https://doi.org/10.25698/UGV.2020.4.5.29>. EDN: VFACZB.
14. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А., Сергеев К.Ф., Утнасин В.К., Федорченко В.И. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки / отв. ред. А.А. Попов, Г.С. Гнибиденко. М.: Наука, 1978. 130 с.
15. Niederleithinger E., Abraham O., Mooney M. Geophysical methods in civil engineering: overview and new concepts // International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (Berlin, 15–17 September 2015). BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing. Режим доступа: [https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018\\_niederleithinger\\_ernst.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018_niederleithinger_ernst.pdf) (дата обращения: 28.11.2024).
16. Баранов С.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В., Автоматизированная оценка опасности афтершоков землетрясения в Турции 06.02.2023 г.,  $M_w 7.8$  // Физика Земли. 2023. № 6. С. 133–141. <https://doi.org/10.31857/S0002333723060042>. EDN: MUXRXQ.
17. Захарченко Е.И., Рудомеха Н.Н., Захарченко Ю.И., Андрейко Н.Г. Инженерные геофизические исследования на площадке изысканий в северной части г. Краснодара // Булатовские чтения: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Краснодар, 31 марта 2021 г.). Краснодар: Изд-во ООО «Издательский Дом – Юг», 2021. Т. 1. С. 54–57. EDN: UJHVUJ.
18. Нерадовский Л.Г. Ошибки распознавания по скорости распространения сейсмической волны геологической природы слоев в мерзлых четвертичных отложениях долины реки Лены // Научный альманах. 2021. № 2-1. С. 72–78. EDN: FVAAGQ.
19. Медведев Е.С. Соотношение размеров зданий и сейсмических свойств грунтов // Труды Института физики Земли. М.: Наука, 1965. Вып. 36. Сейсмическое микрорайонирование. С. 171–174.
20. Гусев А.А., Зобин В.М., Феофилактов В.Д. Определение расчетной балльности и оценка параметров максимальных колебаний грунта площадки строительства на Камчатке // Вопросы инженерной сейсмологии: сб. науч. тр. / отв. ред. С.В. Медведев. М.: Наука, 1980. Вып. 20. С. 44–59.



### References

1. Ershov I.A. Assessing seismic hazard for Petropavlovsk-Kamchatsky. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli im. O.Yu. Shmidta = Proceedings of the O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1984, vol. 25, p. 82-90. (In Russ.).
2. Soupios P.M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andreadakis A., Vallianatos F., et al. Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2007;4(1): 94-103. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/4/1/011>.
3. Ershov I.A., Medvedev S.V., Fedotov S.A., Shteinberg V.V. Petropavlovsk-Kamchatsky seismic microzoning. In: Medvedev S.V. (ed.). *Voprosy inzhenernoi seismologii = Problems of engineering seismology*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR; 1965, vol. 10, p. 3-33. (In Russ.).
4. Obare J.O., Mariitaa N.O., NjengaMburu. Application of geophysical methods in foundation investigation for construction purposes at Olkaria (V) fields, Kenya. *Global Scientific Journals*. 2020;8(3):121-147. Available from: [https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION\\_OF\\_GEOPHYSICAL\\_METHODS\\_IN\\_FOUNDATION\\_INVESTIGATION\\_FOR\\_CONSTRUCTION\\_PURPOSES\\_AT\\_OLKARIA\\_V\\_FIELDS\\_KENYA.pdf](https://globalscientificjournal.com/researchpaper/APPLICATION_OF_GEOPHYSICAL_METHODS_IN_FOUNDATION_INVESTIGATION_FOR_CONSTRUCTION_PURPOSES_AT_OLKARIA_V_FIELDS_KENYA.pdf) [Accessed 28<sup>th</sup> November 2024].
5. Goryainov N.N., Lyakhovitskii F.M. *Seismic methods in engineering geology*. Moscow: Nedra; 1979, 143 p. (In Russ.).
6. Kumar M., Saini R. Reflection and refraction of attenuated waves at boundary of elastic solid and porous solid saturated with two immiscible viscous fluids. *Applied Mathematics and Mechanics. English Edition*. 2012;33(6):797-816. <https://doi.org/10.1007/s10483-012-1587-6>.
7. Ershov I.A. Comparison of instrumental data on ground wave propagation velocities, amplitudes and periods for seismic microzoning. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli = Proceedings of the Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1965, vol. 36, p. 46-60. (In Russ.).
8. Egor A.O. Characterization of sub-surface structure, using seismic refraction and multi-channel analysis of surface waves methods in Ajere Ekorri Yakurr LGA of cross river state. *GSC Advanced Research and Reviews*. 2023;16(1):188-200. <https://doi.org/10.30574/gscarr.2023.16.1.0311>.
9. Fkirin M.A., Badawy S., El deery M.F. Seismic refraction method to study subsoil structure. *Journal of Geology & Geophysics*. 2016;5:259-265. <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000259>.
10. Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A. Why are new approaches to seismic hazard assessment required? *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;507(1):91-97. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>. EDN: YHXPNN.
11. Kruk P.N. Domestic software use experience for complex interpretation of 2D/3D seismic data. In: *Aktual'nye problemy neftegazovoi otrasli: sbornik dokladov nauch.-prakt. konf. zhurnala "Neftyanoe khozyaistvo" 2019 g. = Actual problems of oil industry: collected reports of the scientific and practical conferences held by Oil Industry Journal in 2019*. 16 March – 31 October 2019, Saint Petersburg – Samara – Anapa – Volgograd. Moscow: Izdatel'stvo "Neftyanoe khozyaistvo"; 2020, p. 206-209. (In Russ.). EDN: MWGBGJ.
12. Sakoulina T.S., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A. Deep seismic soundings on the 1-AP profile in the Barents sea: methods and results. *Fizika Zemli*. 2016;4:107-124. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0002333716040086>. EDN: WALRKJ.
13. Senin L.N., Senina T.E. Instrumental data of low-depth seismic survey in calculations of seismic rigidity in seismic microzoning. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*. 2020;42(4):29-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.25698/UGV.2020.4.5.29>. EDN: VFACZB.
14. Anosov G.I., Bikkenina S.K., Popov A.A., Sergeev K.F., Utnasin V.K., Fedorchenko V.I. *Kamchatka deep seismic sounding*. Moscow: Nauka; 1978, 130 p. (In Russ.).
15. Niederleithinger E., Abraham O., Mooney M. Geophysical methods in civil engineering: overview and new concepts. In: *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. 15–17 September 2015, Berlin. BAM, Federal Institute for Materials Research and Testing. Available from: [https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018\\_niederleithinger\\_ernst.pdf](https://www.ndt.net/article/ndtce2015/papers/018_niederleithinger_ernst.pdf) [Accessed 28<sup>th</sup> November 2024].
16. Baranov S.V., Shebalin P.N., Vorob'eva I.A., Selyutskaya O.V. Automated assessment of hazards of aftershocks of the  $M_w$  7.8 earthquake in Turkey of February 6, 2023. *Fizika Zemli*. 2023;6:133-141. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002333723060042>. EDN: MUXRXQ.
17. Zakharchenko E.I., Rudomakha N.N., Zakharchenko YU.I., Andreiko N.G. Engineering geophysical research at the survey site in the northern part city of Krasnodar. In: *Bulatovskie chteniya: materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Readings name of A.I. Bulatov: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International scientific and practical conference*. 31 March 2021, Krasnodar. Krasnodar: Izdatel'skii Dom – Yug; 2021, vol. 1, p. 54-57. (In Russ.). EDN: UJHVUJ.
18. Neradovskii L.G. Errors in recognizing the geological nature of layers in frozen Quaternary sediments of the Lena river valley by the seismic wave propagation velocity. *Science Almanac*. 2021;2-1:72-78. (In Russ.). EDN: FVAAGQ.
19. Medvedev E.S. Correlation of building sizes and seismic properties of soils. In: *Trudy Instituta fiziki Zemli = Proceedings of the Institute of Physics of the Earth*. Moscow: Nauka; 1965, vol. 36, p. 171-174. (In Russ.).
20. Gusev A.A., Zobin V.M., Feofilaktov V.D. Estimated intensity determination and maximum ground vibration parameters assessment at a construction site in Kamchatka. In: Medvedev S.V. (ed.). *Voprosy inzhenernoi seismologii = Problems of Engineering Seismology*. Moscow: Nauka; 1980, vol. 20, p. 44-59. (In Russ.).



### Информация об авторах / Information about the authors



**Марычева Анастасия Валентиновна,**  
аспирант,  
Научно-исследовательский геотехнологический центр  
Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,  
✉ marycheva\_av@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-4772-0263>  
**Anastasia V. Marycheva,**  
Postgraduate Student,  
Scientific Research Geotechnological Centre,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  
✉ marycheva\_av@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-4772-0263>



**Сидоров Михаил Дмитриевич,**  
кандидат геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Научно-исследовательский геотехнологический центр  
Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,  
smd1952z@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0000-1642-1529>  
**Mikhail D. Sidorov,**  
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Leading Researcher,  
Scientific Research Geotechnological Centre,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  
smd1952z@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0000-1642-1529>



**Пантелеймонова Татьяна Валентиновна,**  
аспирант,  
Научно-исследовательский геотехнологический центр  
Дальневосточного отделения Российской академии наук,  
г. Петропавловск-Камчатский, Россия,  
tatiana\_686@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-9870-0119>  
**Tatiana V. Panteleimonova,**  
Postgraduate Student,  
Scientific Research Geotechnological Centre,  
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  
tatiana\_686@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0003-9870-0119>

### Вклад авторов / Contribution of the authors

А.В. Марычева – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.  
М.Д. Сидоров – научное руководство, редактирование рукописи.  
Т.В. Пантелеймонова – разработка концепции, формальный анализ, написание черновика рукописи.  
Anastasia V. Marycheva – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.  
Mikhail D. Sidorov – supervision, writing – editing.  
Tatiana V. Panteleimonova – conceptualization, formal analysis, writing – original draft.

### Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare no conflicts of interests.



*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

#### **Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 14.05.2025; одобрена после рецензирования 04.07.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The article was submitted 14.05.2025; approved after reviewing 04.07.2025; accepted for publication 17.09.2025.



Научная статья

УДК 550.8.05:550.853:550.856

EDN: MJNOWB

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349



## Применение методики анализа массовой трещиноватости для оценки устойчивости массива горных пород Ирокиндинского золоторудного месторождения

И.В. Матвеева<sup>a✉</sup>, С.А. Бузов<sup>b</sup>, О.А. Матвеев<sup>c</sup>, Т.О. Шигарова<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме.** Основными структурными особенностями породного массива, определяющими его механические и деформационные свойства и, как следствие, его устойчивость, являются трещиноватость, блочность и слоистость, а также собственно состав горных пород. Большое количество открытых мелких трещин на стенках выработок проявляется также при взрывных работах и механизированной проходке, что занижает основные структурные показатели массива и приводит к ухудшению прогноза устойчивости согласно системе З.Т. Бенявски, часто применяемой на практике. Целью инженерно-геологического изучения массовой трещиноватости глубоких горизонтов Ирокиндинского золоторудного месторождения являлись качественная оценка свойств массива, приближенная количественная оценка свойств массива расчетным путем и выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива. Наличие уточненных данных о трещиноватости массива горных пород позволяет корректировать класс устойчивости в сторону как увеличения, так и уменьшения, в том числе и при проходке горных выработок, а также обозначить перспективные направления в изучении закономерностей распространения трещин при ведении взрывных работ и их влиянии на сохранность законтурного массива и управления взрывами с целью уменьшения воздействия на массив горных пород. Полученные результаты качественного и количественного изучения трещиноватости интерпретировались с точки зрения их генетического происхождения с целью интерполяции оценки параметров трещиноватости и показателей свойств горных пород в массиве и возможности их учета при расчете устойчивости горных выработок по различным методикам. На основе полученных материалов документации стенок горных выработок и изучения керна скважин создана 3D-модель отдельных участков Ирокиндинского золоторудного месторождения, позволяющая повысить точность районирования массива горных пород для решения актуальных производственных задач – прогнозирования геомеханических процессов и совершенствования методов управления ими.

**Ключевые слова:** устойчивость горных пород, трещиноватость, структурные блоки, системы трещин, выветривание, законтурный массив

**Для цитирования:** Матвеева И.В., Бузов С.А., Матвеев О.А., Шигарова Т.О. Применение методики анализа массовой трещиноватости для оценки устойчивости массива горных пород Ирокиндинского золоторудного месторождения // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 335–349. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349>. EDN: MJNOWB.

Original article

## Application of mass fracturing analysis to assess Irokinda gold deposit rock mass stability

Irina V. Matveeva<sup>a✉</sup>, Sergey A. Buzov<sup>b</sup>, Oleg A. Matveev<sup>c</sup>, Tatiana O. Shigarova<sup>d</sup>

<sup>a-d</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The main structural features of a rock mass that determine its mechanical and deformational properties and, consequently, its stability are fracturing, blockiness, and layering, as well as the rock composition itself. A large number of small open cracks on the walls of workings also appear during blasting and mechanized excavation, which underestimates the main structural parameters of the massif and deteriorates the stability forecast according to the Z.T. Bieniawski system, which is frequently used in practice. The purpose of the engineering-geological study of mass fracturing of the deep horizons of the Irokinda gold deposit was: qualitative assessment of the rock mass properties, approximate quantitative assessment of the rock mass properties by calculation, and identification of hazardous intervals within the entire rock mass. The availability of refined data on rock mass fracturing allows for both upward and downward adjustments to the stability class, including those during mine development. It also identifies promising areas for studying crack propagation patterns during blasting operations and their impact on the integrity of the peripheral rock mass, as well as blast control

© Матвеева И.В., Бузов С.А., Матвеев О.А., Шигарова Т.О., 2025



to reduce the impacts on the rock mass. The obtained results of the qualitative and quantitative fracturing study were interpreted in terms of their genetic origin to interpolate the estimates of fracturing parameters and rock property indicators in the massif and the possibility of taking them into account when calculating the stability of mine workings using various methods. Based on the obtained documentation materials of the mine walls and the study of borehole cores, a 3D model of individual sections of the Irokinda gold deposit was created. It allows to improve the accuracy of rock mass zoning for addressing current production challenges, such as predicting geomechanical processes and improving their management methods.

**Keywords:** rock mass stability, fracturing, structural blocks, fracture systems, weathering, peripheral rock mass

**For citation:** Matveeva I.V., Buzov S.A., Matveev O.A., Shigarova T.O. Application of mass fracturing analysis to assess Irokinda gold deposit rock mass stability. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):335-349. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-335-349>. EDN: MJNOWB.

## Введение

Необходимость специального изучения геометрии систем трещин как предварительного условия для построения трещиноватых массивов была ясна исследователям с первых попыток систематического изучения геологической трещиноватости. Трещина является естественным итогом развития различных процессов в геологической среде и возникает тогда, когда определенная функция механических напряжений превосходит некоторый характерный для данного состояния предел, так называемый критическим уровнем разрушения. Генетический тип трещины фиксирует тип механического состояния геологической среды в момент образования этой трещины, масштаб которой характеризует в свою очередь энергетический потенциал трещинообразующего процесса.

Таким образом, геологическая трещина представляет собой сложный физико-механический объект, обладающий обширным набором качественных и количественных характеристик. Важной особенностью геологической трещиноватости является ее массовый характер, в связи с чем наряду с изучением формы и строения отдельных трещин первостепенное значение при полевом исследовании приобретает изучение скрытой статистической упорядоченности строения и свойств систем трещин.

Взрывные работы – неотъемлемый важнейший процесс горной технологии, от которого зависят последующие процессы добычи и переработки полезного ископаемого, а также дальнейшего безопасного существования горной выработки. В этой связи особую значимость при обработке замеров массовой трещиноватости представляют статистическое описание и анализ параметров ориентации плоскостей трещин, являющиеся отдельной самостоятельной задачей и требующие для их интерпретации применения специальных методик математического описания с учетом

физико-механических и геологических особенностей вмещающего эту сеть массива горных пород. Численное моделирование становится важным инструментом для прогнозирования взаимодействия горной породы и буровзрывных работ.

Цель выполненного нами исследования заключалась в проведении массовых статистических измерений параметров трещиноватости в горных выработках Ирокиндинского золоторудного месторождения для выделения групп трещин различной ориентировки, анализа факторов их пространственного изменения и степени их предрасположенности к обрушению.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись стенки подземных горных выработок жилы Медвежья НТС-2, в которых выполнены структурная документация выделенных блоков массива горных пород, массовые замеры трещиноватости, опробование и определение физико-механических свойств пород. Всего выполнено более 10 000 замеров трещиноватости с ПК0 по ПК100, отобрано и проанализировано 200 проб горных пород.

Основную часть площади Ирокиндинского месторождения занимает киндиканская толща архейского возраста, которая представлена парагнейсами, параамфиболитами, кристаллосланцами, кальцифирами и мраморами, часто метаморфизованными от зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фаций.

Для всех изученных участков характерно частое переслаивание гнейсов, гнейсов беретизированных, гнейсов мигматизированных и мигматитов от очень прочных до средней прочности. Вся толща разбита тектоническими нарушениями в виде разрывов различной морфологии, зон дробления, рассланцевания, будинажа и милонитизации.



Как известно, параметры трещин определяют устойчивость горных выработок, прочность на сдвиг, деформируемость и водопроницаемость скальных массивов<sup>1</sup> [1, 2].

Однако для решения каждой конкретной инженерной задачи применяется своя многопараметрическая модель трещиноватости.

Так, для расчета деформаций допустимо использование средней ширины трещин  $b$ , от которой зависит модуль деформации. Для оценки фильтрационных свойств массива наиболее важным параметром является ширина раскрытия трещин [3].

Для решения поставленной задачи – расчета устойчивости скального массива с системами трещин – определялись генетический тип трещин, тип трещин по степени раскрытия и характеристике заполнителя, характер поверхности и измерялись такие параметры систем трещин, как азимут падения, угол падения, длина и расстояние между трещинами.

Особое внимание при полевых замерах и обработке результатов замеров массовой трещиноватости уделялось описанию и анализу параметров ориентации плоскостей трещин по отношению к оси горной выработки с целью корректировки устойчивости массива горных выработок, полученной по другим методикам, в частности по З.Т. Бенявски. В этой связи принималось во внимание:

- отражение только существенных для данной задачи черт структуры массива;
- пригодность для расчета устойчивости горной выработки современными методами;
- включение в расчет только тех параметров трещиноватости, которые могут быть определены в исследуемом массиве доступными для изысканий методами.

### Результаты исследований и их обсуждение

Во время подготовительного этапа была составлена эталонная коллекция литологических разностей вмещающих пород, руд

и вариантов заполнителей трещин объекта исследований. Основным этапом заключался в инструментальных замерах параметров залегания трещин и систем трещин, а также в визуальном обследовании горных выработок:

- разметке метража горных выработок и выделении интервалов и блоков;
- фотографировании стенок выработки в пределах одного интервала;
- заполнении альбома документации с зарисовкой стенки;
- заполнении журнала трещин и журнала структурных блоков;
- отборе проб горных пород.

Документация проводилась в строгой привязке к маркшейдерским планам. Особое внимание уделялось горным выработкам, проходящим вкрест залегания пород и рудных тел и пересекающим одинаковые структуры и комплексы. Погрешность в определении структур на общем плане не превышала 1 м [4–7].

Анализ состояния массива горных пород по ориентировке трещиноватости в процессе камеральной обработки эмпирио-аналитическими методами сводился к оценке его устойчивости и основывался на выделении групп трещин различной степени предрасположенности к обрушению. Выделялись группы по двум критериям: углу падения и азимуту простирания трещин.

При распределении трещин по углу падения относительно угла наклона ствола скважины выделены три группы устойчивости согласно табл. 1.

При распределении трещин по азимутам простирания главным критерием являлась длина плоскости разлома, пересекающей горную выработку, и угол между азимутами простирания выработки и системы трещин. При этом наименьшая длина плоскости разлома являлась благоприятным фактором, а наибольшая – осложняющим. Согласно вышеописанному признаку выделены три группы трещин, приведенные в табл. 2 [6].

**Таблица 1. Группы трещин по углу падения относительно угла наклона ствола скважины**  
**Table 1. Fracture sets by dip angle relative to borehole inclination angle**

Наименование группы	Углы падения трещин относительно угла наклона ствола выработки
Устойчивые	0–29°
Слабоустойчивые	30–59°
Неустойчивые	60–90°

<sup>1</sup> Рекомендации по изучению трещиноватости горных пород при инженерно-геологических изысканиях для строительства. М.: Стройиздат, 1974. 39 с.



**Таблица 2. Группы трещин по азимуту простираения относительно азимута простираения выработки**  
**Table 2. Fracture sets by strike azimuth relative to heading azimuth**

Наименование группы	Угол падения между азимутами простираения выработки и системы трещин
Благоприятные	-60...120° +60...120°
Неблагоприятные	-30...59° (-121...150°) +30...59° (+121...150°)
Весьма неблагоприятные	0...29° (-151...180°) 0...29° (+151...180°)

Например, для выработки с простираением 45° (рис. 1):

– благоприятными будут системы с простираением 345–285° и 105–165°;

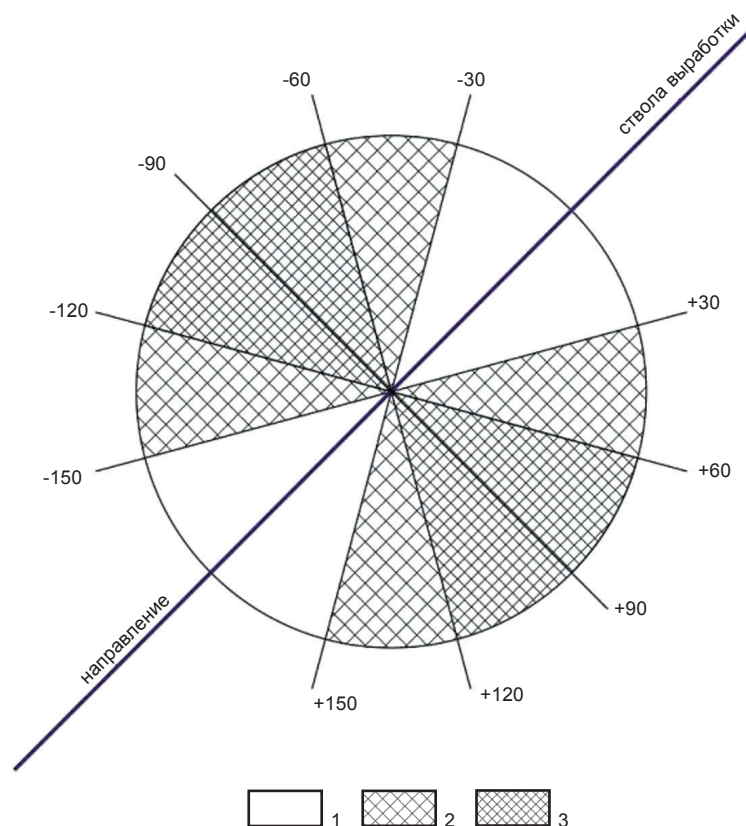
– неблагоприятными будут системы с простираением 346–15°; 284–55° и 75–104°; 166–195°;

– весьма неблагоприятными будут системы с простираением 16–45°; 225–254° и 45–74°; 196–225°.

После распределения всех трещин по трем типам групп формировалась общая таблица распределения массовой трещиноватости, где в каждую клетку записывалось значение количества трещин (процент от общего числа), попавших в общую группу (по углу падения и азимуту простираения).

В качестве примера рассмотрим интервал ПК0–ПК10 жилы Медвежья НТС-2, который условно был разделен нами на блоки МН-1–МН-10 (рис. 2, табл. 3).

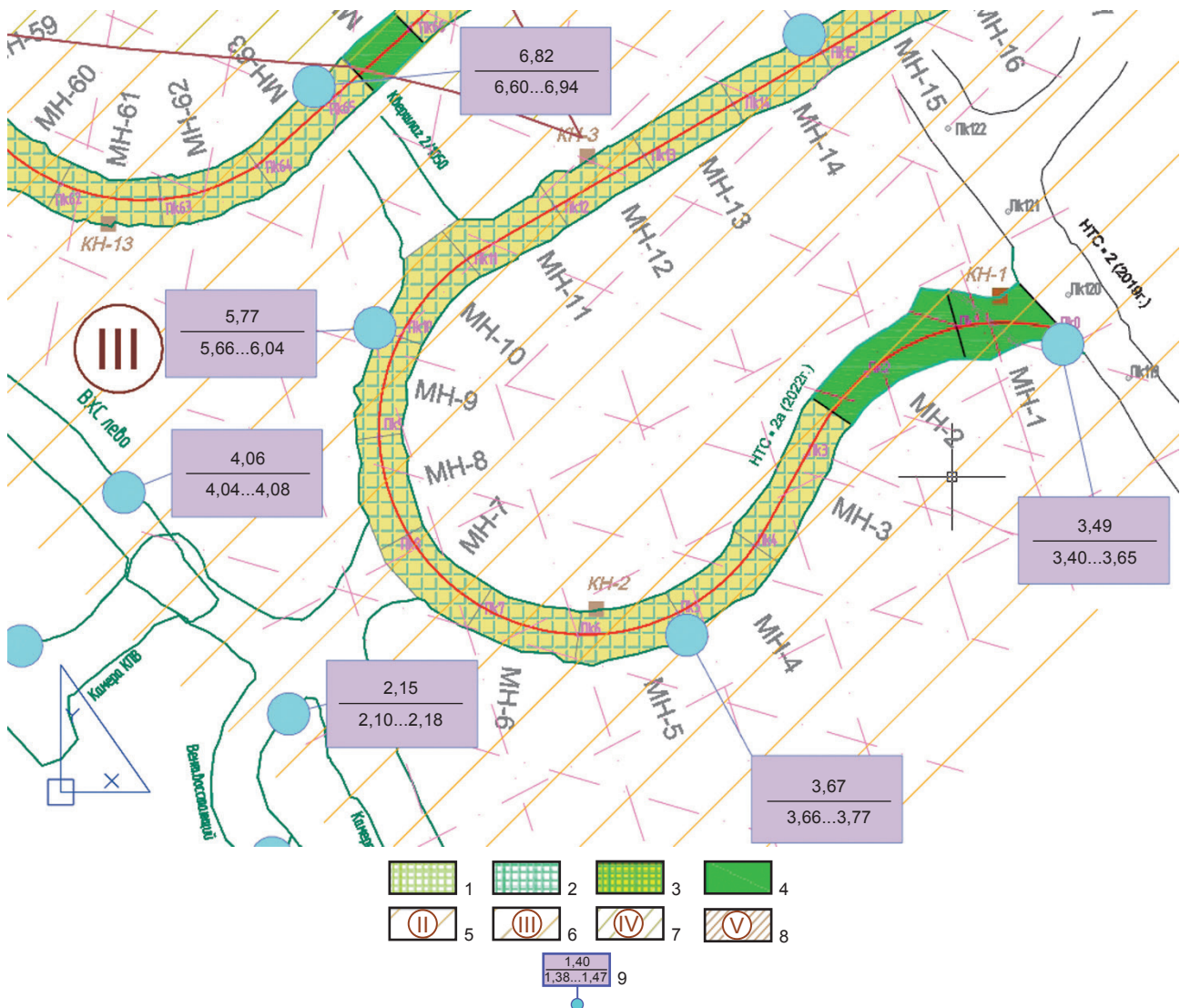
Породы описываемого интервала ПК0–ПК6, представленные гранито-гнейсами и характеризующиеся преобладанием трещин скола, слагают преддустьевую часть массива, находящуюся вблизи дневной поверхности и подверженную воздействию экзогенных процессов (рис. 3). Осложняющим фактором является наличие системы трещин, субпараллельной выработке, на ПК4–ПК6. В целом интервал рассматривается как массив со слабой устойчивостью. Породы с ПК6 до ПК10 характеризуются сменой классов устойчивости



**Рис. 1. Распределение групп трещин по азимуту простираения для выработки с простираением 45°:**  
1 – весьма неблагоприятная группа; 2 – неблагоприятная группа; 3 – благоприятная группа

**Fig. 1. Fracture sets distribution by strike azimuth for a 45° strike drift:**

1 – most disadvantageous group; 2 – disadvantageous group; 3 – advantageous group



**Рис. 2. НТС-2 с выделенными участками структурных блоков:**

1–4 – модуль трещиноватости пород в блоке: 1 – 1,5–5 тр/м (слаботрещиноватые), 2 – 5–10 тр/м (среднетрещиноватые), 3 – 10–30 тр/м (сильнотрещиноватые), 4 – более 30 тр/м (очень сильнотрещиноватые);  
 5–8 – класс состояния скальных массивов (на планах и разрезах): 5 – хорошая скала, 6 – средняя скала, 7 – плохая скала, 8 – очень плохая скала; 9 – точка замеров температуры горного массива: в числителе – средняя температура, °С, за 2022 г. на точке, в знаменателе – амплитуда колебания температур (min...max)

**Fig. 2. NTS-2 with highlighted structural blocks:**

1–4 – rock fracturing modulus in the block: 1 – 1.5–5 fractures per metre (slightly fractured), 2 – 5–10 fractures per metre (moderately fractured), 3 – 10–30 fractures per metre (heavily fractured), 4 – more than 30 fractures per metre (very heavily fractured); 5–8 – rock mass condition class (on plans and sections): 5 – good rock, 6 – average rock, 7 – poor rock, 8 – very poor rock; 9 – rock mass temperature measurement point: numerator – average temperature, °C, for 2022 at the point, denominator – temperature fluctuation amplitude (min...max)

с III на IV и обратно, что связано с различной степенью сгущения систем трещиноватости при однообразной литологической и гидрогеологической ситуации. С ПК9 до ПК10 отмечаются зоны интенсивного расщелачивания [5, 6]

Преобладающая ориентировка трещин с ПК0 по ПК10 – северо-западного направления. Породы в блоке МН-1–МН-2 (см. рис. 2) очень сильно трещиноватые, модуль трещиноватости – более 30 тр/м. Модуль трещиноватости блоков МН-3–МН-10 от 10 до 30 тр/м,

что характеризует породы как сильнотрещиноватые. Встречаются зоны тектонического дробления и катаклаза.

На полевом этапе заполнялись журналы с массовыми замерами трещин по однородным интервалам и общей характеристикой с первичным распределением по системам трещин. Далее, как указывалось выше, выделялись группы по двум критериям: углу падения и азимуту простирания трещин. По углу падения относительно угла наклона ствола



Таблица 3. Журнал структурных блоков МН-1–МН-10 жилы Медвежья НТС-2  
Table 3. Journal of structural blocks MN-1–MN-10 of the Medvezhya NTS-2 vein

Номер блока	Интервал			Общая трещиноватость интервала					
	От, м	До, м	Длина, м	Модуль трещиноватости	Длина качественных отрезков, м	Коэффициент качественных блоков	Минимальное расстояние между трещинами, см	Максимальное расстояние между трещинами, см	Среднее расстояние между трещинами, см
МН-1	0	10	10	31	0,30	30	2	10	6
МН-2	10	25	15	31	0,35	35	1	13	7
МН-3	25	40	15	27	0,58	58	23	20	21,5
МН-4	40	50	10	22	0,48	48	3	13	8
МН-5	50	60	10	20	0,55	55	4	15	9,5
МН-6	60	70	10	20	0,62	62	4	18	11
МН-7	70	80	10	18	0,81	81	5	28	16,5
МН-8	80	90	10	21	0,53	53	2	21	11,5
МН-9	90	100	10	20	0,54	54	1	17	9
МН-10	100	110	10	25	0,46	46	2	20	11



Рис. 3. Фотография структурного блока МН-2 (ПК1–ПК2) жилы Медвежья НТС-2  
Fig. 3. An image of the structural block MN-2 (PC1-PC2) of the Medvezhya NTS-2 vein

выработки выделены три группы устойчивости: устойчивые ( $0...29^\circ$ ), слабоустойчивые ( $30...59^\circ$ ) и неустойчивые ( $60...90^\circ$ ).

При распределении трещин по азимуту простирания относительно азимута простирания выработки трещины подразделены на благоприятные ( $-60...120^\circ$  и  $+60...120^\circ$ ), неблагоприятные ( $-30...59^\circ$  ( $-121...150^\circ$ ))

и  $+30...59^\circ$  ( $+121...150^\circ$ )) и весьма неблагоприятные ( $0...29^\circ$  ( $-151...180^\circ$ ) и  $0...29^\circ$  ( $+151...180^\circ$ )).

Итоговая табл. 4, учитывающая, с одной стороны, угол падения и азимут простирания трещин, с другой – их положение относительно оси выработки, позволяет отнести обследованный горный массив в определен-



ном интервале горной выработки к тому или иному типу устойчивости согласно методики многопараметрической классификации З.Т. Бенявски [5].

После распределения всех замеров трещин в интервале блока МН-1–МН-2 по двум

типам групп составлена сводная таблица распределения массовой трещиноватости и выполнена обработка 100 замеров трещин на выделенном структурном блоке МН-2 с однородными литологическими параметрами (табл. 5).

**Таблица 4. Классификация устойчивости массивов горных пород по методике на основе анализа распределения массовой трещиноватости**

**Table 4. Classification of rock mass stability based on the analysis of mass fracturing distribution**

Наименование класса устойчивости (по углу падения относительно угла наклона ствола выработки) / Наименование подкласса устойчивости (по углу между азимутами простирания выработки и системы трещин)	Благоприятный (-60...120° и +60...120°)	Неблагоприятный (-30...59° и +30...59°) (-121...150° и +121...150°)	Весьма неблагоприятный (0...29° и 0...29°) (-151...180° и +151...180°)
Устойчивый (0...29°)	Ia очень хорошая скала	Iб хорошая скала	Iв хорошая скала
Слабоустойчивый (30...59°)	IIa средняя скала	IIб средняя скала	IIв плохая скала
Неустойчивый (60...90°)	IIIa плохая скала	IIIб очень плохая скала	IIIв очень плохая скала

**Таблица 5. Результаты документации массовых замеров трещин блока МН-2 (ПК1–ПК2)**

**Table 5. Documentation results of mass measurements of MN-2 (PC1–PC2) cracks**

Результаты документации массовых замеров трещин								Данные эмпирио-аналитической обработки								
								Благоприятные			Неблагоприятные			Весьма неблагоприятные		
Номер трещины	Тип трещины	Угол падения	Азимут падения	Генетический тип трещины	Характер поверхности трещины	Мощность заполнителя, см	Заполнитель	устойчивые	слабоустойчивые	неустойчивые	устойчивые	слабоустойчивые	неустойчивые	устойчивые	слабоустойчивые	неустойчивые
1	отк.	45	232	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2	отк.	86	339	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	отк.	22	284	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	0	1	0	0
...	...	...	...	ск.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
90	отк.	63	246	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1	0	0	0
91	отк.	32	68	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	1	0	0	0	0
...	...	...	...	ск.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
98	отк.	79	253	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	1	0	0	0
99	отк.	21	61	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	1	0	0	0	0	0
100	отк.	74	268	ск.	шерх.	0	нет	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Итого								4	7	22	4	16	18	3	14	12
Класс устойчивости								Ia	IIa	IIIa	Iб	IIб	IIIб	Iв	IIв	IIIв

Примечание. Отк. – открытый тип трещин; ск. – трещины скола; шерх. – шероховатые.



Общая характеристика устойчивости массива пород интервала МН-2 дана на основе полученного результата обработки замеров массовой трещиноватости блока МН-2 (табл. 6).

Основанием для отнесения отдельного интервала к какому-либо классу устойчивости служит преодоление 50 % порога в распределении массовых замеров трещин, т. е. полученное распределение трещин в процентном соотношении складывается между собой, начиная от неустойчивого и так до получения 50% и более или в обратном направлении, начиная от устойчивого (табл. 7).

Оба расчета по распределению трещин в процентном соотношении в зависимости от угла и азимута падения по отношению к оси выработки (от неустойчивых к устойчивым или от устойчивых к неустойчивым) показывают сходимость результата отнесения массива пород блока МН-2 к неустойчивому благоприятному.

Согласно расчетам, проведенным выше, 50 % порог был преодолен в графе «неустойчивые – благоприятные», следовательно, данному блоку присваивается класс устойчивости IIIa – плохая скала (см. табл. 4).

По результатам камеральной обработки выполненных замеров трещиноватости в программе Rocscience Dips построены усреднен-

ные круговые диаграммы по сетке Фишера – сферограммы, которые представляют собой графики, изображающие плотности вероятностей направлений ориентировки трещин, учитывающей изображение плотностей вероятностей двух переменных. Этими переменными являлись замеры массовой трещиноватости, определяющие пространственное положение – угол и азимут падения трещины<sup>2,3</sup> [8].

Построенные диаграммы позволяют с достаточной точностью определять углы между конкретными трещинами или системами трещин, пространственную ориентировку линий скрещения трещин, а также анализировать взаимоотношения между трещиноватостью, с одной стороны, и элементами складок, напластованием, разрывными нарушениями, контактами интрузивных массивов, жил, даек, рудных тел и т. п., с другой.

При интерпретации диаграмм необходимо учитывать, что процент максимума той или иной системы фиксирует среднее значение угла и азимута падения трещин данной системы, а размер площадки, занимаемой на диаграмме в изолиниях данной системой трещин, характеризует степень изменчивости ориентировки единичных трещин: чем больше площадка, тем больше дисперсия ориентировки трещин [9–11].

**Таблица 6. Распределение массовой трещиноватости блока МН-2**  
**Table 6. Distribution of MN-2 block mass fracturing**

Характеристика азимута/угла	Благоприятные	Неблагоприятные	Весьма неблагоприятные
Устойчивые	4 (4 %)	4 (4 %)	3 (3 %)
Слабоустойчивые	7 (7 %)	16 (16 %)	14 (14 %)
Неустойчивые	22 (22 %)	18 (18 %)	12 (12 %)

**Таблица 7. Расчет класса блоков по распределению массовых замеров трещиноватости**  
**Table 7. Block class calculation based on the distribution of mass measurements of fracturing**

Характеристика азимута/угла	Благоприятные	Неблагоприятные	Весьма неблагоприятные
Расчет от неустойчивых к слабоустойчивым и устойчивым			
Устойчивые	4 %	4 %	3 %
Слабоустойчивые	7 %	16 %	14 %
<b>Неустойчивые</b>	<b>30 % + 22 % = 52 %</b>	12 % + 18 % = 30 %	12 %
Расчет от устойчивых к слабоустойчивым и неустойчивым			
Устойчивые	7 % + 4 % = 11 %	3 % + 4 % = 7 %	3 %
Слабоустойчивые	11 % + 7 % = 18 %	18 % + 16 % = 34 %	34 % + 14 % = 48 %
<b>Неустойчивые</b>	<b>48 % + 22 % = 70 %</b>	18 %	12 %

<sup>2</sup> Пэк А.В. Трещинная тектоника и структурный анализ / ред. А.Д. Архангельский. М., Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1939. 152 с.

<sup>3</sup> Родыгин А.И. Структурные диаграммы. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1980. 76 с.



Главный максимум трещиноватости приходится на трещины северо-западного простирания, падающие под углом  $70^\circ$  на северо-восток (рис. 4). Второстепенный максимум образован трещинами северо-западного простирания, падающих под углом  $50^\circ$  на юго-запад. Плотность этих трещин относительно невелика. Присутствует еще одна немногочисленная группа трещин северо-западного простирания, отличающаяся северо-восточным азимутом падения и более пологими углами падения (до  $20^\circ$ ).

Основным назначением применения методики анализа массовой трещиноватости является выделение опасных интервалов на фоне всего горного массива. Так, массив горных выработок интервала ПК0–ПК3 характеризуется очень сильной степенью трещиноватости, что должно рассматриваться как сигнал для принятия проектных решений об укреплении горных выработок, а также определения рационального состава и объема полевых работ

для детальной оценки прочностных и деформационных свойств интервала.

Классы устойчивости, рассчитанные на основе методики анализа распределения массовой трещиноватости, применены нами для корректировки классов по методике многопараметрической классификации З.Т. Бенявски, которая дает очень усреднённую картину в силу высокого влияния механического воздействия на породы при проходке ствола выработки и детально описана ранее [5].

Изучение трещиноватости также позволяет обозначить перспективные научные направления изучения закономерностей распространения трещин при ведении взрывных работ и управления взрывами с целью сохранности законтурного массива, который в свою очередь обеспечивает устойчивость горной выработки.

Трещиноватость является определяющей структурно-механической особенностью по-

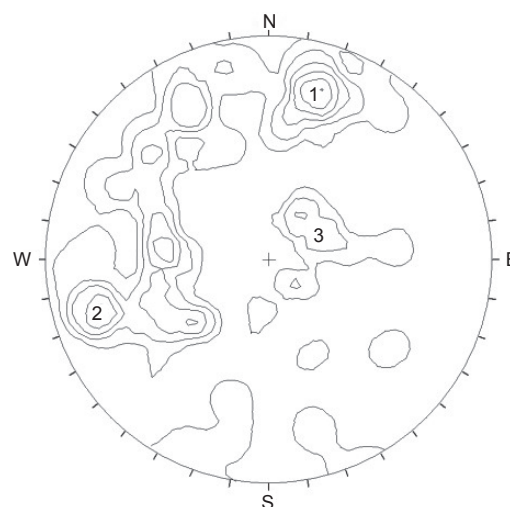
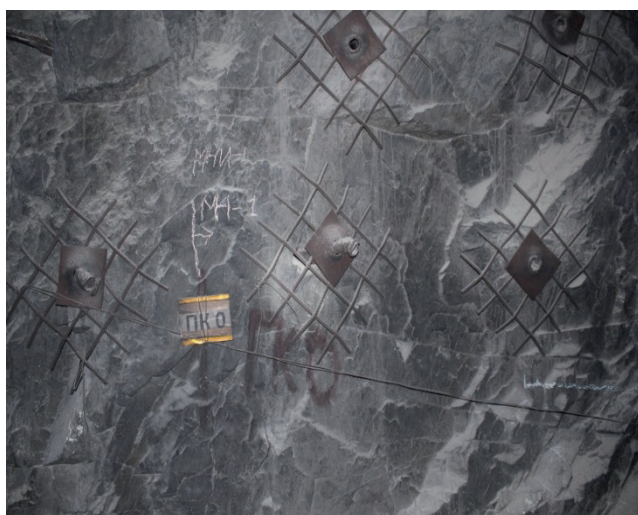


Рис. 4. Фотография структурных блоков МН-1–МН-4 (ПК0–ПК4) и сферограмма ПК0–ПК10  
Fig. 4. An image of MN-1–MN-4 (PC0–PC4) structural blocks and a PC0–PC10 spherogram



родного массива и влияет на качество дробления пород. Согласно статистике, при взрыве на 65–70 % массив разрушается по имеющимся трещинам и только на 25–30% – по вновь образованным<sup>4</sup> [12–17].

Выбор рациональной схемы производства буровзрывных работ основывается, главным образом, на качественной оценке геолого-структурных особенностей разрабатываемого массива, ключевым звеном которой является определение степени трещиноватости и раздробленности пород [18].

Так, снижение выхода негабарита и повышение степени дробления взорванной массы в зависимости от структурного строения массива и направления простирания основных систем трещин без существенного увеличения затрат могут обеспечиваться уменьшением длины взрывного блока, оптимизацией сетки скважин или интервалов времени замедления и порядка, а также таким направлением фронта отбойки, при котором трещины основной системы создают отраженную волну напряжений.

Оконтуривание взрывного блока рядом скважин малого диаметра, повышение удельного расхода взрывчатых веществ за счет сгущения сетки скважин и уменьшение диаметра взрывных скважин потребуют увеличения затрат на буровзрывные работы.

Однако все указанные пути решения проблемы могут иметь место при определенных условиях и ограничениях.

На сегодняшний день вопрос обследования трещиноватости для проведения буровзрывных работ с целью снижения выхода негабарита и влияния на сохранность законтурного массива освещен недостаточно.

В этой связи недостаток детальной информации указывает на актуальность изучения закономерностей распространения трещин для проектирования как процессов проходки горных выработок, так и безопасного ведения собственно добычных работ.

Концепцию оценки состояния массива горных пород для обеспечения устойчивости горных выработок, прогнозирования и управления геомеханическими процессами можно изобразить в виде схемы, отображающей алгоритм действий, основой которой является геомеханический мониторинг, а результатом –

создание базы данных для построения интерактивной карты состояния массива горных пород (рис. 5).

В последнее время для получения точных данных о структуре горного массива все чаще используются технологии лазерного сканирования при помощи ручных сканеров типа LiGrip, обладающие рядом преимуществ: высокой точностью, большой скоростью сбора данных, безопасностью и возможностью детального мониторинга изменений в условиях недостаточного освещения и сложной геометрии выработок. В отличие от традиционных методов измерений лазерное сканирование позволяет собрать информацию о поверхности с высокой точностью и разрешением для построения детализированных 3D-моделей.

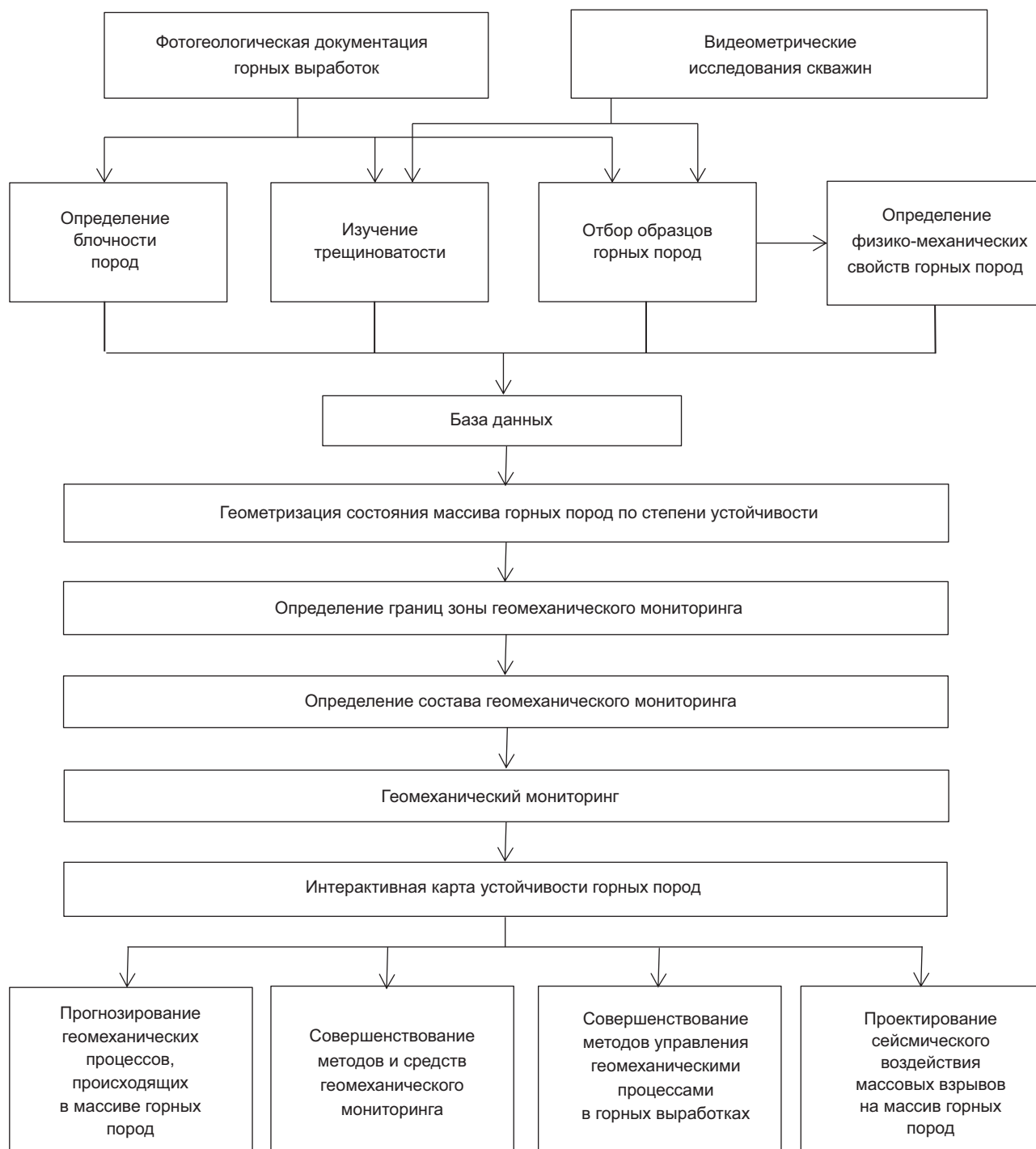
Исследование распространения трещиноватости вглубь массива наравне с изучением в стенках горных выработок также является важным этапом в изучении трещинно-блочной структуры горного массива. Однако изучение керна и применение различных геофизических методов в скважинах не позволяют с достаточной точностью установить позиции плоскостей ослабления массива и их пространственную ориентировку.

Для этих целей в настоящее время все чаще используется фото-видеометрический метод исследования поверхностей стенок скважин посредством скважинных фотоаппаратов и телеметрических устройств, предназначенных для изучения естественной трещиноватости и блочности горных пород в условиях их естественного залегания. Изображение, получаемое с видеокамер скважинного зонда, передается на персональный компьютер, который производит запись видео на жесткий диск и вывод изображения на дисплей, что позволяет установить позицию и ориентировку блокообразующих трещин и оценить размеры блоков горных пород.

Оконтуривание участков пород различной блочности и трещиноватости проводится путем увязки границ интервалов одной категории с учетом данных по изучению керна, геофизических исследований скважин и обследования горных выработок.

Интересны в этом плане результаты исследований по районированию карьерного поля рудника «Железный» ОАО «Ковдор-

<sup>4</sup> Мамбетов Ш.А. Геомеханика: учебник для студентов вузов, аспирантов, преподавателей. В 2 т. Т. 1. Основы геомеханики. Бишкек: Изд-во КPCУ, 2013. 138 с.



**Рис. 5. Методика прогнозирования и управления состоянием массива горных пород**  
**Fig. 5. Rock mass condition forecasting and management methodology**

ский горно-обогатительный комбинат», основанные на применении современных технических средств и дистанционных способов фиксации первичной информации, итогом которых стала карта взрываемости горных пород, позволившая автоматизировать процесс проектирования буровзрывных работ [19–21]. При этом сравнительный анализ данных ручного и дистанционного измерения

блочности пород показал их хорошую сходимость – 92–97 %.

В дальнейшем внедрение дистанционных способов фиксации первичной информации (подземных беспилотных летательных аппаратов и автосканов), оснащенных камерами видеонаблюдения, 3D лазерного сканирования или лидарами, позволит обеспечить создание 3D-моделей планов аварийных



горных выработок без непосредственного присутствия человека в ней [22]. После анализа напряженно-деформированного состояния породного массива в установленных опасных областях смещения пород и их математической обработки будет определена возможность или невозможность восстановления этого участка горной выработки. Данный метод основан на предложенной математической модели, учитывающей значения нормальных компонентов напряжений. В результате, если в данных областях смещений значения нормальных компонентов напряжений не превышают пределы прочности на растяжение горных пород, то горная выработка подлежит восстановлению. Однако на сегодняшний день внедрение этого метода затруднено из-за отсутствия критериев оценки полученной информации, по которой можно было бы судить о возможности восстановления горных выработок.

### Заключение

Созданная на основе полученных материалов документации стенок горных выработок и изучения керна скважин 3D-модель отдельных участков Ирокиндинского месторождения позволяет взаимодействовать с базой данных

по трещиноватости внутри горного массива: строить планы изолиний выбранных значений, создавать погоризонтные планы трещиноватости и блочности пород, формировать выборки данных по различным параметрам, отображать данные в виде графиков и диаграмм, а также визуализировать данные по скважинам и горным выработкам как в двухмерном, так и в трехмерном пространстве.

Для дальнейшей реализации прогнозирования и управления состоянием массива горных пород первичную координатно привязанную информацию, полученную на основании документации стенок горных выработок и изучения керна скважин с отбором монолитов для физико-механических испытаний, необходимо дополнить видеометрическими исследованиями с занесением их в базу данных.

Использование комплексного подхода при проведении геомеханического мониторинга даст возможность повысить точность районирования массива горных пород для решения актуальных производственных задач – прогнозирования геомеханических процессов и совершенствования методов управления ими, а также проектирования взрывных работ с целью снижения выхода негабарита и влияния на сохранность законтурного массива.

### Список источников

1. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 164 с. EDN: TSSIWT.
2. Кузьмин В.С., Копытин А.С. Применение компьютерных технологий для решения задач, связанных с изучением трещиноватости скальных массивов // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2013. № 3. С. 83–92. EDN: RCCTYZ.
3. Чернышев С.Н. Трещиноватость горных пород и ее влияние на устойчивость откосов. М.: Недра, 1984. 111 с.
4. Чернов А.Ю., Бузов С.А. Применение рейтинговых классификаций массивов горных пород на основе принятой системы документации горных выработок // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (г. Пермь, 2–4 апреля 2019 г.). Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2019. Вып. 1. С. 603–608. EDN: ZCOYLR.
5. Матвеева И.В., Шигарова Т.О., Матвеев О.А. Прогноз устойчивости подземных горных выработок Ирокиндинского месторождения на основе сопоставления методик прогнозной оценки состояния массива горных пород // Науки о Земле и недропользование. 2024. Т. 47. № 3. С. 289–301. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.
6. Кузьмин Е.В., Узбекова А.Р. Рейтинговые классификации массивов скальных пород: предпосылки создания, развитие и область применения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 4. С. 201–203. EDN: INTNKV.
7. Бурзунова Ю.П. Трещинные сети в породах тектонически активных регионов: оценка степени хаотичности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 4. С. 45–50. EDN: SBNFHZ.
8. Михайлов А.Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. М.: Госгеолтехиздат, 1956. 132 с.
9. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
10. Кноринг Л.Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Наука, 1969. 87 с.
11. Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 330–343. EDN: IBCKNZ.
12. Васильева Л.А., Жариков С.Н., Кутуев В.А. О влиянии трещиноватости на качество дробления горных пород и на сохранность законтурного массива // Проблемы недропользования. 2022. № 3. С. 66–72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.066>. EDN: STYCFK.



13. Яковлев А.В., Шимкив Е.С. Исследование влияния основных систем трещин в массиве Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» на качество дробления взорванной горной массы // Проблемы недропользования. 2015. № 3. С. 19–25. <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>. EDN: SIGSUI.
14. Яковлев А.В., Панжин А.А., Рождественский В.Н., Пьянзин С.Р., Кочнев К.А. Оценка степени трещиноватости локальных массивов, подлежащих взрывной отбойке // Маркшейдерия и недропользование. 2012. № 5. С. 22–29. EDN: PFQZSF.
15. Рождественский В.Н., Панжин А.А., Пьянзин С.Р., Кочнев К.А. Исследование трещиноватости локальных массивов с помощью средств наземного лазерного сканирования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 5. С. 75–79. EDN: SKIZYT.
16. Адушкин В.В., Спивак А.А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. М.: Недра, 1993. 319 с.
17. Барон Л.И., Личели Г.П. Трещиноватость горных пород при взрывной отбойке. М.: Недра, 1966. 135 с.
18. Овсянников А.Н., Игнатенко И.М., Яницкий Е.Б., Агарков И.Б. Методика оценки блочности горных пород в массиве и в откосах уступов карьера рудника «Железный» Ковдорского ГОКа // Информационная поддержка горной отрасли. Режим доступа: <https://2cad.ru/blog/science/metodika-otsenki-blochnosti-gornyh-porod/> (дата обращения: 08.07.2025).
19. Вознесенский А.С., Набатов В.В., Петерс Ш. Скважинные видеозонды и их использование для задач геотехнологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 9. С. 5–12. EDN: IBZVJZ.
20. Козырев С.А., Власова Е.А., Усачева Е.А. Инженерная методика оперативной оценки сейсмозрывного воздействия на законтурный массив в карьере // Горная промышленность. 2024. № 5. С. 66–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-66-73>. EDN: FXDXTR.
21. Овсянников А.Н., Игнатенко И.М., Дунаев В.А. Районирование карьерного поля по взрываемости горных пород (на примере рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК») // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2015. Выпуск 32. № 15. С. 172–177. EDN: VAWIET.
22. Левкин Ю.М. Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // Уголь. 2022. № 6. С. 32–34. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>. EDN: WJALGJ.

#### References

1. Rats M.V., Chernyshev S.N. *Fracture and properties of fractured rocks*. Moscow: Nedra; 1970, 164 p. EDN: TSSIWT. (In Russ.).
2. Kuzmin V.S., Kopytin A.S. Computer technologies application for the solution of the tasks of rocks fracturing investigation. *RUDN Journal of ecology and life safety*. 2013;3:83-92. (In Russ.). EDN: RCCTYZ.
3. Chernyshev S.N. *Rock fracturing and its influence on slope stability*. Moscow: Nedra; 1984, 111 p. (In Russ.).
4. Chernov A.Y., Buzov S.A. Application of rating classifications of rock massifs based on the generally accepted system of mine working documentation. In: *Sergeevskie chteniya: materialy godichnoi sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoi geologii i gidrogeologii = Sergeev Readings: Proceedings of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. 2–4 April 2019, Perm. Perm: Perm State University; 2019, vol. 1, p. 603-608. (In Russ.). EDN: ZCOYLR.
5. Matveeva I.V., Shigarova T.O., Matveev O.A. Forecasting stability of Irokinda deposit underground mine workings based on comparison of rock mass state prediction estimate methods. *Earth sciences and subsoil use*. 2024;47(3):289-301. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2024-47-3-289-301>. EDN: VOUMMB.
6. Kuzmin E.V., Uzbekova A.R. Rating classifications of rock massifs: creation background, development and application scope. *Mining information and analytical bulletin*. 2004;4:201-202. (In Russ.). EDN: INTNKV.
7. Burzunova Yu.P. Joint systems in rocks of active tectonic regions: irregularity degree estimation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2014;4:45-49. (In Russ.). EDN: SBNFHZ.
8. Mikhailov A.E. *Field methods of studying rock cracks*. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1956, 132 p. (In Russ.).
9. Gzovsky M.V. *Fundamentals of tectonophysics*. Moscow: Nauka; 1975, 536 p. (In Russ.).
10. Knoring L.D. *Mathematical methods in studying the mechanism of tectonic fracturing formation*. Leningrad: Nauka; 1969, 87 p. (In Russ.).
11. Seminsky K.Zh., Burzunova Yu.P. Interpretation of chaotic jointing near fault planes: a new approach. *Russian Geology and Geophysics*. 2007;48(3):330-343. (In Russ.). EDN: IBCKNZ.
12. Vasilyeva L.A., Zharikov S.N., Kutuev V.A. On the effect of fracturing on the quality of rock crushing and on the safety of the out-contour rock mass. *Problems of Subsoil Use*. 2022;3:66-72. (In Russ.). <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.066>. EDN: STYCFK.
13. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S. Studying the main cracks systems influence in rock mass of the “EVRAZ KGOK” northern open pit on the quality of blasted rock mass crushing. *Problems of Subsoil Use*. 2015;3:19-25. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2015.03.019>. EDN: SIGSUI.
14. Yakovlev A.V., Panzhin A.A., Rozhdestvenskii V.N., P'yanzin S.R., Kochnev K.A. Assessment of the degree of jointing of the blastable local rock masses. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2012;5:22-29. (In Russ.). EDN: PFQZSF.
15. Rozhdestvenskii V.N., Panzhin A.A., Pyanzin S.R., Kochnev K.A. Study of fracturing of local masses by using the ground laser scanning. *Minerals and Mining Engineering*. 2014;5:75-79. (In Russ.). EDN: SKIZYT.



16. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Geomechanics of large-scale explosions*. Moscow: Nedra; 1993, 319 p. (In Russ.).
17. Baron L.I., Licheli G.P. *Rock fracturing during blasting*. Moscow: Nedra; 1966, 135 p. (In Russ.).
18. Ovsyannikov A.N., Ignatenko I.M., Yanitsky E.B., Agarkov I.B. Methodology for assessing the block structure of rock massifs and bench slopes in the Zhelezny Mine of the Kovdor Mining and Processing Plant. *Information support for the mining industry*. Available from: <https://2cad.ru/blog/science/metodika-otsenki-blochnosti-gornyh-porod/> [Accessed 8<sup>th</sup> July 2025]. (In Russ.).
19. Voznesensky A.S., Nabatov V.V., Peters Sh. Borehole video probes and their use for geotechnological tasks. *Mining information and analytical bulletin*. 2007;9:5-12. (In Russ.).
20. Kozyrev S.A., Vlasova E.A., Usachev E.A. Engineering methodology for operative assessment of seismic blast impact in the boundary rock mass in open pits. *Russian Mining Industry*. 2024;5:66-73. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-66-73>. EDN: FXDXTR.
21. Ovsyannikov A.N., Ignatenko I.M., Dunaev V.A. Methods of zoning of quarry field in explosiveness of rocks (on example mine "Zhelezny" of OJSC "Kovdorsky GOK"). *Belgorod State University Scientific Bulletin Natural Sciences*. 2015;32(15):172-177. (In Russ.). EDN: VAWIET.
22. Levkin Yu.M. The usage of remote sensing technology and mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Coal*. 2022;6:32-34. (In Russ.). <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-32-34>. EDN: WJALGJ.

### Информация об авторах / Information about the authors



**Матвеева Ирина Викторовна,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
заместитель руководителя департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

✉ [matveeva.i.2010@mail.ru](mailto:matveeva.i.2010@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>

**Irina V. Matveeva,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Deputy Head of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,

✉ [matveeva.i.2010@mail.ru](mailto:matveeva.i.2010@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0000-8621-5560>



**Бузов Сергей Анатольевич,**

ведущий инженер департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

[buzov.srg@gmail.com](mailto:buzov.srg@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0006-2771-315X>

**Sergey A. Buzov,**

Leading Engineer of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,

[buzov.serg@gmail.com](mailto:buzov.serg@gmail.com)

<https://orcid.org/0009-0006-2771-315X>



**Матвеев Олег Александрович,**

ведущий инженер департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,

[matveev\\_oleg68@mail.ru](mailto:matveev_oleg68@mail.ru)

<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>



**Oleg A. Matveev,**

Leading Engineer of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
matveev\_oleg68@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-8053-0782>



**Шигарова Татьяна Олеговна,**

инженер департамента инженерной геологии,  
институт «Сибирская школа геонаук»,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
shigarova@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>

**Tatiana O. Shigarova,**

Engineer of the Department of Engineering Geology,  
Siberian School of Geosciences,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
shigarova@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0008-5305-0251>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

И.В. Матвеева – научное руководство, проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

С.А. Бузов – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

О.А. Матвеев – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Т.О. Шигарова – проведение исследования, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Irina V. Matveeva – supervision, investigation, writing – original draft, writing – editing.

Sergey A. Buzov – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Oleg A. Matveev – investigation, writing – original draft, writing – editing.

Tatiana O. Shigarova – investigation, writing – original draft, writing – editing.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 10.09.2025; принята к публикации 23.09.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 10.09.2025; accepted for publication 23.09.2025.



Научная статья

УДК 553.41(571.65):549.282+549.283

EDN: GGJTТK

DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364



## Золотосодержащее серебро и самородное золото золото-серебряного месторождения Дукат

Н.С. Павлюк<sup>a,✉</sup>, А.С. Макшаков<sup>b</sup>, Р.Г. Кравцова<sup>c</sup><sup>a-c</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия<sup>a</sup>Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, Иркутск, Россия

**Резюме.** Целью данного исследования являлось изучение типохимизма золотосодержащих минералов ряда серебро – золото на золото-серебряном месторождении Дукат (Северо-Восток России). В работе были использованы методы оптической микроскопии и рентгеноспектрального микрозондового анализа. Минералы отбирались из самых распространенных на месторождении золото-серебряных руд, имеющих преимущественно серебряный состав. Установлено, что они представлены главным образом золотосодержащим самородным серебром и кустелитом. Значительно реже встречается электрум пониженной пробыности. Пробность золотосодержащего серебра варьирует в диапазоне 10–99 ‰ (в среднем 51 ‰), кустелита – 101–245 ‰ (в среднем 149 ‰). Изученные выделения электрума имеют низкую пробыность – от 274 до 438 ‰ (в среднем 357 ‰). В примесном составе выявлены следующие закономерности. Для золотосодержащего серебра характерно максимальное количество элементов-примесей: кроме золота это теллур, медь, сурьма, ртуть, свинец и железо; в единичных точках обнаружены селен, сера и висмут. Суммарное содержание всех примесей (без учета золота) также является максимальным – до 1,35 масс. %. В кустелите количество примесей несколько снижается: теллур, ртуть, сурьма, медь и свинец; в единичных точках отмечены висмут и селен. Сумма всех примесей составляет менее 1,23 масс. %. Минимальное количество примесных элементов содержит электрум: теллур, ртуть, медь и висмут; реже – мышьяк и селен. Сумма элементов-примесей не превышает 0,67 масс. %. Элементный состав примесей и уровень их концентраций в изученных нами интерметаллидах в целом отражают геохимические особенности золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, которые преобладают на верхне-среднерудных интервалах месторождения Дукат. В практическом отношении выявленные особенности типохимизма могут быть использованы в процессе поисковых работ для установления рудно-формационной принадлежности выявленной минерализации, а также служить дополнительным критерием при оценке уровня эрозионного среза рудных зон и прогнозировании оруденения на глубину.

**Ключевые слова:** серебро, золото, типохимизм, пробыность, элементы-примеси, руды, месторождение Дукат

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания (проект № 0284-2021-0002) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия).

**Для цитирования:** Павлюк Н.С., Макшаков А.С., Кравцова Р.Г. Золотосодержащее серебро и самородное золото золото-серебряного месторождения Дукат // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 350–364. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364>. EDN: GGJTТK.

### Original article

## Gold-bearing silver and native gold of the Dukat gold-silver deposit

Natalia S. Pavlyuk<sup>a,✉</sup>, Artem S. Makshakov<sup>b</sup>, Raisa G. Kravtsova<sup>c</sup><sup>a-c</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia<sup>a</sup>Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The purpose of the study was to investigate the typochemistry of gold-bearing minerals of the silver-gold series at the Dukat gold-silver deposit (northeast Russia). The methods of optical microscopy and X-ray spectral microprobe analysis were used in the research. The minerals were selected from the most common gold-silver ores at the deposit, which have a predominantly silver composition. It was found out that they are represented mainly by gold-bearing native silver and kustelite. Electrum of low fineness is much less common. The fineness of gold-bearing silver varies in the range of 10–99 ‰ (on average 51 ‰), kustelite – in the range of 101–245 ‰ (on average 149 ‰). The studied electrum separations have low fineness – from 274 to 438 ‰ (on average 357 ‰). The following patterns were revealed in the impurity composition. Gold-bearing silver is characterized by the maximum amount of impurity elements: in addition to gold, these are tellurium, copper, antimony, mercury, lead and iron; selenium, sulfur and bismuth were found in some isolated spots. The

© Павлюк Н.С., Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., 2025



total content of all impurities (excluding gold) is also maximum – up to 1.35 wt. %. Kustelite has a slightly lower amount of impurities: tellurium, mercury, antimony, copper and lead; bismuth and selenium are noted in isolated spots. The sum of all impurities is less than 1.23 wt. %. Electrum contains the minimum amount of impurity elements: tellurium, mercury, copper and bismuth; less often it also contains arsenic and selenium. The sum of impurity elements does not exceed 0.67 wt. %. The elemental composition of the impurities and their concentration levels in the studied intermetallic compounds generally reflect the geochemical features of gold-silver ores, predominantly silver in composition, which predominate in the upper-medium ore intervals of the Dukat deposit. The identified typochemical features can be used in exploration to determine the ore-formational identity of the discovered mineralization, and also serve as an additional criterion for assessing the erosional truncation of ore zones and predicting mineralization in depth.

**Keywords:** silver, gold, typochemistry, fineness, impurity elements, ores, Dukat deposit

**Funding:** The work was carried out under the state assignment (project no. 0284-2021-0002) using the scientific equipment from the Center for Shared Use “Isotope-Geochemical Research” of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Pavlyuk N.S., Makshakov A.S., Kravtsova R.G. Gold-bearing silver and native gold of the Dukat gold-silver deposit. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):350-364. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-350-364>. EDN: GGJTTK.

## Введение

Золото-серебряное месторождение Дукат по запасам серебра является одним из крупнейших в мире. В нем сосредоточено до 17 тыс. т этого металла и до 40 т золота [1, 2]. Месторождение находится на территории Омсукчанского рудного района Магаданской области (Северо-Восток России). В структурном отношении оно расположено во внешней золото-серебряной зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, в центральной части Балыгычано-Сугойского прогиба. Геологическое строение, минералогия и геохимия этого месторождения – серебрянорудного гиганта – изучались многими исследователями [1, 3–18 и др.] и наиболее подробно рассмотрены в монографиях [19, 20].

Этот уникальный рудный объект имеет длительную и сложную историю развития. В его формировании выделяются два этапа: ранний вулканогенный (обусловленный становлением экстрозивно-купольного сооружения в раннем мелу) и поздний плутоногенный (связанный с внедрением плутона лейкогранитов в позднем мелу) [19]. Основная часть рудной минерализации образована на позднем этапе и сосредоточена в раннемеловых риолитах, риодацитах и их игнимбритах. Реювенированные под влиянием гранитоидной интрузии рудные тела [8] представлены главным образом жилами и жильными зонами. Они имеют полихронный и полистадийный характер развития. По доминирующему вещественному составу выделяются несколько их типов [20]. На верхне-среднерудных горизонтах месторождения широко развиты золото-серебряные руды преимущественно серебряного состава, представленные в основном кварц-родонитовыми, реже кварц-пирролизит-родохрозитовыми жилами

и прожилками. Их характерная особенность – существенное преобладание содержания серебра над золотом более чем в 500–1000 раз. На среднерудных горизонтах появляются реювенированные золото-серебряные руды в жилах кварц-полевошпат-родонитового состава. На нижнерудных горизонтах преобладают золото-серебро-полиметаллические жильные зоны кварц-родонит-сульфидного состава с хлоритом. Все типы продуктивной рудной минерализации в той или иной степени совмещены в пространстве и имеют смешанный (полиформационный) состав. Первичные догранитные нерееювенированные золото-серебряные руды, сформировавшиеся на раннем этапе и относящиеся к типичной эпиптермальной вулканогенной золото-серебряной формации, сохранились лишь в виде реликтов на отдельных участках, в основном на флангах месторождения. Представлены они жилами кварц-адулярового состава с хлоритом.

К главным минералам золота на месторождении относятся золотосодержащее самородное серебро, кустелит и электрум. Крайне редко отмечается собственно самородное золото. Главными минералами серебра являются самородное серебро и акантит, реже встречаются пираргирит, штернбергит, прустит, полибазит, стефанит. Среди остальных рудных минералов распространены галенит, сфалерит, халькопирит, пирит, пирротин. Всего в рудах установлено более 150 минералов, включая гипергенные. В геохимическом составе золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава главным элементом является серебро; преобладают также сурьма, мышьяк, золото; встречаются свинец, медь, ртуть, теллур (иногда висмут). В золото-серебряных ру-



дах главные элементы – золото и серебро; распространены мышьяк, сурьма, ртуть; реже – свинец, медь, селен (иногда висмут). В составе золото-серебро-полиметаллических руд в основном преобладают серебро, свинец, цинк; распространены медь, мышьяк, сурьма, золото; реже – ртуть (иногда висмут). В сохранившихся реликтовых золото-серебряных рудах в основном присутствуют золото и серебро; распространены мышьяк, сурьма и ртуть.

Ранее при исследовании минералов ряда серебро – золото на этом месторождении основное внимание уделялось преимущественно изучению самородного серебра, а именно его типоморфным особенностям, включая размерность и морфологию его выделений, внутреннюю структуру, минеральные сростания [1, 17, 19]. В то же время данные по изучению золотосодержащих фаз указанного ряда (золотосодержащее самородное серебро, кюстелит, электрум, собственно самородное золото) практически отсутствуют. В первую очередь это касается типохимизма этих минералов несмотря на то, что изучение особенностей их основного и примесного состава имеет немаловажное значение как с теоретической, так и с практической точки зрения [21–48 и др.]. Первые результаты, полученные нами при изучении типохимизма золото-серебряных частиц в самых распространенных на Дукатском месторождении рудах преимущественно серебряного состава, подтверждают важность выбранного направления исследований.

### Материалы и методы исследования

Для изучения химического состава золото-серебряных частиц в рудах преимущественно серебряного состава нами по карьерам и штольням были отобраны большеобъемные минералого-геохимические пробы. Опробовались в основном кварц-родонитовые и кварц-пиролюзитовые жилы и зоны прожилкования с верхне-среднерудных горизонтов месторождения. Далее все пробы были проанализированы на широкий круг элементов, изучен их вещественный состав и на основании полученной информации подобраны пробы с целью дальнейшего изучения в них самородных серебра и золота. Из выбранных проб были выделены тяжелые фракции, содержащие се-

ребряные и золото-серебряные частицы, которые затем были вмонтированы в брикетные аншлифы-шайбы и изучены методами оптической микроскопии и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа (РСМА).

Поиск и предварительное изучение золото-серебряных минералов было начато нами с помощью приборов оптической микроскопии (бинокляр, рудные микроскопы Микромед Полар 3 и Nikon Eclipse LV100 POL), оснащенных цифровыми видеоокулярами, и продолжено методом РСМА на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония) по методикам [49, 50]. Проведение РСМА осуществлялось аналитиком Л.А. Павловой в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук, (г. Иркутск, Россия). Были использованы волновые и энергодисперсионные спектрометры при следующих условиях анализа: ускоряющее напряжение – 20 кВ, ток зонда – 20 нА, минимальный диаметр зонда – 1 мкм, экспозиция набора спектров 30–60 с. С целью исключения возможного захвата элементов из окружающих фаз при количественных определениях элементов-примесей анализировались зерна размером 3–5 мкм и более.

Характеризуя в дальнейшем золото-серебряные интерметаллиды, мы использовали определенную терминологию, которая принята нами с учетом работ других авторов, классифицирующих минералы ряда серебро – золото по их основному составу – пробности<sup>1</sup> [21, 22, 51–53]: самородное серебро (менее 10 ‰), золотосодержащее самородное серебро (10–100 ‰), кюстелит (100–250 ‰), электрум (250–700 ‰), самородное золото (более 700 ‰).

### Результаты исследования и их обсуждение

Полученные нами первые данные показали, что в золото-серебряных рудах преимущественно серебряного состава минералы ряда серебро – золото имеют в основном желтовато-серебристый цвет и неровную, бугорчатую, местами шероховатую поверхность. Они образуют выделения самой разнообразной формы: комковатые, округлые, изометричные, дендритовидные, уплощенные. Часто встречаются весьма сложные комбинации нескольких морфологических форм. Размеры зерен изменяются от тонкодисперсных (менее 10 мкм)

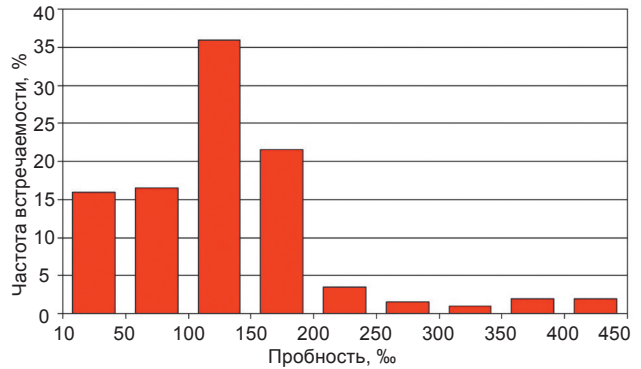
<sup>1</sup> Лодейщиков В.В., Васильева А.В. Методические рекомендации по типизации руд, технологическому опробованию и картированию коренных месторождений золота. Иркутск: Изд-во ОАО «Иргиредмет», 1997. 164 с.



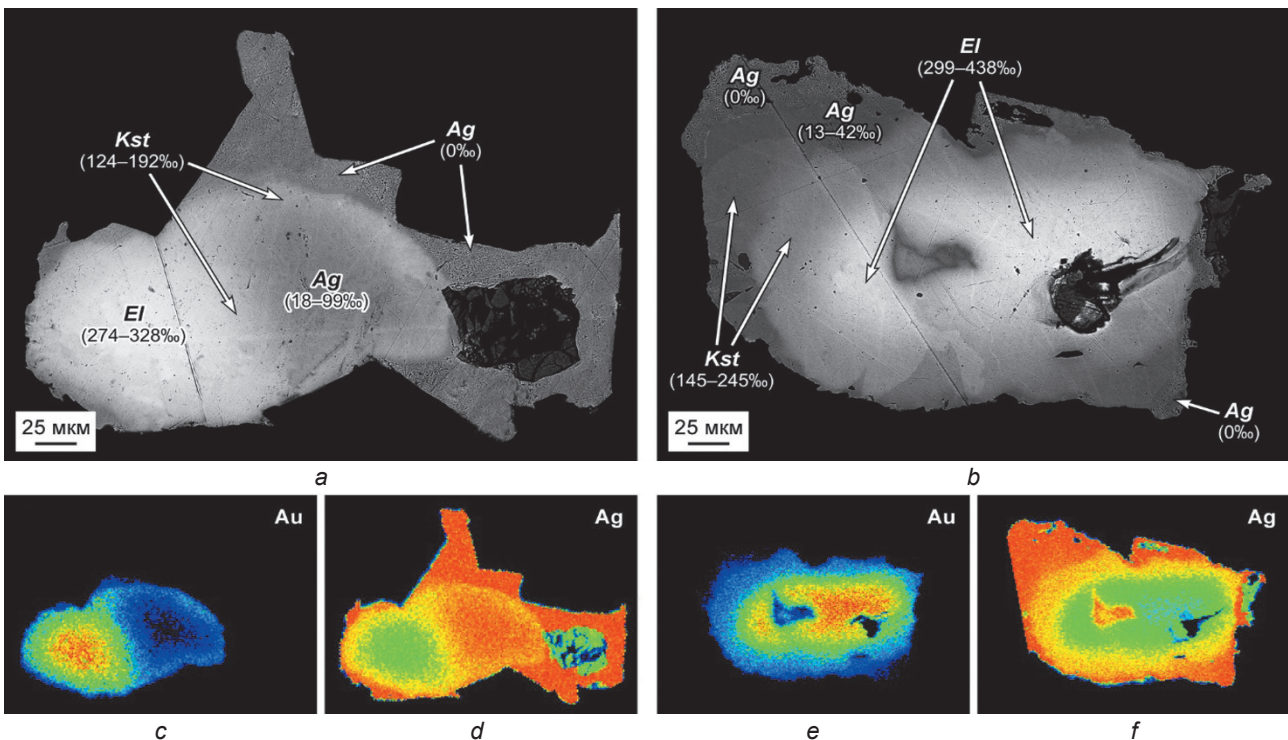
до мелких (10–100 мкм). Более крупные частицы (более 100 мкм) встречается редко.

Изучение основного состава зерен с помощью метода РСМА показало, что они имеют низкую пробность и представлены рядом интерметаллидов: золотосодержащее самородное серебро – кюстелит – электрум пониженной пробности. Первые два преобладают. На их долю приходится до 93 % от всех золото-серебряных интерметаллидов (рис. 1). В большинстве случаев зерна имеют крайне неоднородный основной состав и часто состоят из всех членов указанного выше ряда (рис. 2). Зерна, состоящие преимущественно из одной фазы, редки и представлены кюстелитом (рис. 3). Наибольшее распространение имеет ассоциация самородное серебро (в т. ч. золотосодержащее) – кюстелит (рис. 4, 5). Крупные выделения имеют пятнистые, мозаично-блоковые и зональные структуры, обусловленные их различной пробностью в пределах одного зерна (см. рис. 2, 4, 5). Встречаются зерна, в которых наблюдаются комбинации одновременно нескольких структур. Для округлых и изометричных зерен часто характерно зональное строение. Их ядра являются более высокопробными и по составу соответ-

ствуют кюстелиту (см. рис. 5), реже – электрму пониженной пробности (см. рис. 2, а). Периферические зоны у таких зерен представлены самородным серебром (рис. 2, а, рис. 5), в том числе золотосодержащим (рис. 2, а). Электрум не образует самостоятельных зерен и входит в состав более низкопробных частиц, обрастая кюстелитом и самородным серебром (см. рис. 2).



**Рис. 1. Гистограмма пробности золото-серебряных частиц из руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукал (количество замеров – 200)**  
**Fig. 1. Fineness histogram of gold-silver particles from ores of predominantly silver composition, Dukat deposit (number of measurements – 200)**



**Рис. 2. Неоднородность основного состава золото-серебряных частиц:**

изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б),

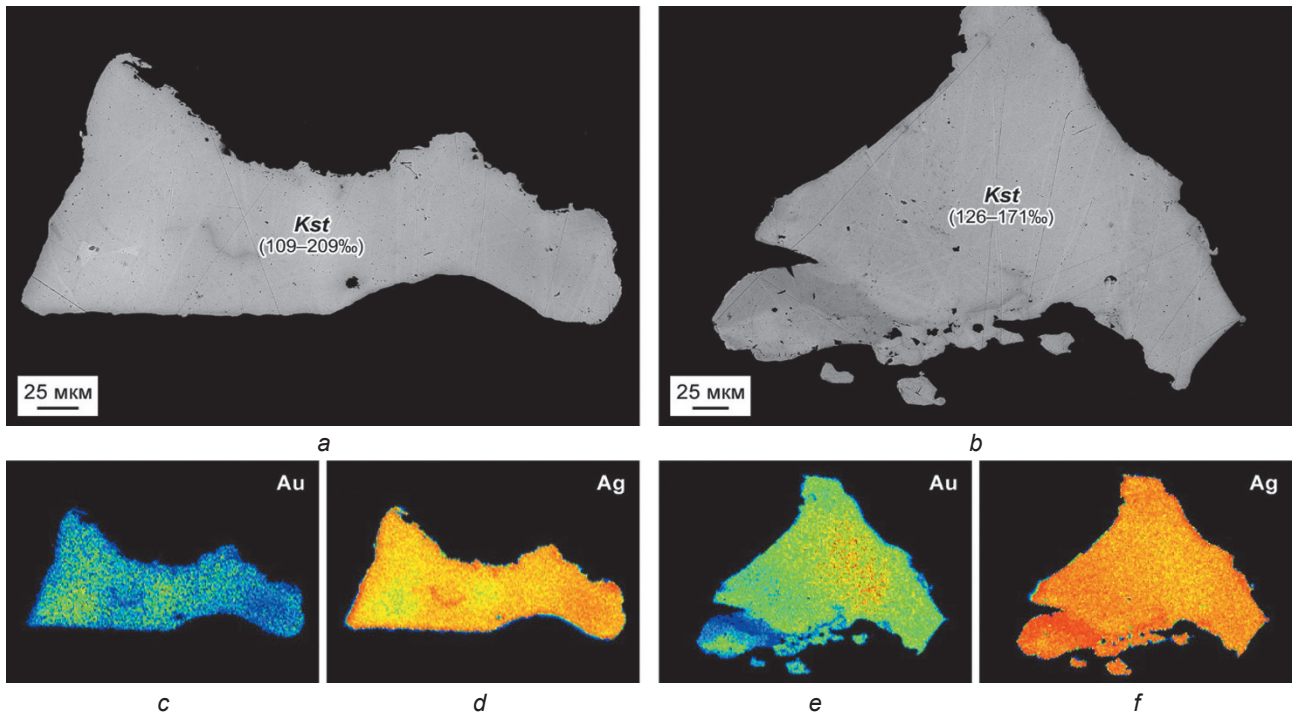
в рентгеновских лучах золота (с, е) и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

EI – электрум пониженной пробности; Kst – кюстелит; Ag – самородное серебро (в скобках указана пробность)

**Fig. 2. Heterogeneity of the basic composition of gold-silver particles:**

images are given in backscattered electrons (d, f)

EI – low-fineness electrum; Kst – kustelite; Ag – native silver (fineness is given in parentheses)



**Рис. 3. Зерна кюстелита:**

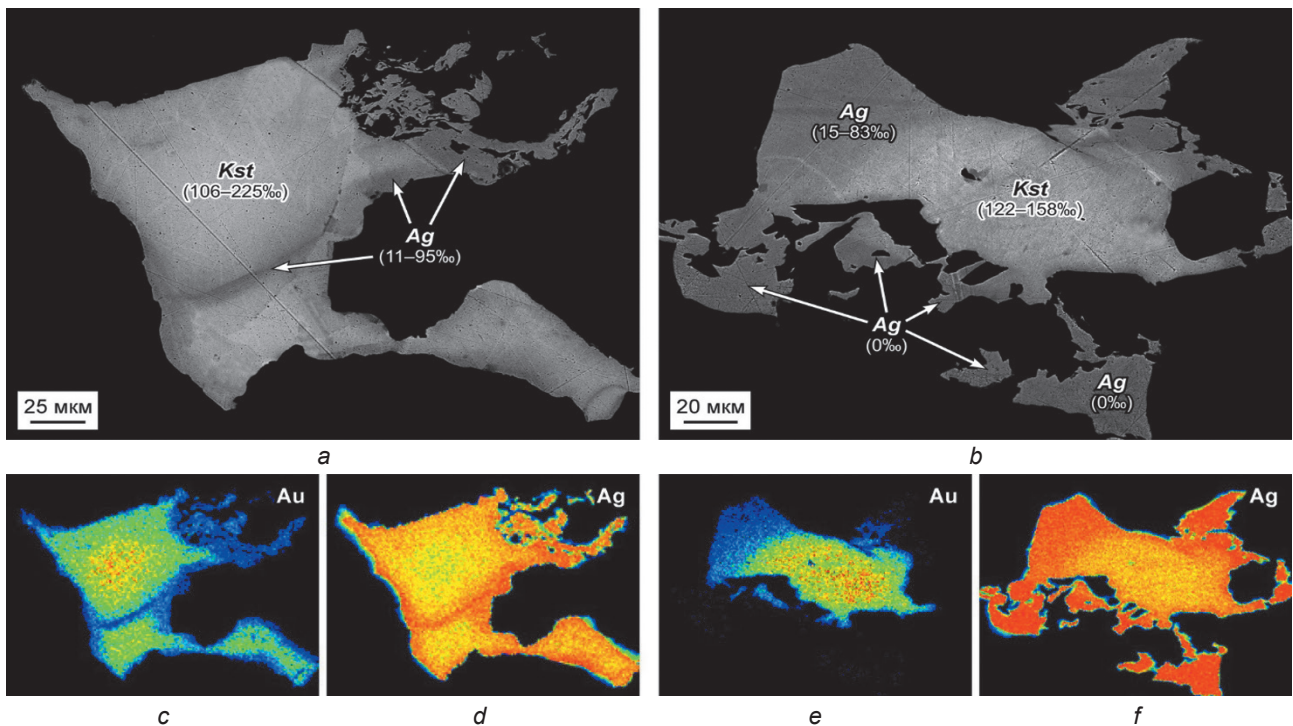
изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е)  
и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

*Kst* – кюстелит (в скобках указана прощность)

**Fig. 3. Kustelite grains:**

images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)

*Kst* – kustelite (fineness is given in parentheses)



**Рис. 4. Зерна состава кюстелит – самородное серебро:**

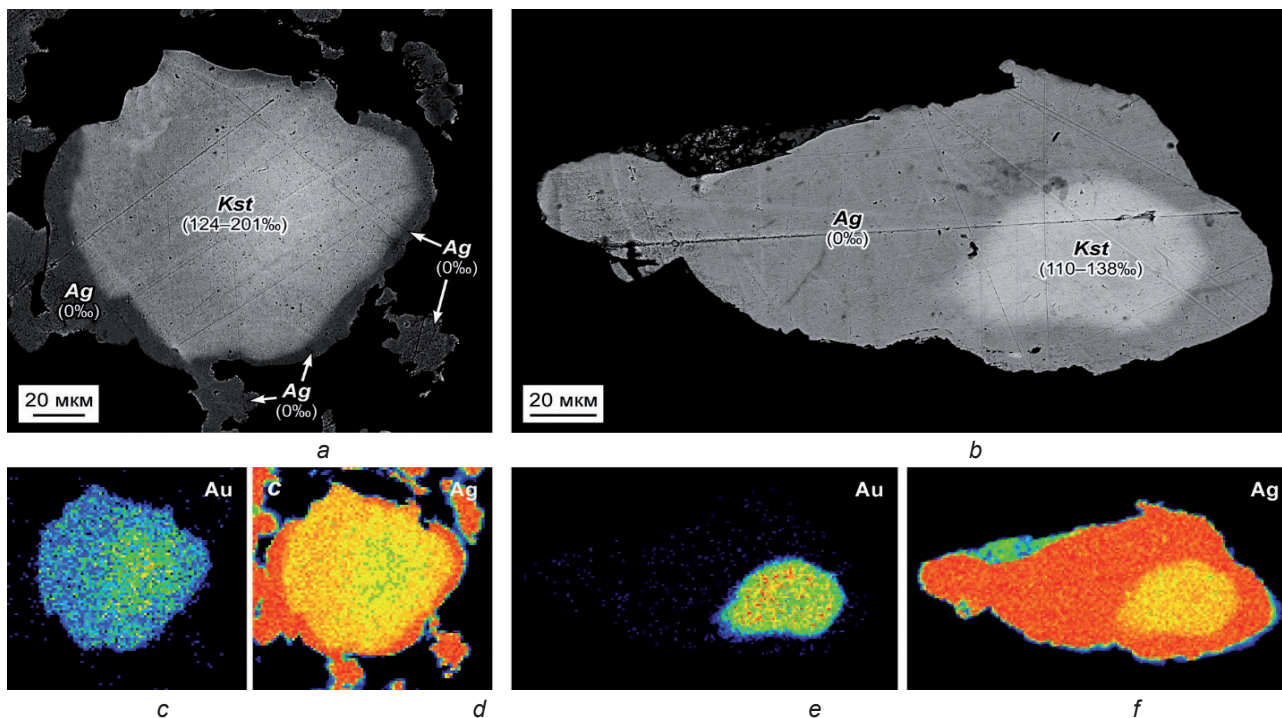
изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е)  
и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

*Kst* – кюстелит; *Ag* – самородное серебро (в скобках указана прощность)

**Fig. 4. Grains consisting of kustelite and native silver:**

images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)

*Kst* – kustelite; *Ag* – native silver (fineness is given in parentheses)



**Рис. 5. Зональные зерна, состоящие из кустелита и самородного серебра:**  
изображения даны в обратно рассеянных электронах (а, б), в рентгеновских лучах золота (с, е)  
и в рентгеновских лучах серебра (д, ф)

*Kst* – кустелит; *Ag* – самородное серебро (в скобках указана пробыность)

**Fig. 5. Zoned grains consisting of kustelite and native silver:**

*images are given in backscattered electrons (a, b), in gold X-ray images (c, e) and in silver X-ray images (d, f)*

*Kst* – kustelite; *Ag* – native silver (fineness is given in parentheses)

Пробыность золотосодержащего серебра варьируют в диапазоне 10–99 ‰ (в среднем 51 ‰). В качестве постоянной примеси оно содержит теллур (0,11–0,31 масс. %, в среднем 0,19 масс. %). Очень часто отмечаются (в масс. %) медь (0,11–0,96, в среднем 0,28), сурьма (0,10–0,61, в среднем 0,24) и ртуть (0,10–0,54, в среднем 0,22); реже – свинец (0,14–0,26, в среднем 0,20) и железо (0,14–0,35, в среднем 0,22). В единичных точках установлены (в масс. %) селен (0,12; 0,24), сера (0,39) и висмут (0,13). Сумма всех примесей (без учета золота) достигает 1,35 масс. % (табл. 1).

Пробыность кустелита колеблется в интервале от 101 до 245 ‰ (в среднем 149 ‰). Также как в золотосодержащем самородном серебре, в кустелите постоянно отмечается примесь теллура (0,10–0,26 масс. %, в среднем 0,17 масс. %). В то же время возрастает частота встречаемости ртути и ее максимальных содержаний. Она отмечена в каждом изученном нами выделении кустелита, где ее содержания колеблются в интервале 0,10–0,97 масс. % (в среднем 0,35 масс. %). Из других примесей часто встречаются (в масс. %) сурьма (0,10–0,39, в сред-

нем 0,20) и медь (0,10–0,35, в среднем 0,16); крайне редко – свинец (0,13–0,27, в среднем 0,18), в единичных точках – висмут (0,29) и селен (0,20). Сумма всех примесей не превышает 1,23 масс. % (табл. 2).

Изученные выделения электрума имеют низкую пробыность – от 274 до 438 ‰ (в среднем 357 ‰). В отличие от золотосодержащего серебра и кустелита его примесный состав более беден. В качестве примеси присутствуют (в масс. %) теллур (0,12–0,20, в среднем 0,15), ртуть (0,17–0,37, в среднем 0,25), медь (0,12–0,20, в среднем 0,16) и висмут (0,33–0,41, в среднем 0,36). Реже встречаются (в масс. %) мышьяк (0,18–0,20, в среднем 0,19) и селен (0,15–0,17, в среднем 0,16). Сумма всех примесей редко доходит до 0,67 масс. % (табл. 3).

Таким образом, на месторождении Дукал в рудах преимущественно серебряного состава главными золото-серебряными минералами являются золотосодержащее самородное серебро и кустелит. Электрум пониженной пробыности встречается реже. Для золотосодержащего серебра характерно максимальное количество примесей (среднее в масс. %):



**Таблица 1. Состав золотосодержащего серебра из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат**  
**Table 1. Composition of gold-bearing silver from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit**

n	N	Проб., %	Содержание, масс. %												
			Au	Ag	Te	Cu	Hg	Sb	Pb	Fe	Se	S	Bi	Σ	Σ <sub>прим</sub>
1	1	95	9,48	90,69	–	0,11	0,16	0,42	–	–	–	–	–	100,86	0,69
2		45	4,45	95,44	0,19	–	–	0,10	–	–	–	–	–	100,18	0,29
3		90	9,04	91,28	0,11	–	0,10	0,19	–	–	–	–	–	100,72	0,40
4		57	5,71	95,28	–	0,13	0,29	0,11	–	–	–	–	–	101,52	0,53
5	2	99	9,95	90,65	0,19	–	0,17	0,13	–	–	–	–	–	101,09	0,49
6		90	8,92	90,01	0,25	–	–	–	0,14	–	–	–	0,13	99,45	0,52
7		53	5,29	95,01	–	–	0,29	0,28	0,16	–	0,12	–	–	101,15	0,85
8		18	1,84	97,98	–	–	0,54	0,61	–	–	–	–	–	100,97	1,15
9	3	13	1,31	98,07	–	–	–	0,15	0,24	–	–	–	–	99,77	0,39
10		23	2,27	97,50	0,17	–	–	0,15	–	–	–	–	–	100,09	0,32
11		42	4,19	95,07	0,31	–	–	–	–	–	–	–	–	99,57	0,31
12	4	70	6,97	91,95	0,14	–	–	–	–	–	–	–	–	99,06	0,14
13		95	9,50	90,27	0,24	–	0,14	–	–	–	–	–	–	100,15	0,38
14		11	1,07	98,34	0,20	0,14	0,20	–	–	–	–	–	–	99,95	0,54
15		52	5,18	94,10	0,25	–	–	–	0,26	0,21	0,24	0,39	–	100,63	1,35
16	5	29	2,85	96,51	0,22	0,24	–	–	–	0,14	–	–	–	99,96	0,60
17		56	5,65	94,52	0,18	0,15	–	–	–	0,35	–	–	–	100,85	0,68
18		83	8,28	91,60	–	–	0,27	0,14	–	–	–	–	–	100,29	0,41
19		56	5,63	94,32	0,20	0,16	0,25	–	–	–	–	–	–	100,56	0,61
20	6	10	1,03	98,03	0,25	0,82	–	–	–	–	–	–	–	100,13	1,07
21		52	5,14	93,32	0,23	0,57	0,26	–	–	–	–	–	–	99,52	1,06
22		34	3,31	95,36	–	0,96	–	–	–	–	–	–	–	99,63	0,96

*Примечание.* Цинк, мышьяк, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %). Здесь и в табл. 2, 3: n – точки определения состава; N – номера зерен; проб. – пробность; Σ<sub>прим</sub> – сумма примесей. Результаты получены посредством микроанализатора Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd., Япония) аналитиком Л.А. Павловой в Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск, Россия). Измерения интенсивностей выполнены с помощью волновых спектрометров; расчеты концентраций проведены на базе программного обеспечения прибора.

кроме золота это теллур (0,19), медь (0,28), сурьма (0,24), ртуть (0,22), свинец (0,20) и железо (0,22). В единичных точках обнаружены селен, сера и висмут. Суммарное содержание всех примесей (без учета золота) также является максимальным – до 1,35 масс. %. В кюстелите количество примесей несколько снижается (среднее в масс. %): теллур (0,17), ртуть (0,35), сурьма (0,20), медь (0,16) и свинец (0,18). В единичных точках отмечены висмут и селен. Сумма всех примесей составляет менее 1,23 масс. %. Минимальное количество примесных элементов содержит электрум (среднее в масс. %): теллур (0,15), ртуть (0,25), медь (0,16) и висмут (0,36), реже встречаются мышьяк (0,19) и селен (0,16). Сумма всех примесей не превышает 0,67 масс. %.

Выявленное нами относительно большое количество элементов-примесей в твердых растворах ряда серебро – золото в целом ти-

пично для золото-серебряных месторождений. Присутствие разнообразных примесей в них отмечено нами ранее на многих золото-серебряных рудных объектах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. В полиформационных золото-серебро-полиметаллических рудах месторождения Роговик из примесей в золоте отмечаются ртуть, железо, селен, медь и цинк [54]. На типичных вулканогенных месторождениях Дальнее и Кварцевая Сопка самородное золото часто содержит примеси висмута, сурьмы, меди, ртути, мышьяка, серы, теллура. Установлены также железо, свинец, цинк, селен [34, 42, 55, 56]. Следует отметить, что на этих рудных объектах ближе к поверхности (как и в нашем случае) золотины являются низкопробными и представлены электрумом пониженной пробности и кюстелитом, в которых отчетливо проявлена примесь теллура. С увеличением глубины наряду с возрастани-



**Таблица 2. Состав кустелита из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат**  
**Table 2. Composition of kustelite from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit**

n	N	Проб., ‰	Содержание, масс. %										Σ	Σ <sub>прим</sub>
			Au	Ag	Te	Hg	Sb	Cu	Pb	Se	Bi			
1		132	13,15	86,70	0,19	0,22	0,23	–	–	–	–	100,49	0,64	
2	1	107	10,58	88,57	0,13	–	0,15	0,10	–	–	–	99,53	0,38	
3		101	10,19	90,88	–	0,36	0,26	0,13	–	–	–	101,82	0,75	
4		124	12,35	87,58	–	0,16	–	–	0,15	–	–	100,24	0,31	
5	2	192	19,06	80,02	0,26	–	0,11	–	–	–	–	99,45	0,37	
6		189	18,75	80,27	–	–	–	0,12	0,18	–	–	99,32	0,30	
7		186	18,65	81,50	–	0,21	–	0,14	–	–	0,29	100,79	0,64	
8		127	12,55	85,93	0,20	0,35	–	–	–	–	–	99,03	0,55	
9	3	128	12,75	86,55	0,16	–	0,39	–	–	–	–	99,85	0,55	
10		161	15,82	82,72	–	0,55	0,35	–	–	–	–	99,44	0,90	
11		135	13,54	87,00	0,20	0,27	–	–	–	–	–	101,01	0,47	
12		245	24,48	75,31	0,12	0,21	–	–	–	–	–	100,12	0,33	
13	4	226	22,61	77,49	0,17	–	–	–	–	–	–	100,27	0,17	
14		181	17,90	81,14	0,23	0,16	–	–	–	–	–	99,43	0,39	
15		224	22,34	77,39	0,26	0,97	–	–	–	–	–	100,96	1,23	
16	5	153	15,12	83,49	0,19	–	–	–	0,27	–	–	99,07	0,46	
17		145	14,47	85,41	–	0,20	–	–	–	0,20	–	100,28	0,40	
18		125	12,46	86,98	0,17	0,28	–	0,18	–	–	–	100,07	0,63	
19		129	12,66	85,78	0,13	–	–	0,35	–	–	–	98,92	0,48	
20	6	111	11,03	88,40	0,16	0,31	–	0,17	–	–	–	100,07	0,64	
21		128	12,81	86,90	0,20	0,25	–	0,22	–	–	–	100,38	0,67	

Примечание. Железо, цинк, мышьяк, сера, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %).

**Таблица 3. Состав электрума из золото-серебряных руд преимущественно серебряного состава, месторождение Дукат**  
**Table 3. Composition of electrum from gold-silver ores of predominantly silver composition, Dukat deposit**

n	N	Проб., ‰	Содержание, масс. %								Σ	Σ <sub>прим</sub>	
			Au	Ag	Te	Hg	Cu	Bi	As	Se			
1		282	27,91	70,92	0,20	–	–	0,33	–	–	–	99,36	0,53
2	1	328	32,67	66,92	0,14	0,19	–	0,34	–	–	–	100,26	0,67
3		317	31,61	68,13	0,12	–	–	0,41	–	–	–	100,27	0,53
4		274	27,69	73,37	0,15	–	–	–	0,18	0,15	–	101,54	0,48
5		366	36,89	63,89	0,14	–	0,12	–	–	–	–	101,04	0,26
6		410	41,30	59,33	–	0,37	0,14	–	–	–	–	101,14	0,51
7	2	381	38,11	61,81	0,14	–	–	–	0,20	–	–	100,26	0,34
8		438	43,81	56,26	–	0,26	0,20	–	–	–	–	100,53	0,46
9		358	36,28	65,17	–	0,17	–	–	–	0,17	–	101,79	0,34

Примечание. Железо, свинец, цинк, сурьма, сера, олово и прочерки в таблице – ниже предела обнаружения (менее 0,1 масс. %).

ем пробности золота содержание теллура в нем заметно снижается и он полностью исчезает на глубине. По данным предыдущих исследований такие особенности основного и примесного состава золотин хорошо согласуются с позицией золота, серебра и сопутствующих элементов-индикаторов оруденения в общем

ряду минералого-геохимической зональности и тесно связаны с условиями формирования золото-серебряных руд, относящихся к убогосульфидной эпитермальней формации [20, 57, 58].

Обращает на себя внимание низкая пробность большинства изученных нами выделе-



ний ряда серебро – золото, которая в целом не характерна для типичных вулканогенных золото-серебряных месторождений. Несмотря на то, что для таких объектов типично золото с высокой дисперсией основного состава (от кюстелита до собственно самородного золота), тем не менее преобладает в основном электрум [34, 42, 54–56]. Преобладание на месторождении Дукат золотосодержащего самородного серебра и кюстелита в рудах серебряного состава обусловлено длительной и сложной историей развития рудной минерализации. Как упоминалось ранее, в его формировании выделяется два этапа – вулканогенный и плутоногенный. Внедрение гранитоидов на позднем этапе привело к существенному привносу серебра, дифференциации и перераспределению вещества, в результате чего основная часть серебряной минерализации отлагалась на верхних горизонтах. Это отчетливо видно по преобладанию на верхних горизонтах преимущественно серебряных эндогенных аномальных геохимических полей [11, 20]. Как следствие, месторождение Дукат по генезису можно отнести к вулканоплутоногенным.

### Заключение

Изучение типохимизма золотосодержащих золото-серебряных интерметаллидов из руд преимущественно серебряного состава на месторождении Дукат показало, что они представлены в основном золотосодержащим серебром (пробность 10–99 %) и кюстелитом (пробность 101–245 %), значительно реже – электрумом пониженной пробности (274–438 %). Наиболее разнообразный примесный состав характерен для самородного серебра: теллур, медь, сурьма, ртуть, свинец, железо, селен, сера и висмут. В нем же отмечается максимальная сумма содержаний этих элементов, которая достигает 1,35 масс. %. В кюстелите количество примесей и их суммарное содержание (до 1,23 масс. %) не-

сколько снижается: теллур, ртуть, сурьма, медь, свинец, висмут и селен. Наиболее бедный примесный состав отмечен в электруме: теллур, ртуть, медь, висмут, мышьяк и селен. Сумма этих примесей минимальна и не превышает 0,67 масс. %.

Важно подчеркнуть, что проведенные исследования по изучению особенностей типохимизма имеют немаловажное значение как с теоретической, так и с практической точки зрения. Любой минерал, в том числе самородное золото, в своем составе и свойствах несет крайне важную информацию о своей генетической природе и, как следствие, является одним из индикаторов условий образования месторождения. В отличие от других минералов самородное золото является наиболее устойчивым к воздействиям внешней среды. Оно способно длительное время противостоять химическому выветриванию и хрупким деформациям и в результате сохранять эту информацию. В нашем случае относительно низкая пробность изученных интерметаллидов ряда серебро – золото, элементный состав примесей в них, имеющий большое разнообразие, и уровень их концентраций в целом отражают геохимические особенности руд преимущественно серебряного состава, которые преобладают на верхних и верхне-среднерудных интервалах месторождения. Кроме того, на основании полученных данных можно утверждать, что уникальное по своим масштабам золото-серебряное месторождение Дукат (в отличие от типичных небольших по запасам серебра и золота вулканогенных месторождений) по своему генезису является вулканоплутоногенным. В практическом отношении особенности типохимизма самородного золота могут быть использованы в процессе поисковых работ для установления рудно-формационной принадлежности выявленной минерализации, ее масштабов, а также служить дополнительным критерием при оценке уровня эрозионного среза рудных зон и прогнозирования оруденения на глубину.

### Список источников

1. Константинов М.М., Костин А.В., Сидоров А.А. Геология месторождений серебра. Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003. 282 с.
2. Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Научный мир, 2005. 320 с.
3. Наталенко В.Е., Калинин А.И., Раевская И.С., Толстихин Ю.В., Халхалов Ю.А., Бельков Е.В. Геологическое строение Дукатского месторождения // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Магадан: Магаданское книжное издательство, 1980. Вып. 25. С. 61–73.
4. Сахарова М.С., Брызгалов И.А. Минералогия серебра кварц-адуляр-родонитовых гидротермальных жил // Геология рудных месторождений. 1981. Т. 23. № 6. С. 36–48.



5. Сидоров А.А., Константинов М.М., Еремин Р.А., Савва Н.Е., Копытин В.И., Сафронов Д.Н. [и др.]. Серебро (геология, минералогия, генезис, закономерности размещения месторождений). М.: Наука, 1989. 240 с.
6. Сидоров А.А., Филимонова А.Г., Волков А.В., Трубкин Н.В., Чугаев А.В. Эволюционно-историческая модель Дукатского серебряного гиганта // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 523–528. EDN: OYIRUL.
7. Шило Н.А., Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Ряховская С.К., Брызгалов И.А. Минералогия и генетические особенности золото-серебряного оруденения северо-западной части Тихоокеанского обрамления. М.: Наука, 1992. 257 с.
8. Берман Ю.С., Прокофьев В.Ю., Козеренко С.В., Елисеева Н.А., Колпакова Н.Н. Реювенация золото-серебряного оруденения вулканогенного месторождения Дукат (по результатам исследований флюидных включений) // Геохимия. 1993. № 4. С. 539–548.
9. Константинов М.М., Калинин А.И., Наталенко В.Е., Стружков С.Ф., Двуреченская С.С. Золото-серебряное месторождение Дукат (Россия) // Геология рудных месторождений. 1995. Т. 37. № 4. С. 317–334.
10. Konstantinov M.M., Strujkov S.F. Application of indicator halous (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits // Journal of Geochemical Exploration. 1995. Vol. 54. Iss. 1. P. 1–17. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00003-8).
11. Кравцова Р.Г., Захаров М.Н. Геохимические поля концентрирования Дукатской золото-серебряной рудно-магматической системы (Северо-Восток России) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 5. С. 28–38. EDN: EZBJJD.
12. Двуреченская С.С. Гипергенные минералы серебряных месторождений. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2001. 258 с.
13. Захаров М.Н., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Геохимические особенности пород вулканоплутонических ассоциаций Дукатского золото-серебряного месторождения // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 10. С. 928–939. EDN: BVWNIC.
14. Розинов М.И., Колесников Д.И., Шергина Ю.П. Возраст оруденения на серебряном месторождении Дукат по данным Rb-Sr-метода // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46. № 6. С. 524–539. EDN: OPWRDD.
15. Петров О.В., Михайлов Б.К., Шевченко С.С., Розинов М.И., Колесников Д.И., Лохов К.И. [и др.]. Изотопно-геохимические исследования уникального золото-серебряного месторождения Дукат как ключ к пониманию процессов вулканогенного рудообразования // Региональная геология и металлогения. 2006. № 27. С. 60–76. EDN: LLZJEJ.
16. Борисова Д.А. Характерные особенности минерального состава руд золото-серебряного месторождения Дукат // Новое в познании процессов рудообразования: материалы Восьмой Российской молодежной научно-практической школы (г. Москва, 26–30 ноября 2018 г.). М.: Изд-во ИГЕМ РАН, 2018. С. 65–68. EDN: YQKWSL.
17. Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с. <https://doi.org/10.32986/978-5-89392-823-5-1-544>.
18. Филимонова Л.Г., Трубкин Н.В. Дисперсное золото, ассоциирующие минералы рассеянной минерализации лейкогранитов Дукатского рудного поля – индикаторы условий генерации магматогенных золотоносных флюидов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 9. С. 1275–1293. <https://doi.org/10.15372/GiG2020174>. EDN: KEWYAF.
19. Константинов М.М., Наталенко В.Е., Калинин А.И., Стружков С.Ф. Золото-серебряное месторождение Дукат. М.: Недра, 1998. 203 с.
20. Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 292 с. EDN: QKJONH.
21. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. 348 с.
22. Петровская Н.В. Золотые самородки. М.: Наука. 1993. 190 с.
23. Савва Н.Е., Преис В.К. Атлас самородного золота Северо-Востока СССР. М.: Наука, 1990. 292 с.
24. Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. Geological and geochemical controls on the silver content (fineness) of gold in gold-silver deposits // Ore Geology Reviews. 1991. Vol. 6. Iss. 4. P. 333–364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V).
25. Knight J.B., Mortensen J.K., Morison S.R. Lode and placer gold composition in the Klondike district, Yukon Territory, Canada; implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits // Economic Geology. 1999. Vol. 94. Iss. 5. P. 649–664. <https://doi.org/10.2113/gsecongeol.94.5.649>.
26. Самусиков В.П. Элементы-примеси в самородном золоте – критерии определения формационной принадлежности и уровня эрозионного среза золоторудных месторождений // Доклады Академии наук. 2003. Т. 391. № 1. С. 99–103. EDN: OQJQUB.
27. Анисимова Г.С., Серкебаева Е.С., Кондратьева Л.А. Самородное золото месторождения Бадран // Отечественная геология. 2006. № 5. С. 38–47. EDN: GZUUFM.
28. Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance // Economic Geology. 2009. Vol. 104. Iss. 4. P. 563–585. <https://doi.org/10.2113/gsecongeol.104.4.563>.
29. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., et al. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies // Mineralium Deposita. 2021. Vol. 56. P. 1563–1588. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>.
30. Chapman R.J., Mortensen J.K., Murphy R. Compositional signatures of gold from different deposit types in British Columbia, Canada // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss. 8. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/min13081072>.



31. Стефанова В., Волков А.В., Серафимовский Т., Сидоров А.А. Самородное золото рудного поля Боровик (Республика Македония) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 2. С. 148–153. <https://doi.org/10.7868/S0016777015020069>. EDN: TPWJXL.
32. Vishiti A., Suh C.E., Lehmann B., Egbe J.A., Shemang E.M. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon // *Journal of African Earth Sciences*. 2015. Vol. 111. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010>.
33. Гаськов И.В. Главные элементы-примеси самородного золота и связь их с условиями его образования на примере месторождений складчатых поясов Азии // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 9. С. 1359–1376. <https://doi.org/10.15372/GiG20170908>. EDN: ZHDOUF.
34. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting surficial composition of native gold from two different types of gold ore deposits // *Minerals*. 2017. Vol. 7. Iss. 8. P. 142. <https://doi.org/10.3390/min7080142>.
35. Анкушева Н.Н., Кужугет Р.В. Состав золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Южный Ак-Даг (Западная Тува) // *Литосфера*. 2020. Т. 20. № 5. С. 706–716. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716>. EDN: XZMMRE.
36. Киселева Г.Д., Языкова Ю.И., Коваленкер В.А., Трубкин Н.В., Борисовский С.Е. Типоморфизм самородного золота как индикатор различных типов оруденения крупного скарново-порфирового Au-Fe-Cu месторождения Быстринское, Восточное Забайкалье // *Руды и металлы*. 2020. № 1. С. 51–68. <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10005>. EDN: UMLMIT.
37. Аристов В.В., Григорьева А.В., Савчук Ю.С., Сидорова Н.В., Сидоров В.А. Формы нахождения золота и некоторые типоморфные характеристики самородного золота орогенного месторождения Павлик (Магаданская область) // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 1. С. 3–39. <https://doi.org/10.31857/S0016777021010020>. EDN: SCPLMH.
38. Чухарева Н.С., Белогуб Е.В., Рыжкова Ю.А., Блинов И.А., Рассомахин М.А., Новоселов К.А. Особенности морфологии и химического состава самородного золота месторождения Муртыкты (Южный Урал) // *Минералогия*. 2021. Т. 7. № 1. С. 54–65. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-4>. EDN: JORRUT.
39. Liu H., Beaudoin G. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 132. P. 104066. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>.
40. Tolstyykh N., Bukhanova D., Shapovalova M., Borovikov A., Podlipsky M. The Gold mineralization of the Baranyevskoe Au-Ag epithermal deposit in Central Kamchatka // *Minerals*. 2021. Vol. 11. Iss. 11. P. 1225. <https://doi.org/10.3390/min11111225>.
41. Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Пучков В.Н., Петров С.В. Особенности химического состава минералов золота из габбровых массивов платиноносного пояса Урала, Россия // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 245–252. <https://doi.org/10.31857/S2686739722601612>. EDN: VVFVAE.
42. Savva N.E., Kravtsova R.G., Anisimova G.S., Palyanova G.A. Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia) // *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 5. P. 561. <https://doi.org/10.3390/min12050561>.
43. Alfonso P., Ccoloque E., Garcia-Valles M., Martínez A., Yubero M.T., Anticoi H., et al. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta deposit, Mid-South Peru // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 568. <https://doi.org/10.3390/min13040568>.
44. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. Ore mineralogy and typomorphism of native gold of the Spokoininsky cluster of the Aldan–Stanovoy gold province // *Minerals*. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 543. <https://doi.org/10.3390/min13040543>.
45. Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Калинин Ю.А., Шабекина А.Ш., Лосев В.И., Баланай М.М. Благоприятная минерализация и условия образования Au-Ag эпитеpmальных жил на Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Кызык-Чадр (Восточная Тува) // *Литосфера*. 2024. Т. 24. № 6. С. 1029–1045. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>. EDN: OVUPRS.
46. Степанов В.А. Самородки золота на месторождениях золото-кварцевой формации как индикатор зональности рудной колонны // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2025. № 1. С. 32–43. <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2025-1-32-43>. EDN: DZQTTY.
47. Чумаков А.В., Аликин О.В., Рудашевский В.Н., Удинцова С.А., Панова Е.Г., Лейбгам П.Н. Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал) // Вестник геонаук. 2025. № 1. С. 4–13. <https://doi.org/10.19110/geov.2025.1.1>. EDN: PYGLTZ.
48. Melo-Gómez J., Hastie E., Gibson H.L., Tait K.T., Petrus J.A. Minor and trace element chemistry of gold: controls and implications for gold deposits within the Superior province, Canada // *Economic Geology*. 2025. Vol. 120. Iss. 2. P. 307–333. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5148>.
49. Павлова Л.А., Парадина Л.Ф. Рентгеноспектральный микроанализ и его применение в минералогии. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО АН СССР, 1990. 185 с.
50. Павлова Л.А. Электронно-зондовый рентгеноспектральный микроанализ и его применение. Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. 304 с.
51. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания / пер. с нем. М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. 1132 с.
52. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element) // *Canadian Geological Survey Bulletin*. 1979. Iss. 280. 584 p.



53. Зеленов В.И. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. М.: Недра, 1989. 302 с.
54. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г. Самородное золото месторождения Роговик (Северо-Восток России) // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Междунар. симпозиум им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посв. 130-летию со дня рождения проф. М.И. Кучина (г. Томск, 3–7 апреля 2017 г.). Томск: Изд-во ТПУ, 2017. Т. I. С. 166–168. EDN: ZNVJQP.
55. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпitherмального месторождения Дальнее (Северное Прихотье) // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конференции (г. Новосибирск, 19–23 ноября 2018 г.). Новосибирск: Изд-во ИПЦ НГУ, 2018. С. 329–331. EDN: ZADFHN.
56. Макшаков А.С., Кравцова Р.Г., Павлова Л.А. Самородное золото эпitherмального месторождения Кварцевая Сопка (Северное Прихотье) // Вопросы естествознания. 2018. № 2. С. 76–83. EDN: XZLDON.
57. Кравцова Р.Г. Минералого-геохимическая зональность и особенности формирования золото-серебряных месторождений Северо-Востока России // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 6. С. 763–777. EDN: NZLWEI.
58. Кравцова Р.Г., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Прокофьев В.Ю. Условия формирования золото-серебряных месторождений Северного Прихотья, Россия // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 5. С. 452–473. EDN: OTUUSX.

### References

1. Konstantinov M.M., Kostin A.V., Sidorov A.A. *The geology of silver ore deposits*. Yakutsk: Sakhapolygraphizdat; 2003, 282 p. (In Russ.).
2. Struzhkov S.F., Konstantinov M.M. *The metallogeny of gold and silver in the Okhotsk–Chuckchee volcanogenic belt*. Moscow: Nauchnyi mir; 2005, 320 p. (In Russ.).
3. Natalenko V.E., Kalinin A.I., Raevskaya I.S., Tolstikhin Yu.V., Khalkhalov Yu.A., Bel'kov E.V. Geological setting of Dukat deposit. In: *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym Severo-Vostoka SSSR = Materials on geology and mineral resources of North–East USSR*. Magadan: Magadanskoe knizhnoe izdatel'stvo; 1980, vol. 25, p. 61–73. (In Russ.).
4. Sakharova M.S., Bryzgalov I.A. Mineralogy of silver in quartz-adularia-rhodonite volcanogenic hydrothermal veins. *Geology of Ore Deposits*. 1981;23(6):36–48. (In Russ.).
5. Sidorov A.A., Konstantinov M.M., Eremin R.A., Savva N.E., Kopytin V.I., Safronov D.N., et al. *Silver: geology, mineralogy, genesis, and deposit localization patterns*. Moscow: Nauka; 1989, 240 p. (In Russ.).
6. Sidorov A.A., Filimonova A.G., Volkov A.V., Trubkin N.V., Chugaev A.V. Evolutionary historical model of the Dukat silver giant. *Doklady Akademii nauk*. 2012;444(5):523–528. (In Russ.). EDN: OYIRUL.
7. Shilo N.A., Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., Riakhovskaya S.K., Bryzgalov I.A. *Mineralogy and genetic features of gold-silver mineralization in the northwestern part of the Pacific Ocean framing*. Moscow: Nauka; 1992, 252 p. (In Russ.).
8. Berman Yu.S., Prokofiev V.Yu., Kozerenko S.V., Eliseeva N.A., Kolpakova N.N. Rejuvenation of gold-silver mineralization of the Dukat volcanogenic deposit (based on the results of fluid inclusion studies). *Geochemistry International*. 1993;4:539–548. (In Russ.).
9. Konstantinov M.M., Natalenko V.E., Kalinin A.I., Strujkov S.F., Dvurechenskaya S.S. Dukat gold-silver deposit (Russia). *Geology of Ore Deposits*. 1995;37(4):317–334. (In Russ.).
10. Konstantinov M.M., Strujkov S.F. Application of indicator halous (signs of ore remobilization) in exploration for blind gold and silver deposits. *Journal of Geochemical Exploration*. 1995;54(1):1–17. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0375-6742(95)00003-8).
11. Kravtsova R.G., Zakharov M.N. Geochemical fields of concentration of the Dukat gold-silver-bearing ore-magmatic system (Northeast Russia). *Russian Geology and Geophysics*. 1996;37(5):28–38. (In Russ.). EDN: EZBJJD.
12. Dvurechenskaya S.S. *Hypogene minerals from silver deposits*. Moscow: Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 2001, 258 p. (In Russ.).
13. Zakharov M.N., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Geochemical features of rocks of volcanoplutonic associations of the Dukat gold-silver deposit. *Russian Geology and Geophysics*. 2002;43(10):928–939. (In Russ.). EDN: BVWNIC.
14. Rozinov M.I., Kolesnikov D.I., Shergina Yu.P. Timing of ore mineralization in the Dukat silver deposit by data of the Rb-Sr method. *Geology of Ore Deposits*. 2004;46(6):524–539. (In Russ.). EDN: OPWRDD.
15. Petrov O.V., Mikhailov B.K., Shevchenko S.S., Rozinov M.I., Kolesnikov D.I., Lokhov K.I., et al. Isotope and geochemical studies of the unique Dukat gold-silver deposit as a key to understanding the processes of volcanogenic ore formation. *Regional Geology and Metallogeny*. 2006;27:60–76 (In Russ.). EDN: LLZJEJ.
16. Borisova D.A. Characteristic features of the mineral composition of ores of the Dukat gold-silver deposit. In: *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya: materialy VIII Rossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi shkoly = New advances in understanding ore formation processes: Proceedings of the 8<sup>th</sup> Russian youth scientific and practical school*. 26–30 November 2018, Moscow. Moscow: Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences; 2018, p. 65–68. (In Russ.). EDN: YQKWSL.
17. Savva N.E. *Silver mineralogy in northeastern Russia*. Moscow: Triumph; 2018, 544 p. (In Russ.). <https://doi.org/10.32986/978-5-89392-823-5-1-544>.
18. Filimonova L.G., Trubkin N.V. Dispersed gold and associated disseminated mineralization of leucogranites of the Dukat ore field as indicators of the generation conditions of magmatogenic gold-bearing fluids. *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(9):1275–1293. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG2020174>. EDN: KEWYAF.



19. Konstantinov M.M., Natalenko V.E., Kalinin A.I., Struzhkov S.F. *Dukat gold–silver deposit*. Moscow: Nedra; 1998, 203 p. (In Russ.).
20. Kravtsova R.G. *Geochemistry and formation conditions of gold–silver ore-forming systems in the Northern Pre-Okhotsk region*. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo "Geo"; 2010, 292 p. (In Russ.). EDN: QKJONH.
21. Petrovskaya N.V. *Native gold (general characteristics, typomorphism, problems, and genesis issues)*. Moscow: Nauka; 1973, 348 p. (In Russ.).
22. Petrovskaya N.V. *Gold nuggets*. Moscow: Nauka; 1993, 190 p. (In Russ.).
23. Savva N.E., Preis V.K. *Atlas of native gold of the North-East of the USSR*. Moscow: Nauka; 1990, 292 p. (In Russ.).
24. Morrison G.W., Rose W.J., Jaireth S. Geological and geochemical controls on the silver content (finesness) of gold in gold-silver deposits. *Ore Geology Reviews*. 1991;6(4):333-364. [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90009-V](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90009-V).
25. Knight J.B., Mortensen J.K., Morison S.R. Lode and placer gold composition in the Klondike district, Yukon Territory, Canada; implications for the nature and genesis of Klondike placer and lode gold deposits. *Economic Geology*. 1999;94(5):649-664. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.5.649>.
26. Samusikov V.P. Trace elements in native gold as criteria for the identification of the formation type and erosion level of gold ore deposits. *Doklady Akademii nauk*. 2003;391(1):99-103. (In Russ.). EDN: OQJ0UB.
27. Anisimova G.S., Serkebayeva E.S., Kondratieva L.A. Native gold of the Badran deposit. *Otechestvennaya Geologiya*. 2006;5:38-47. (In Russ.). EDN: GZUUFM.
28. Chapman R.J., Leake R.C., Bond D.P.G., Stedra V., Fairgrieve B. Chemical and mineralogical signatures of gold formed in oxidizing chloride hydrothermal systems and their significance within populations of placer gold grains collected during reconnaissance. *Economic Geology*. 2009;104(4):563-585. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.4.563>.
29. Chapman R.J., Banks D.A., Styles M.T., Walshaw R.D., Piazzolo S., Morgan D.J., et al. Chemical and physical heterogeneity within native gold: implications for the design of gold particle studies. *Mineralium Deposita*. 2021;56:1563-1588. <https://doi.org/10.1007/s00126-020-01036-x>.
30. Chapman R., Mortensen J.K., Murphy R. Compositional signatures of gold from different deposit types in British Columbia, Canada. *Minerals*. 2023;13(8):1072. <https://doi.org/10.3390/min13081072>.
31. Stefanova V., Serafimovski T., Volkov A.V., Sidorov A.A. Native gold of the Borovik ore field, Republic of Macedonia (FYROM). *Geology of Ore Deposits*. 2015;57(2):148-153. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0016777015020069>. EDN: TPWJXL.
32. Vishiti A., Suh C.E., Lehmann B., Egbe J.A., Shemang E.M. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 2015;111:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.07.010>.
33. Gas'kov I.V. Major impurity elements in native gold and their association with gold mineralization settings in deposits of Asian folded belts. *Russian Geology and Geophysics*. 2017;58(9):1359-1376. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/GiG20170908>. EDN: ZHD0UF.
34. Tauson V.L., Kravtsova R.G., Makshakov A.S., Lipko S.V., Arsent'ev K.Yu. Contrasting surficial composition of native gold from two different types of gold ore deposits. *Minerals*. 2017;7(8):142. <https://doi.org/10.3390/min7080142>. <https://doi.org/10.3390/min7080142>.
35. Ankusheva N.N., Kuzhuget R.V. Gold composition and conditions of Southern Ak-Dag gold-sulfide-quartz ore occurrence formation (Western Tuva). *Lithosphere (Russia)*. 2020;20(5):706-716. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716>. EDN: XZMMRE.
36. Kiseleva G.D., Zazykova Yu.I., Kovalenker V.A., Trubkin N.V., Borisovsky S.E. Native gold typomorphism as indicator of various types of mineralization of large scarn-porphry Au-Fe-Cu deposit Bystrinskoe, Eastern Transbaikalia. *Ores and metals*. 2020;1:51-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0869-5997-2020-10005>. EDN: UMLMIT.
37. Aristov V.V., Grigorieva A.V., Savchuk Y.S., Sidorova N.V., Sidorov V.A. Forms of gold and some typomorphic characteristics of native gold of the Pavlik orogenic deposit (Magadan oblast). *Geology of Ore Deposits*. 2021;63(1):3-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016777021010020>. EDN: SCPLMH.
38. Chukhareva N.S., Belogub E.V., Ryzhkova Yu.A., Blinov I.A., Rassomakhin M.A., Novoselov K.A. Features of morphology and chemical composition of native gold from the Murtyky deposit, South Urals. *Mineralogy*. 2021;7(1):54-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2021-7-1-4>. EDN: JORRUT.
39. Liu H., Beaudoin G. Geochemical signatures in native gold derived from Au-bearing ore deposits. *Ore Geology Reviews*. 2021;132:104066. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104066>.
40. Tolstykh N., Bukhanova D., Shapovalova M., Borovikov A., Podlipsky M. The gold mineralization of the Baranyevskoe Au-Ag epithermal deposit in Central Kamchatka. *Minerals*. 2021;11(11):1225. <https://doi.org/10.3390/min11111225>.
41. Stepanov S.Yu., Palamarchuk R.S., Puchkov V.N., Petrov S.V. Features of chemical composition of gold minerals from gabbro massives of the Urals platinum-bearing belt, Russia. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2022;507(2):245-252. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686739722601612>. EDN: VVFVAE.
42. Savva N.E., Kravtsova R.G., Anisimova G.S., Palyanova G.A. Typomorphism of native gold (geological-industrial types of gold deposits in the North-East of Russia). *Minerals*. 2022;12(5):561. <https://doi.org/10.3390/min12050561>.
43. Alfonso P., Ccolque E., Garcia-Valles M., Martínez A., Yubero M.T., Anticoi H., et al. Mineralogy and mineral chemistry of the Au-Ag-Te-(Bi-Se) San Luis Alta deposit, Mid-South Peru. *Minerals*. 2023;13(4):568. <https://doi.org/10.3390/min13040568>.



44. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. Ore mineralogy and typomorphism of native gold of the Spokoininsky cluster of the Aldan–Stanovoy gold province. *Minerals*. 2023;13(4):543. <https://doi.org/10.3390/min13040543>.
45. Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Kalinin Yu.A., Shavekina A.Sh., Losev V.I., Balanay M.M. Noble-metal mineralization and conditions of formation of Au-Ag epithermal veins from Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit, Eastern Tuva. *Lithosphere (Russia)*. 2024;24(6):1029-1045. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>. EDN: OVUPRS.
46. Stepanov V.A. Gold nuggets in the gold-quartz formation deposits as an indicator for the ore column zonality. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2025;1:32-43. (In Russ.). <https://doi.org/10.34078/1814-0998-2025-1-32-43>. EDN: DZQTTY.
47. Chumakov A.V., Alikin O.V., Rudashevsky V.N., Udintsova S.A., Panova E.G., Leibham P.N. Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone). *Vestnik of Geosciences*. 2025;1:4-13. (In Russ.). <https://doi.org/10.19110/geov.2025.1.1>. EDN: PYGLTZ.
48. Melo-Gómez J., Hastie E., Gibson H.L., Tait K.T., Petrus J.A.. Minor and trace element chemistry of gold: controls and implications for gold deposits within the Superior province, Canada. *Economic Geology*. 2025;120(2):307-333. <https://doi.org/10.5382/econgeo.5148>.
49. Pavlova L.A., Paradina L.F. *X-ray spectral microanalysis and its application in mineralogy*. Yakutsk: Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990, 185 p. (In Russ.).
50. Pavlova L.A. *Electron probe X-ray microanalysis and its application*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing; 2014, 304 p. (In Russ.).
51. Ramdohr P. The ore minerals and their intergrowths. Berlin: Akademie-Verlag; 1960, 1089 p. (Russ. ed.: *Rudnye mineraly i ikh srastaniya*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury; 1962, 1132 p.).
52. Boyle R.W. The geochemistry of gold and its deposits (together with a chapter on geochemical prospecting for the element). *Canadian Geological Survey Bulletin*. 1979;280:584.
53. Zelenov V.I. *Methodology for studying gold- and silver-bearing ores*. Moscow: Nedra; 1989, 302 p. (In Russ.).
54. Makshakov A.S., Kravtsova R.G. Native gold from the Rogovik deposit (North-East of Russia). In: *Problemy geologii i osvoeniya nedr: trudy XXI Mezhdunar. sipozium im. akad. M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posv. 130-letiyu so dnya rozhdeniya prof. M.I. Kuchina = Problems of geology and subsoil development: Proceedings of the 21st Academician M.A. Usov International symposium of students and young scientists dedicated to the 130th birth anniversary of Professor M.I. Kuchin*. 3–7 April 2017, Tomsk. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2017, vol. I, p. 166-168. (In Russ.). EDN: ZNVJQP.
55. Makshakov A.S., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Native gold from the Dal'nee epithermal deposit (Northern Okhotsk Region). In: *IX Sibirskaya konferentsiya molodykh uchenykh po naukam o Zemle: materialy konferentsii = 9th Siberian conference of young scientists on Earth sciences: conference proceedings*. 19–23 November 2018, Novosibirsk. Novosibirsk: Novosibirsk State University; 2018, p. 329-331. (In Russ.). EDN: ZADFHN.
56. Makshakov A.S., Kravtsova R.G., Pavlova L.A. Native gold from the Kvarsevaya Sopka epithermal deposit (Northern Okhotsk Region). *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;2:76-83. (In Russ.). EDN: XZLDOH.
57. Kravtsova R.G. Mineralogo-geochemical zonation and peculiarities of formation of gold-silver deposits in north-eastern Russia. *Geology and Geophysics*. 1998;39(6):763-777. (In Russ.). EDN: NZLWEI.
58. Kravtsova R.G., Borovikov A.A., Borisenko A.S., Prokof'ev V.Yu. Formation conditions of gold-silver deposits in the Northern Okhotsk region, Russia. *Geology of Ore Deposits*. 2003;45(5):452-473. (In Russ.). EDN: OTUUSX.

#### Информация об авторах / Information about the authors



**Павлюк Наталия Сергеевна,**

младший научный сотрудник лаборатории обогащения руд,  
Иркутский научно-исследовательский институт благородных  
и редких металлов и алмазов,  
г. Иркутск, Россия,  
аспирант,

Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

✉ pavnatse@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-2095-5539>

**Natalia S. Pavlyuk,**

Junior Researcher of the Ore Benefication Laboratory,  
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,  
Irkutsk, Russia,  
Postgraduate Student,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

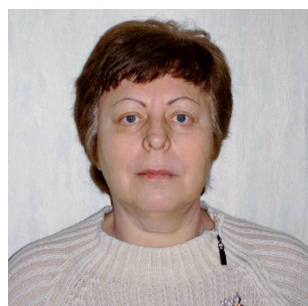
✉ pavnatse@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0001-2095-5539>

**Макшаков Артем Сергеевич,**

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории моделирования  
геохимических процессов,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
artem\_m@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6970-7501>

**Artem S. Makshakov,**

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Senior Researcher of the Laboratory of Geochemical Process Modeling,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
artem\_m@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-6970-7501>

**Кравцова Раиса Григорьевна,**

доктор геолого-минералогических наук,  
ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования  
геохимических процессов,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,  
krg@igc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5153-6871>

**Raisa G. Kravtsova,**

Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),  
Leading Researcher of the Laboratory of Geochemical Process Modeling,  
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,  
krg@igc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5153-6871>

**Вклад авторов / Contribution of the authors**

Н.С. Павлюк – разработка методологии, проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание черновика рукописи.

А.С. Макшаков – разработка концепции, курирование данных, проведение исследования, предоставление ресурсов, научное руководство, визуализация, редактирование рукописи.

Р.Г. Кравцова – разработка концепции, курирование данных, предоставление ресурсов, редактирование рукописи.

Natalia S. Pavlyuk – methodology, investigation, formal analysis, validation, visualization, writing – original draft.

Artem S. Makshakov – conceptualization, data curation, investigation, resources, supervision, visualization, writing – editing.

Raisa G. Kravtsova – conceptualization, data curation, resources, writing – editing.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье / Information about the article**

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025; принята к публикации 11.09.2025.

The article was submitted 14.08.2025; approved after reviewing 26.08.2025; accepted for publication 11.09.2025.



Научная статья  
УДК 631.41:504.05  
EDN: MMDCUU  
DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381



## Оценка эколого-функциональных свойств почвенного покрова городских лесов Иркутской области

О.В. Шергина<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

**Резюме.** Проблема антропогенного изменения биогеоценотических функций почвенного покрова городских лесов Иркутской области требует познания механизмов функционирования этих территорий и своевременной оценки экологических последствий. Цель исследований заключалась в подборе перечня необходимых показателей-индикаторов, описывающих эколого-функциональные свойства почв, которые позволяют с высокой степенью информативности оценить изменение экологического состояния почвенного покрова в условиях урбанизированной среды. Из всего многообразия эколого-функциональных свойств почв оценивались те, которые напрямую связаны с оздоровлением окружающей среды городов: детоксицирующая способность, питательный режим и буферность почвы. Показано, что наиболее информативными являются параметры лесной подстилки и верхних гумусовых горизонтов почв. Установлено, что все выбранные показатели-индикаторы почв отличаются высоким уровнем взаимных корреляций, что отражает их высокую функциональность в условиях негативного антропогенного воздействия (техногенное загрязнение и рекреационная нагрузка) городской среды. Результаты исследований расширили представление об экологических механизмах адаптации почв к антропогенным нагрузкам и роль этих компонентов в поддержании экологического равновесия на урбанизированной территории. Представленный подход на основе выбранных информативных параметров лесных почв урбанизированных территорий позволил не только судить об экологическом потенциале почв, о возможности очищения и восстановления городской среды в сложившихся условиях азротехногенного загрязнения и рекреационной нагрузки, но и разрабатывать рекомендации по оптимизации состояния окружающей среды в городах.

**Ключевые слова:** функционирование естественных лесных почв, техногенное загрязнение, рекреационная нагрузка, устойчивость почв

**Благодарности:** Работа была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (рег. № НИОКТР – 125021702332-4).

**Для цитирования:** Шергина О.В. Оценка эколого-функциональных свойств почвенного покрова городских лесов Иркутской области // Науки о земле и недрапользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 365–381. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381>. EDN: MMDCUU.

### Original article

## Assessment of environmental and functional properties of Irkutsk region urban forest soil cover

Olga V. Shergina<sup>a✉</sup>

<sup>a</sup>Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The problem of anthropogenic changes in the biogeocenotic functions of the soil cover of urban forests in the Irkutsk region requires knowledge of the territory functioning mechanism and timely assessment of environmental consequences. The purpose of the research lies in the selection of a list of necessary indicators that describe the environmental and functional properties of soils, which allow a highly informative assessment of changes in the environmental state of the soil cover in an urbanized environment. The research assesses those environmental and functional properties of soils which are directly related to the improvement of the urban environment including detoxifying ability, nutritional regime and soil buffering capacity. Forest litter and upper humus horizon parameters are shown to be the most informative. All selected soil indicator parameters are found to have high levels of mutual correlation, reflecting their high functionality under the negative anthropogenic impacts (technogenic pollution and recreational load) of the urban environment. The research results expanded our understanding of the environmental mechanisms of soil adaptation to anthropogenic loads and the



role of these components in maintaining ecological balance in urban areas. The presented approach based on selected informative parameters of forest soils in urban areas enabled to assess the environmental potential of soils as well as the feasibility of cleaning and restoring the urban environment under the current conditions of airborne anthropogenic pollution and recreational loads. It also allowed to develop recommendations for optimizing urban environmental conditions.

**Keywords:** functioning of natural forest soils, technogenic pollution, recreational load, soil stability

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (reg. No. NIOKTR – 125021702332-4).

**For citation:** Shergina O.V. Assessment of environmental and functional properties of Irkutsk region urban forest soil cover. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):365-381. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2025-48-3-365-381>. EDN: MMDCUU.

## Введение

Многие урбанизированные территории Иркутской области характеризуются такой уникальной особенностью, как сохранение естественных лесных массивов внутри городского каркаса. В городских лесах региона произрастают различные древесные породы естественного происхождения на природно сформированных почвах [1]. В настоящее время изучение городских лесов является одним из важнейших направлений в экологии урбанизированных территорий [2–4]. Естественные леса не только являются более устойчивыми объектами в сравнении с искусственно созданными парками и скверами, но и выполняют значимые средорегулирующие функции для сохранения оптимального состояния окружающей среды [5]. Сейчас все большее число городских лесов получает статус особо охраняемых территорий, что свидетельствует о признании важности этих природных компонентов для урбанизированных территорий [6, 7].

Понимание ценности городских лесов, их функционального назначения может способствовать принятию природоохранных решений в целях улучшения качества окружающей среды [8]. На урбанизированных территориях Иркутской области ранее не проводились исследования уникальных естественно сохранившихся лесных территорий. Основными факторами, оказывающими негативное воздействие на городские леса в регионе, служат высокая рекреационная нагрузка и техногенное загрязнение [9]. Необходимо отметить, что уровень промышленного загрязнения воздушного бассейна в регионе довольно высок вследствие сосредоточения крупных центров теплоэнергетики, цветной металлургии,

топливной, химической и нефтехимической промышленности<sup>1</sup>. Более того, в будущем высока вероятность усиления антропогенного воздействия, поскольку Иркутская область перспективна для дальнейшего хозяйственного освоения<sup>2</sup>. В этом плане для улучшения экологической ситуации (помимо сокращения объемов техногенных выбросов и снижения уровня рекреационной нагрузки) важным является разработка научно обоснованных подходов улучшения состояния естественных лесов, которые выполняют важнейшую роль в оздоровлении окружающей среды [10].

Почвы занимают важнейшее место в структурно-функциональной организации лесных биогеоценозов. Уникальным экологическим звеном в городских лесах являются естественные почвы, которые выполняют важнейшую роль в биогеохимических циклах и поддержании биоразнообразия городской среды в целом [11, 12]. Важную роль в сохранении экологического равновесия в биогеоценозе играют такие педохимические процессы, как аккумуляция элементов-биогенов в органической подстилке и гумусовом веществе, детоксикация элементов-загрязнителей и миграция подвижных форм элементов в почвенном профиле [13, 14].

Данные по изучению почв городских лесов позволяют информативно оценивать уровень антропогенной нагрузки на экосистему и определять необходимость применения экологических методов по оптимизации окружающей среды [15–17]. Поэтому важным этапом при оценке экологической обстановки на урбанизированных территориях должно являться получение информативных данных об оценке эколого-функциональных свойств

<sup>1</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». Иркутск: Изд-во ООО «Максима», 2023. 285 с.

<sup>2</sup> Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году». М.: Изд-во Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.



городских почв [18]. В то же время концепция сохранения природных почв как уникальных компонентов экосистем урбанизированных территорий является основой устойчивого природопользования [19]. Это позволило определить цель исследования – оценить эколого-функциональные свойства естественных городских почв по комплексу информативных индикаторов (детоксицирующая способность, минеральный режим, буферные свойства) и выявить функциональные особенности трансформации природной среды в условиях промышленного загрязнения и рекреационной нагрузки в урбоэкосистемах Иркутской области (города Усолье-Сибирское и Ангарск).

### Материалы и методы исследования

Исследования выполнялись в 2021–2023 гг. на территориях городов Усолья-Сибирского и Ангарска Иркутской области, в городских лесах естественного происхождения, локально сохранившихся в разных районах урбанизированных территорий. Из многих негативных факторов, влияющих на городские лесные биогеоценозы, нами рассматривалось воздействие на почвенный покров рекреационной нагрузки и загрязнение окружающей среды. По данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, уровень загрязнения воздуха в городах оценивается как высокий<sup>2</sup>. Кроме того, природные особенности (холмистый рельеф, длительные периоды слабых ветров, температурные инверсии воздуха, пониженное среднегодовое количество осадков) не способствуют активному самоочищению приземного слоя воздуха [20]. Помимо загрязнения городские лесные почвы испытывают существенное негативное воздействие рекреационного лесопользования: вытаптывание живого напочвенного покрова, захламливание поверхности [21]. Исследования почв осуществлялись в выбранных городских лесных массивах размерами от 10 до 15 га, в каждом из них закладывали пробную площадь (ПП). Фоновая ПП располагалась на удалении более 150 км от городов

(рис. 1). Закладка ПП проводилась в соответствии с международной методикой ICP Forest [22] и общепринятыми методами полевого мониторинга лесных почв<sup>3,4</sup>. Всего было создано 13 ПП (табл. 1). Размер каждой ПП составлял 0,1 га (1000 м<sup>2</sup>). Следует отметить, что в городских лесах, которые располагались на удалении 2–5 км от промышленного источника загрязнения, доминирующим антропогенным воздействием являлось техногенное загрязнение, на территориях внутри жилых застроек обнаруживался высокий уровень рекреационной нагрузки.

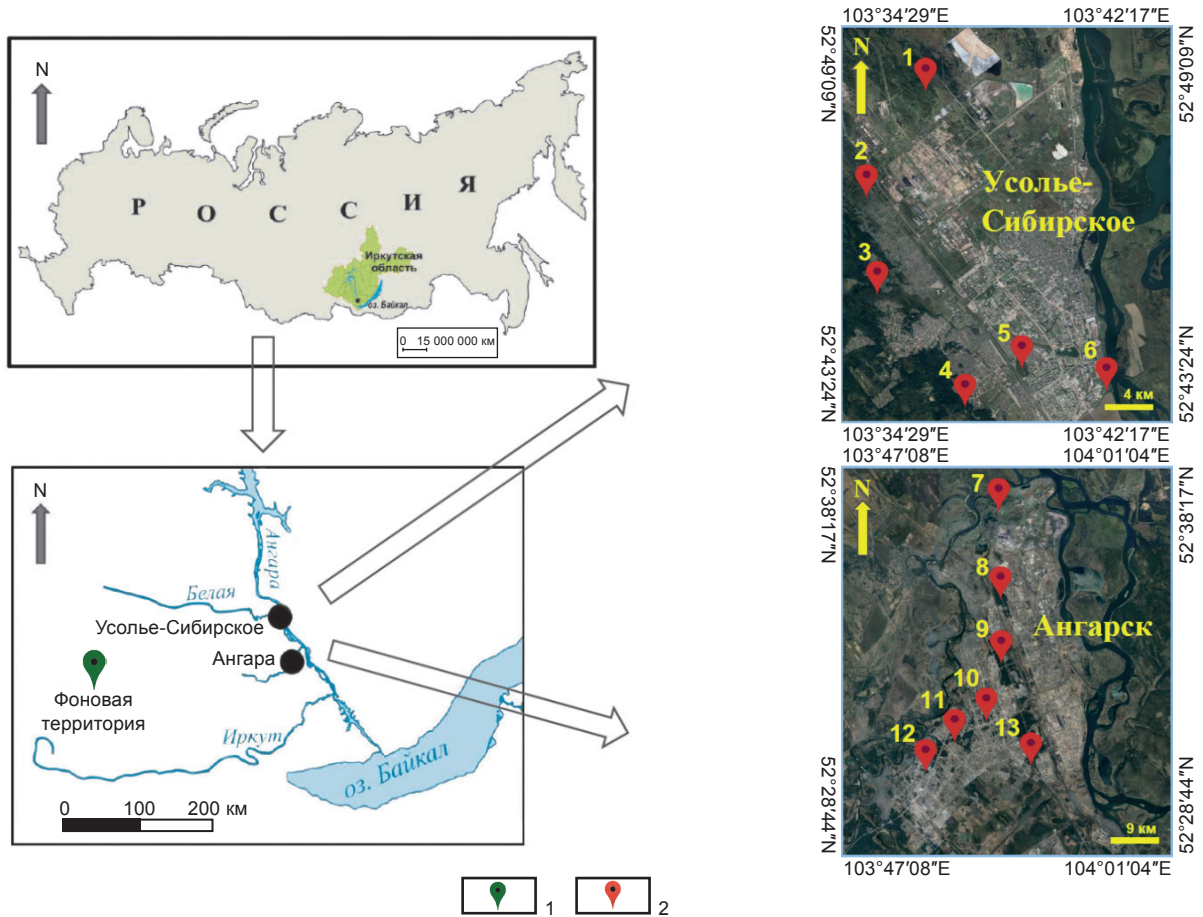
В городских сосново-березовых лесах были заложены почвенные разрезы глубиной до 1,5 м и проводилось описание почвенного профиля (рис. 2). Название типа почв и индексов горизонтов устанавливалось в соответствии с общепринятой классификацией и единым государственным реестром почвенных ресурсов России [23]. На каждой ПП в полевых условиях проводился отбор почвенных проб и изучались морфологические и физико-химические свойства (плотность сложения, влажность, пористость, аэрация) лесной подстилки, верхних гумусовых горизонтов и всех горизонтов почвенного профиля.

Эколого-функциональные свойства почв изучались по комплексу кислотно-основных, катионообменных, гумификационных показателей почв, миграции элементов-биогенов и элементов-поллютантов в горизонтах почвенного профиля<sup>5</sup> [24, 25]. Элементный химический состав почв определялся методами атомно-абсорбционной спектrophотометрии, фотоколориметрирования с использованием сертифицированных методов и приборного парка Сибирского института физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, центра коллективного пользования «Биоаналитика» и Республиканского аналитического центра (г. Улан-Удэ). Использовалось следующее высокотехнологичное оборудование: атомно-абсорбционный спектрофотометр AAnalyst 600 (PerkinElmer Life and Analytical Sciences, США), спектрофотометр UNICO 2100 (United

<sup>3</sup> Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв: учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Академический проект», 2007. 240 с. EDN: VRSIIR.

<sup>4</sup> Васильченко А.В. Почвенно-экологический мониторинг: учеб. пособие. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2017. 281 с.

<sup>5</sup> Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами / под ред. Н.Г. Зырина, С.Г. Малахова. М.: Гидрометеоиздат, 1981. 109 с.



**Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей на территориях городов Усолье-Сибирского и Ангарска:**  
1 – пробная площадь на городской территории; 2 – фоновая пробная площадь  
**Fig. 1. Map-diagram of sample plot location in the cities of Usolye-Sibirskoye and Angarsk:**  
1 – urban sample plot; 2 – background sample plot

**Таблица 1. Характеристика пробных площадей городских лесов**  
**Table 1. Characteristics of urban forest sample plots**

Номер ПП	Географические координаты	Доминирующее антропогенное воздействие	Тип/подтип почвы	Состав древостоя*
Усолье-Сибирское				
1	52°48'43"N; 103°34'27"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	6С4Б
2	52°47'09"N; 103°35'02"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	7Б3С
3	52°47'25"N; 103°38'33"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная маломощная	9С1Б
4	52°43'57"N; 103°36'59"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	8С2Б
5	52°44'10"N; 103°38'45"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная мощная	7С3Б
6	52°43'19"N; 103°41'09"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная среднемощная	7Б3С
Ангарск				
7	52°37'27"N; 103°53'54"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	7С3Б
8	52°34'47"N; 103°54'03"E	Техногенное загрязнение	Светло-серая лесная среднемощная	6С4Б
9	52°33'01"N; 103°54'08"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная маломощная	7С3Б
10	52°31'34"N; 103°52'13"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	6С4Б
11	52°31'09"N; 103°51'06"E	Рекреационная нагрузка	Светло-серая лесная среднемощная	7С3Б
12	52°29'10"N; 103°48'02"E	Рекреационная нагрузка	Серая лесная среднемощная	8С2Б
13	52°28'53"N; 103°57'14"E	Техногенное загрязнение	Серая лесная среднемощная	7С3Б
Фоновая территория				
–	52°10'29"N; 103°15'01"E	Отсутствует	Серая лесная мощная	7С3Б

*Примечание.* ПП – пробная площадь; \* – формулы древостоя представляют собой условные обозначения состава древесных пород в лесу; сумма долей деревьев равна 10 единицам (нормативному значению); С – сосна, Б – береза.



*Рис. 2. Городские сосново-березовые леса на серых лесных почвах (г. Ангарск)  
Fig. 2. Urban pine-birch forests located on grey forest soils (Angarsk city)*

Products & Instruments, Inc., США), анализатор вольтамперометрический ТА-Lab («ТомьАналит», Россия).

Для статистической обработки всех полученных данных применяли программу «Среда статистических вычислений R» и ее использование в Data Mining<sup>6</sup>. Вычислялись средние величины каждого параметра и их стандарт-

ные отклонения. Для установления корреляций между показателями использовали непараметрический коэффициент Спирмена. Проверку равенства средних значений в парных выборках проводили с помощью *t*-критерия. Достоверность различий оценивали с помощью критерия Манна – Уитни (при  $P \leq 0,05$ ). Все приведенные в данной работе значения

<sup>6</sup> Шипунов А.Б., Балдин Е.М., Волкова П.А., Коробейников А.И., Назарова С.А., Петров С.В. [и др.]. Наглядная статистика. Используем R!: учеб. пособие. М.: Изд-во ООО «ДМК Пресс. Электронные книги», 2012. 298 с. EDN: QOOUQJ.



показателей имеют статистически достоверные различия. Для дифференциации полученных данных применялся кластерный анализ, выполненный в программе StatSoft STATISTICA 10.0.1011. Для построения карт-схем применяли картографические программы: Surfer 23.1.162, CorelDRAW Graphics Suite X8 Portable, а также использовались электронные карты Google Earth (<https://www.google.ru/intl/ru/earth/>) и Google Maps (<https://www.google.ru/maps/>).

### Результаты исследования и их обсуждение

При натурном обследовании установлено, что в городских сосново-березовых лесах Усоля-Сибирского и Ангарска распространены два основных подтипа серых лесных почв – собственно серые лесные и светло-серые лесные почвы [23]. По международной классификации почв (WRB, от англ.: World reference base of soil resources) описанные подтипы относятся к Greyic Phaeozems Albic<sup>7</sup>. Почвенный профиль представлен совокупностью следующих горизонтов: A0 – A1 – A2 – A2B – B1 – B2 – BC – C, при этом зоны органической, гумусовой, элювиальной и иллювиальной аккумуляции веществ четко дифференцированы по глубине и не отличаются от расположения в почвенном профиле на фоновой территории. Вместе с тем выявлен ряд отличий городских почвенных профилей от фоновых по морфологическим признакам. В верхних слоях городских почв зафиксированы интенсивные потоки гумуса, которые распространены хаотично в виде фронтальных языков; минеральные горизонты имеют в основном плитчато-комковатую и комковатую структуру; в горизонтах присутствует белесая присыпка, часто наблюдается неоднородное окрашивание, присутствие сизых и серовато-бурых пятен и линз; текстурные минеральные горизонты имеют более светлые оттенки, по структуре они плитчатого строения и характеризуются повышенной водоудерживающей способностью. В ряде случаев наличие очень плотных текстурных горизонтов в городских серых лесных почвах приводит к развитию процесса антропогенного оглеения, что, как известно, значительно снижает плодородие почвы [26]. В целом морфологические признаки указывают на наличие

ряда неблагоприятных процессов в городских почвах, включающих разрушение строения почвенных агрегатов, развитие оглеения и солонцевания почв, нарушение деструкции органического вещества, изменение миграции гумусовых веществ, увеличение содержания антропогенных включений в горизонтах. Значительные отличия городских почв от фоновой почвы вызваны воздействием высокого или среднего уровня рекреационной нагрузки, поэтому негативные изменения наблюдаются прежде всего в лесной подстилке и верхних гумусово-аккумулятивных горизонтах.

Изменение эдафических условий служит определяющим фактором особенности произрастания деревьев и травянистых растений на городских территориях [21]. Как правило, древостои сосны и березы, произрастающие на городских почвах – это одноярусные, средневозрастные (50–70 лет), средние по высоте (16–25 м), негустые (полнота 0,3–0,4 ед.), часто встречаются ослабленные деревья со всевозможными механическими повреждениями. Травостой, как правило, средний по высоте, негустой, неоднородный, проективное покрытие составляет 60–70 %, общая численность видов колеблется от 15 до 26, при этом доля лесных видов составляет 65 %, доля сорных видов может достигать 20–40 %. Видами-доминантами травянистых являются: *Carex*, *Poa pratensis*, *Trifolium pratense*, *Ranunculus sceleratus*, *Polygonum aviculare*, *Achillea millefolium*, *Plantago depressa*, *Carum carvi*, *Phleum pratense*.

*Изучение детоксицирующей способности лесных почв.* Способность почвы выполнять детоксикацию в первую очередь связана с процессами аккумуляции и миграции биогеохимических потоков элементов и их соединений по почвенному профилю [27, 28]. Для оценки детоксицирующей способности лесных почв проводилось изучение таких показателей, как кислотность почвенной среды, содержание органических веществ (гумуса) и накопление элементов-загрязнителей, в особенности тяжелых металлов (ТМ), подвижных форм серы и хлора, по глубине почвенного профиля. При изучении актуальной кислотности почв установлено, что в лесных почвах городских территорий обнаруживается сдвиг реакции среды почвенных растворов в сторону щелоч-

<sup>7</sup> World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2014. 191 p.

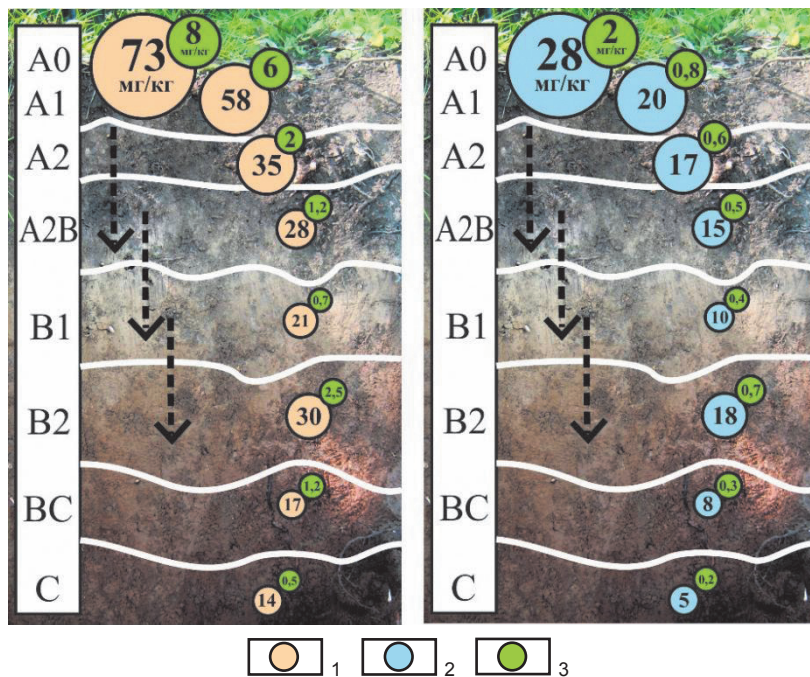


ных значений. Так, в органической подстилке наблюдается увеличение актуальной кислотности до значений рН (водн.) 7,8 при фоновом уровне 5,7, а в гумусовых горизонтах – до 8,1 при значении фона рН (водн.) 5,2. При этом подщелачивание почв вызывает четкое снижение уровня гидролитической кислотности – величины, которая свидетельствует об общем содержании всех кислотных компонентов (ионы железа, алюминия и др.) в почвенном растворе. Исследования показали, что даже при невысоком подщелачивании почв наблюдается выраженная тенденция снижения гидролитической кислотности. Между актуальной кислотностью почвенного раствора всех генетических горизонтов серых лесных почв и гидролитической кислотностью выявлена корреляционная зависимость ( $r = 0,83$ ,  $n = 118$ ). Значения гидролитической кислотности более стабильны, что позволяет наиболее точно определить уровень подщелачивания почв и оценить их потенциальную устойчивость к антропогенной нагрузке. Проведение лизиметрических исследований показало, что уровень загрязнения лесных почв ТМ, серой, хлором обусловлен двумя ключевыми педохимическими процессами – вертикальной миграцией элементов по почвенному профилю и аккумуляцией в органическом веществе. Миграция в значительной степени обусловлена изменением реакции почвенного раствора, а именно подщелачиванием верхних горизонтов почв и снижением щелочности с глубиной. Увеличение щелочности затрудняет мобильность ТМ и снижает их миграционную активность, вместе с тем увеличивается растворимость сульфат- и хлорид-ионов, повышая вероятность их переноса в нижние горизонты почвы. При биохимической аккумуляции элементы-загрязнители взаимодействуют с органическим веществом, образуя устойчивые соединения гумуса с металлами, что препятствует дальнейшему перемещению токсикантов в глубину почвы. Благодаря этому значительная доля загрязняющих веществ остается закрепленной в верхней части почвенного профиля, сохраняя относительно низкий уровень проникновения в нижние горизонты. При этом наблюдаемые процессы находятся в непрерывной геохимической взаимосвязи, которая определяет направленность детоксицирующей способности и сохранение оптимальных эколого-функциональных свойств почв.

На примере исследования физико-химической миграции сульфатов и хлоридов в почвенной толще лесных почв на территории г. Усолья-Сибирского показано высокое накопление токсикантов в гумусово-аккумулятивных горизонтах (A1, A2) и интенсивное иллювиальное перераспределение с глубиной вплоть до почвообразующих горизонтов (BC, C), располагающихся на глубине более 1,5 м (рис. 3).

Детальное изучение процессов миграции серы, поступающей в виде аэротехногенных выбросов диоксида серы на поверхность почвы, также выявило значительное перераспределение геохимического потока этого поллютанта в почвенном профиле. Показано, что в разных горизонтах почвенного профиля за счет их разных физико-химических свойств наблюдаются выраженные изменения в накоплении этого поллютанта. В горизонтах A0, A1, A2 осажденная и накопленная сера в виде сульфат-иона постепенно вымывается из органического вещества и поступает в минеральную фракцию горизонтов A2B, B1, откуда уже в составе легкорастворимых солей мигрирует до горизонта B2. Иллювиальные коллоиды минеральной фракции этого горизонта фиксируют большую часть сульфатов в виде гипса  $\text{CaSO}_4$  (накопление подтверждается результатами аналитического определения при его растворении раствором соляной кислоты), а другая их часть в процессе транзитного вымывания поступает в почвообразующие горизонты BC и C, где наблюдается дальнейшая их фиксация. Таким образом, техногенная сера активно вовлекается в миграционный поток в системе почвенных горизонтов, что обуславливает, с одной стороны, возможность ее миграции на разную глубину почв, а с другой – способствует ее фиксации в виде нерастворимых солей.

Изучение перераспределения биогеохимических потоков ТМ показало, что наибольшей хемосорбцией и детоксицирующей способностью по отношению к ТМ обладают лесная подстилка (A0) и верхние гумусовые горизонты (A1, A2, A2B), а также иллювиальные горизонты (B2), в которых фиксация ТМ происходит за счет минеральных коллоидов (табл. 2). Обнаружено, что в органическом веществе почв содержание подвижных форм ТМ может максимально превышать фоновые значения по свинцу до 30 раз, меди – до 16, кобальту и молибдену – до 10 раз, цинку –



**Рис. 3. Миграция подвижных (водорастворимых) форм серы и хлора по почвенному профилю серых лесных почв г. Усолья-Сибирского и фоновой территории:**  
1 – концентрация сульфат-иона в городских почвах; 2 – концентрация хлорид-иона в городских почвах;  
3 – концентрация сульфат- и хлорид-ионов в фоновых почвах

**Fig. 3. Migration of mobile (water-soluble) forms of sulfur and chlorine along the soil profile of grey forest soils of Ussolye-Sibirskoye and the background area:**  
1 – sulfate ion concentration in urban soils; 2 – chloride ion concentration in urban soils;  
3 – sulfate and chloride ion concentration in the background soils

до 8, кадмию и никелю – до 7 раз, хрому, стронцию и титану – до 5 раз. Высокие концентрации ТМ обусловлены аккумуляцией в гумусовом веществе верхних горизонтов, это подтверждается выявленной линейной зависимостью ( $R^2 = 0,78$ ) между суммой приоритетных ТМ ( $\Sigma$ свинец, кадмий, цинк, медь, мг/кг) и накоплением органического углерода в городских серых лесных почвах. Кроме того, возрастает сорбционная активность подвижных ионов (катионов) кальция, магния, калия, натрия почвенного поглощающего комплекса (ППК) иллювиальных горизонтов В2 по отношению к ионам элементов-поллютантов, что приводит к иммобилизации последних на геохимическом барьере вследствие образования соединений с низкой скоростью миграции, таких как гидроксиокомплексы цинка(II) калия, свинца(II) натрия, кадмия(II) натрия. В целом детоксицирующая способность городских лесных почв направлена на связывание и преобразование элементов-токсикантов в системе почвенного профиля, являясь важным механизмом ее устойчивости к антропогенным факторам окружающей среды. Необходимо учитывать, что при высоком уровне

загрязнения, превышающем емкость почвы к связыванию и преобразованию токсикантов, может произойти накопление загрязняющих веществ в почвенном профиле, что негативно скажется на состоянии окружающей среды. Поэтому мониторинг городских лесных почв, оценка их детоксицирующей способности и разработка мер по снижению антропогенной нагрузки являются важнейшими задачами для сохранения экологического равновесия в урбоэкосистеме.

*Изучение питательного режима лесных почв.* Исследование лесных почв на урбанизированных территориях Иркутской области показало, что их функционирование в условиях антропогенной нагрузки направлено не только на оптимальное накопление органического вещества, а также на поддержание пула питательных элементов и формирование сбалансированного газового состава при минерализации органического вещества. Отличительной особенностью городских серых лесных почв является сохранение хорошо структурированного гумусово-аккумулятивного слоя (до 15 см), что свидетельствует об активных процессах биогенной трансформации



**Таблица 2. Среднее\* содержание подвижных (кислоторастворимых, 1 М НСl) форм металлов, мг/кг, в лесной подстилке и горизонтах почвенного профиля в городских лесах Иркутской области и на фоновой территории**  
**Table 2. Average content of mobile (acid-soluble, 1 M HCl) forms of metals (mg/kg) in forest litter and soil profile horizons in urban forests of the Irkutsk region and in the background area**

Индекс горизонта почв	Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	Mn	Al	Cr	Ni	Co	Mo	Sr	Ti
Усолье-Сибирское													
A0	49,54	0,47	167,74	32,85	8063,82	624,35	6866,95	83,71	27,54	8,44	1,06	182,54	210,85
A1	32,51	0,18	49,15	9,39	4584,73	575,02	4015,40	9,24	11,15	7,45	0,22	40,10	70,56
A2	26,15	0,13	30,25	8,85	3984,10	536,67	3953,44	8,13	10,81	6,20	0,17	27,87	52,35
A2B	18,75	0,11	21,20	6,82	3372,87	375,67	2767,40	6,83	7,57	5,31	0,13	19,51	49,39
B1	14,97	0,07	16,85	4,86	2698,30	302,54	2213,92	5,46	6,05	4,25	0,11	15,61	38,51
B2	21,75	0,12	24,59	6,45	3722,80	435,78	3110,19	8,29	8,88	6,16	0,14	22,63	56,28
BC	13,17	0,06	14,85	3,95	2374,50	264,47	1848,25	4,11	5,33	3,48	0,10	13,74	34,77
C	11,45	0,05	12,98	3,24	2065,82	230,09	1494,98	3,58	3,82	2,54	0,07	11,75	29,25
Ангарск													
A0	30,05	0,44	160,65	37,50	8753,98	523,68	7485,85	91,14	39,35	9,10	1,45	142,51	154,02
A1	24,15	0,16	43,45	13,55	5340,13	506,95	4270,20	11,98	19,16	8,44	0,28	30,49	57,65
A2	18,25	0,12	27,20	10,48	5037,46	451,42	4386,95	10,49	13,86	7,53	0,21	21,97	39,58
A2B	11,98	0,08	18,31	7,34	3738,09	315,95	3070,84	7,45	9,70	6,37	0,17	15,38	33,85
B1	8,98	0,07	14,65	5,87	2990,47	252,79	2456,68	5,87	7,75	5,10	0,14	14,04	27,05
B2	12,57	0,10	17,45	8,51	4336,18	366,58	3562,18	8,74	11,25	7,39	0,19	19,39	40,26
BC	9,02	0,05	12,37	5,16	2631,61	224,46	2161,88	5,24	6,83	4,69	0,13	12,35	24,43
C	7,11	0,04	10,95	4,48	2289,50	193,54	1880,84	4,50	5,91	3,80	0,09	9,35	17,15
Фоновая территория													
A0	4,61	0,07	28,92	6,55	2236,75	202,04	1769,68	17,63	5,56	1,57	0,16	42,79	45,88
A1	1,91	0,04	7,78	2,04	2017,76	152,15	1645,24	2,66	2,71	1,05	0,04	8,31	16,70
A2	0,89	0,03	3,60	0,62	2586,09	106,31	1301,36	1,90	1,88	0,71	0,03	5,74	12,95
A2B	0,62	0,02	2,52	0,42	1810,26	74,42	910,95	1,33	1,31	0,49	0,02	4,02	9,09
B1	0,50	0,01	2,01	0,35	1448,21	59,53	728,73	1,07	1,05	0,40	0,01	3,21	7,27
B2	0,72	0,02	2,92	0,50	2098,35	86,32	1056,71	1,55	1,53	0,57	0,02	4,66	10,24
BC	0,44	0,01	1,77	0,31	1274,43	52,39	641,31	0,94	0,93	0,35	0,01	2,83	6,40
C	0,38	0,01	1,54	0,27	1108,75	45,58	557,94	0,76	0,81	0,29	0,01	2,41	5,52

Примечание. \*Ошибка средней величины составляет от 5 до 10 %.



растительных остатков, их минерализации и гумификации. На всех городских территориях содержание гумуса в верхних горизонтах A1, A2 лесных почв изменяется от 3,5 до 6,5 %, что меньше фоновых значений на 15–25 %. При этом городские лесные почвы характеризуются достаточным содержанием общего азота (до 0,51 %), подвижного фосфора (до 190 мг/кг) и калия (до 130 мг/кг).

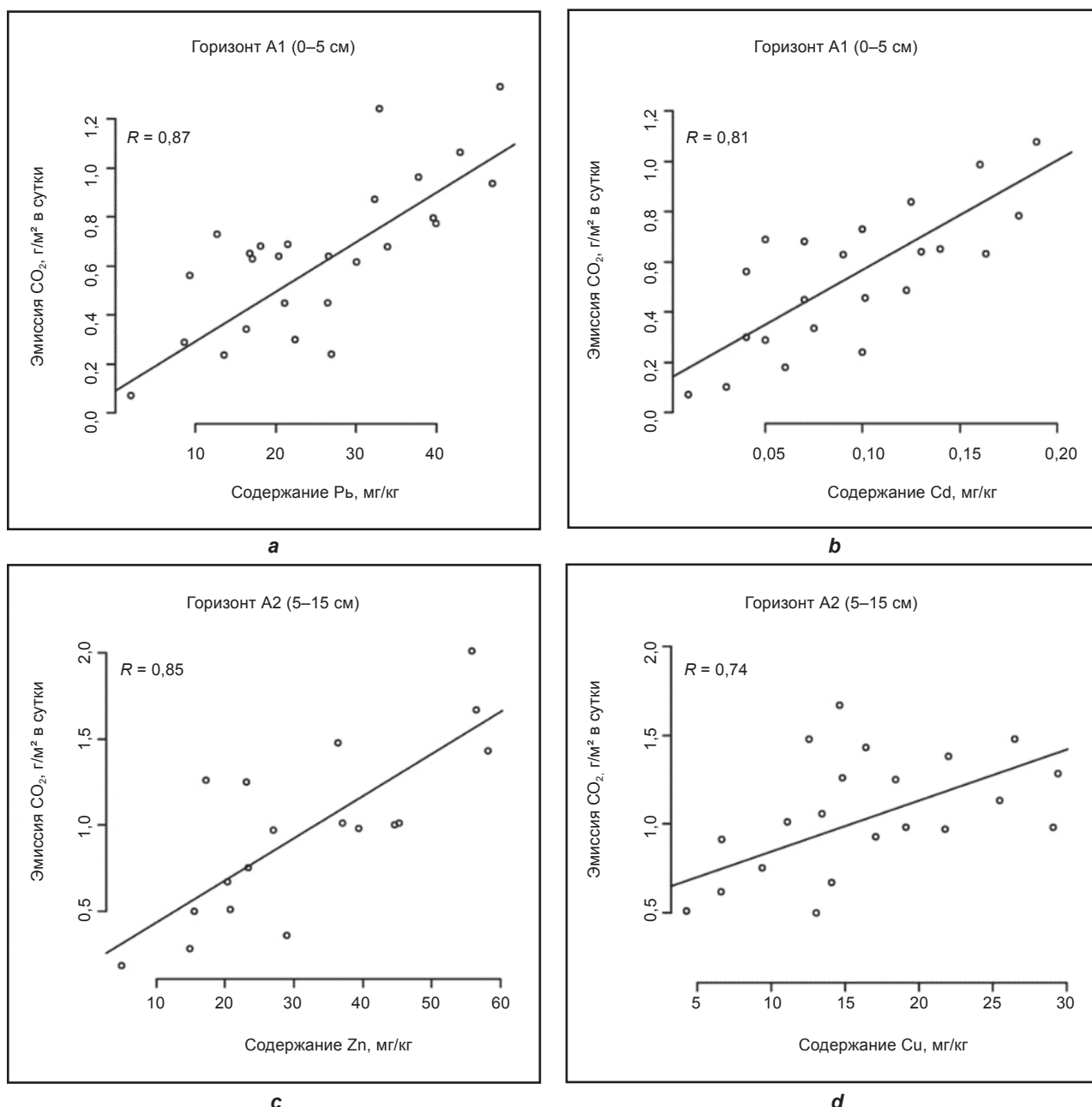
Показано, что большую роль в оптимизации состояния питательного режима почв играет эмиссионный поток «углекислый газ / кислород», связанный с минерализацией лесной подстилки и органического вещества. Данные свидетельствуют, что в целом углекислый газ из лесных почв городских территорий в 1,5–2,5 раза превышает фоновые значения, тогда как интенсивность эмиссии кислорода – в 1,5 раза ниже фона. Исследования показали, что при увеличении эмиссии углекислого газа, а значит, при усилении интенсивности разложения лабильных органических компонентов почвы наблюдается снижение содержания кислорода в припочвенном воздухе в сравнении с фоновым уровнем, особенно если верхние горизонты были нарушены и их водно-физические свойства изменены. Судя по результатам изучения соотношения потоков газов «углекислый газ/кислород», имеют место явные нарушения в газообмене почвы городских лесов. Обнаружено, что среди всех изученных почв светло-серые лесные почвы (подтип почв с наименьшим содержанием гумуса), которые формировались в условиях высокой рекреационной нагрузки, выделялись наиболее пониженным содержанием кислорода в почвенном воздухе, что, судя по всему, связано со снижением пористости почв и воздухопроницаемости при уплотнении, когда наблюдается развитие анаэробных условий. В таких условиях высокой рекреационной нагрузки обнаруживается увеличение эмиссии углекислого газа в атмосферный воздух на 15–25 %. Это связано со значительным уменьшением лесной подстилки в результате рекреационного вытаптывания и увеличением количества незакрепленных гумусовыми кислотами бикарбонатов, которые при химическом разложении создают увеличение эмиссионного потока углекислого газа в атмосферный воздух.

Установлено, что в условиях усиления эмиссионного потока углекислого газа из верхних горизонтов почв наблюдается снижение

общего азота на 25–40 %. Поэтому в соответствии с показателем соотношения C/N, большинство почв характеризуется низким обогащением гумуса азотом, значения C/N для них составляли 9,5–15,2, тогда как для фоновых – 5,6–8,5. Показатель C/N является одним из важнейших для оценки не только дегумификации, но и интенсивности минерализации почв. Чем меньше отношение углерода к азоту, тем лучше обеспеченность почв азотом и активнее процессы минерализации органического вещества. Исследования показали, что минерализация органического вещества городских почв значительно обусловлена влиянием загрязняющих веществ (рис. 4).

При исследовании выявлено, что повышенная интенсивность эмиссии углекислого газа показывает высокую корреляционную связь ( $R \geq 74$ ) с содержанием ТМ в гумусовых горизонтах. Это объясняется тем, что загрязняющие вещества вызывают подщелачивание органического вещества, а значит приводят к образованию большей доли легкогидролизуемых лабильных компонентов гумуса, при минерализации которого микроорганизмами наблюдается усиление эмиссии углекислого газа. Также установлено наличие прямых корреляционных связей между высоким соотношением C/N (когда в составе гумуса мало азота) и уровнем накопления ТМ. Это указывает на то, что в городских почвах высокие концентрации ТМ замедляют процессы разложения органического вещества до образования доступного азота, необходимого для активного функционирования микробных сообществ. Следствием этого становится нарушение естественного процесса минерализации органического вещества до стабильных, стойких к окислению, гумусовых соединений. В целом же полученные результаты позволяют заключить, что как рекреационная нагрузка, так и техногенное загрязнение оказывают значительное, сопоставимое между собой, негативное влияние на нарушение газообмена «углекислый газ / кислород», гумификацию органического вещества и нарушение элементного состава минерального режима лесных почв, что в конечном итоге приводит к ослаблению их эколого-функциональных свойств в условиях городской среды.

*Изучение буферных свойств лесных почв.* Изучение буферной способности почв проводилось для лесной подстилки (A0) и верхних гумусовых горизонтов (A1, A2), которые



**Рис. 4. Зависимость между эмиссией углекислого газа с поверхности гумусовых горизонтов почв (A1, A2) и накоплением подвижных (кислоторастворимых, 1 М HCl) форм тяжелых металлов в их составе:**

*a – свинца; b – кадмия; c – цинка; d – меди*

**Fig. 4. Relationship between carbon dioxide emission from the surface of humus horizons of soils (A1, A2) and accumulation of mobile (acid-soluble, 1 M HCl) forms of heavy metals in their composition:**  
*a – lead; b – cadmium; c – zinc; d – copper*

содержат основные запасы буферных компонентов почв и обладают максимальной аккумулятивной способностью по отношению к элементам-загрязнителям. Кроме этого, верхние горизонты служат удобными объектами для систематического мониторингового изучения буферной способности почв, что позволяет глубже понять биогеохимические механизмы этого эколого-функционального свойства

почв<sup>3</sup>. Буферная способность городских лесных почв определялась по комплексу параметров, в наибольшей степени отражающих способность почвы поддерживать оптимальное состояние в условиях антропогенного воздействия: актуальная кислотность, нарушенность органического вещества (содержание гумуса, скорость эмиссии углекислого газа с поверхности почвы), содержание обменных



катионов в ППК и физические характеристики почв (плотность сложения, аэрация). С целью унификации различающихся по цифровым значениям выбранных параметров проводилось нормирование относительно минимальных фоновых значений (минимальное значение для каждого показателя принималось за 10 баллов, максимальное – 100 баллов). В основу расчетов были положены формулы балльных оценок для показателей-стимуляторов и показателей-дестимуляторов<sup>6</sup>. Выбор двух разных формул связан с тем, что фоновые показатели могут принимать как максимальные, так и минимальные значения. Например, для расчета оценки содержания гумуса в почвах использовалась формула показателя-стимулятора, когда фоновому значению присваивалась оценка 100 баллов:  $B = 100 \times (X_i - X_{i_{min}}) / (X_{i_{max}} - X_{i_{min}})$ . Для расчета баллов накопления ТМ использовалась формула показателя-дестимулятора, когда фоновому значению присваивалось наименьшее значение баллов:  $B = 100 - 100 \times (X_i - X_{i_{min}}) / (X_{i_{max}} - X_{i_{min}})$ . После расчета индивидуальных баллов выполнялось их суммирование для каждой ПП городской территории и вычислялся общий оценочный балл:  $B_{total} = B_a + B_b + B_c + \dots B_n / N$ . Далее для дифференциации почв на пробных площадях по буферной способности рассчитанные баллы подвергались кластерному анализу. Данные были представлены в виде графического изображения – кластера, отображающего уровни сходства анализируемых почв на всех пробных площадях по буферной способности. Полученные результаты по-

зволили определить три градации буферной способности почв: высокая (100–80 баллов), средняя (79–50 баллов), низкая (49–30 баллов). Применение геоинформационной системы картографирования позволило построить в программе Surfer 23.1.162 карты-схемы, отражающие изменение буферной способности почв на территориях городов Ангарска и Усолья-Сибирского (рис. 5).

Исследования показали, что низкая буферная способность почв обнаружена в городских лесах, расположенных в глубине жилых застроек (чаще всего это территории на небольшом расстоянии от центра города и вблизи промышленных территорий). В почвах этих лесов наблюдается высокая плотность сложения и низкая аэрация верхних горизонтов, а также выраженная деструкция гумусового вещества, что приводит к значительному падению содержания органических кислот (в большей степени гуминовых форм) в гумусе и повышению щелочности почв до рН (водн.) 8,2. Кроме этого, в почвах наблюдаются неблагоприятные процессы, выражающиеся в нарушении формирования структурированности и минерализации гумусового слоя за счет увеличения с поверхности почв эмиссии углекислого газа до 2,5 раза и снижения эмиссии кислорода до 1,5 раза. Аккумулирующая способность этих почв к загрязняющим элементам главным образом определяется не хемосорбцией гумусовыми горизонтами (A1, A2, A2B), которые из-за своей небольшой мощности (10–15 см) не могут обладать высокой аккумулярующей способностью. Поэтому

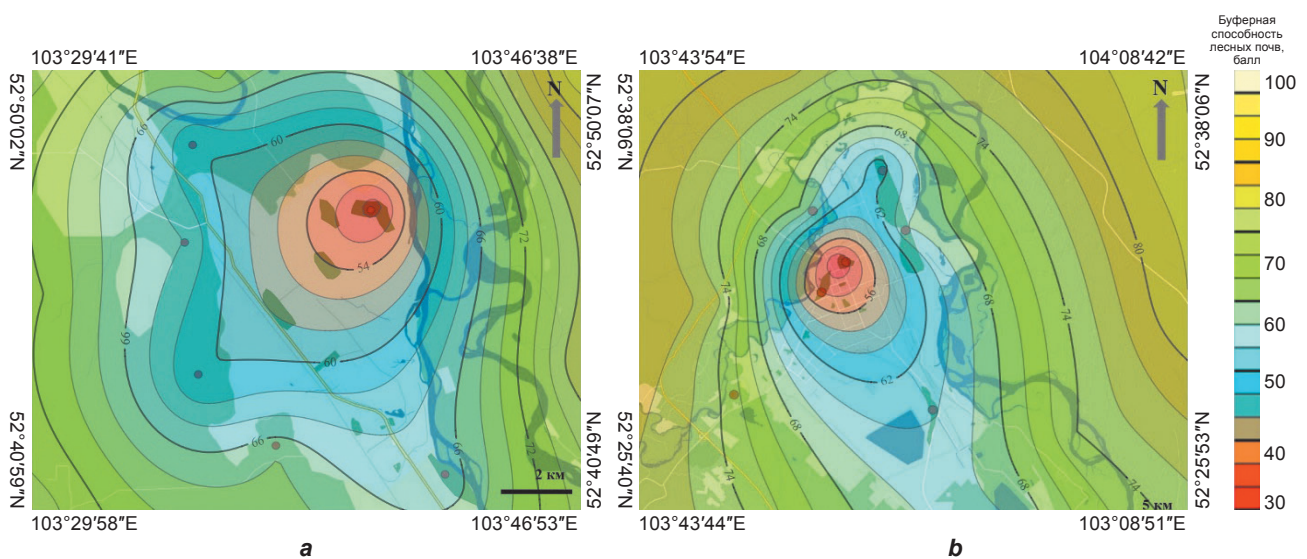


Рис. 5. Карты-схемы буферной способности почв городских лесов Усолья-Сибирского (а) и Ангарска (б)  
Fig. 5. Maps-diagrams of soil buffering capacity in urban forests of Ussolye-Sibirskoye (a) and Angarsk (b)



на территориях с низкой буферной способностью почв наблюдается небольшая доля закрепленных загрязняющих элементов в составе комплексных органических соединений гумусового вещества. В нарушенных почвах глинистые минералы, которыми они обогащены, выступают адсорбентами по отношению к элементам-загрязнителям, но эти связи менее прочные, чем связи с гумусом. В результате элементы высвобождаются в почвенный раствор, становясь более подвижными и доступными для растений.

Средняя буферная способность почв выявлена для большинства городских лесов Усолья-Сибирского и Ангарска, расположенных в основном в небольших жилых кварталах. На этих территориях воздействие негативных факторов (атмосферного загрязнения и рекреационной нагрузки) также оказывает выраженное влияние на формирование физико-химических свойств и изменение морфоструктурных параметров почв. В почвах обнаруживается сохранение тенденции к замедлению процесса минерализации органического вещества, что обусловлено снижением общего содержания гуминовых кислот и увеличением фульвокислот в составе гумуса. Направленность биогеохимических взаимодействий в почвах свидетельствует о наблюдающейся трансформации в соотношениях между обменными катионами калия, натрия, кальция и магния в ППК и увеличении их общей суммы. Исследования показали, что дисбаланс в составе ППК определяется в основном за счет увеличения обменного кальция и натрия – более чем в 10 раз, при этом в составе обменных катионов наблюдается химическое замещение кальция на натрий в обменно-поглощенном состоянии. Увеличение натрия в почвенном растворе приводит к выраженным морфологическим изменениям – под лесной подстилкой наблюдается образование солевых прослоек и линз антропогенного происхождения. Одним из основополагающих факторов снижения буферной способности почв по-прежнему остается увеличение доли щелочных компонентов в почвенном растворе и как итог – сохранение щелочности почв (рН (водн.) до 7,6).

Высокая буферная способность характерна для почв городских лесов, расположенных на окраинах городов, значительно удаленных от крупных автомагистралей и не попадающих под перенос промышленных эмиссий.

Для лесных почв этих территорий зарегистрированы высокие значения доли устойчивых гуминовых кислот, способных удерживать элементы в почвенном растворе и осуществлять аккумуляцию (детоксикацию) по отношению к ТМ. Почвы характеризуются достаточным содержанием органического вещества, мощной лесной подстилкой, благоприятными кислотнo-щелочными условиями и оптимальным составом ППК почвенного раствора. Таким образом, изучение буферной способности почв позволило описать эколого-функциональные особенности почв городских лесов и сделать заключение о природном потенциале их устойчивости в условиях промышленного загрязнения и рекреационной нагрузки. Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, направленных на углубленное понимание механизмов функционирования почв в условиях антропогенной нагрузки. Это может включать изучение влияния конкретных видов негативного воздействия, анализ динамики восстановления почв и разработку методов улучшения их функциональных свойств.

### Заключение

Впервые выполнена комплексная оценка эколого-функциональных свойств почв городских лесов Усолья-Сибирского и Ангарска Иркутской области с учетом трех экологических показателей: детоксицирующая способность, питательный режим и буферная способность. Установлена высокая связь между выбранными показателями, что отражает их функциональность в условиях антропогенного воздействия. Взаимосвязь между показателями подтверждает взаимообусловленность биогеохимических процессов в почвенной системе и важность учета всех эколого-функциональных свойств при оценке ее состояния. Результаты показали значительные различия в состоянии почв обследованных городских лесных массивов. Высокие значения детоксицирующей способности указывают на способность почв нейтрализовать токсические вещества, что особенно важно в условиях промышленного загрязнения. Отмечены территории с низким питательным режимом почв, что требует внимания к вопросам сохранения их плодородия. Оценка буферной способности позволила определить участки с различной степенью устойчивости к изменению внешних условий, что имеет решающее значение для прогнозирования и предотвраще-



ния деградации лесных почв в городах. В дальнейшем необходимо уделить особое внимание зонам с низкими показателями экологических функций почв, поскольку они требуют первоочередных действий по стабилизации и улучшению их состояния. Полученные результаты служат основой для разработки и реализации мероприятий по охране и восстановлению почв городских лесов с учетом особенностей каждой территории. Результаты исследования

углубляют понимание механизмов адаптации лесных почв к городским нагрузкам и их значимости для поддержания экологического баланса. Предлагаемый подход позволяет не только оценить текущее состояние почв городских лесов Иркутской области, но и спрогнозировать потенциальные изменения под воздействием антропогенных факторов, что важно для формирования эффективных мер охраны окружающей среды в урбозкосистемах.

#### Список источников

1. Мартынова Н.А., Пушкарева В.С. Экологическая устойчивость почв лесных ландшафтов г. Иркутска и его окрестностей // Почвы и окружающая среда. 2019. Т. 2. № 1. С. 1–14. <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.48>. EDN: SWIVXG.
2. Таран И.В., Спиридонов В.Н., Беликова Н.Д. Преобразование пригородных лесов. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2006. 145 с. EDN: QKXZCN.
3. Бурова Н.В., Феклистов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 263 с. EDN: QKQMAF.
4. Скрипальщикова Л.Н., Татаринцев В.И., Зубарева О.Н., Перевозникова В.Д., Стасова В.В., Грешилова Н.В. [и др.]. Экологическое состояние пригородных лесов Красноярска. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 179 с. EDN: OUBBIT.
5. Овеснов С.А., Ефимик Е.Г., Молганова Н.А. Антропогенная трансформация экосистем городских лесов г. Перми // Антропогенная трансформация природной среды. 2017. № 3. С. 157–159. EDN: ZUJVLX.
6. Данченко М.А. Эколого-экономическое обоснование лесохозяйственных мероприятий в городских лесах (на примере г. Томска). Томск: Изд-во ТГУ, 2011. 200 с. EDN: SYWRSZ.
7. Беднова О.В. Технология нормирования и индикации состояния лесных экосистем в условиях городских особо охраняемых территорий // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014. Т. 18. № 6. С. 36–51. EDN: TBQEXV.
8. Кичигин Н.В. Городские леса: режим охраны и использования // Журнал российского права. 2011. № 6. С. 28–34. EDN: OGYUBJ.
9. Потапова Е.В. Городские леса и парки г. Иркутска: привлекательность и состояние // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 8. № 2. С. 80–90. EDN: SIZUWL.
10. Пузаченко Ю.Г. Общие основания концепции устойчивого развития и экосистемных услуг // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2012. № 3. С. 22–39. EDN: PAGJLX.
11. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B.C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>. EDN: YNIOCT.
12. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 16–25. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
13. Шергина О.В., Миронова А.С., Тупицына Ю.С. Оценка экосистемных функций городских лесов по показателям почв и древесных растений // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 4. С. 447–458. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-447-458>. EDN: CPGZGO.
14. Копчик С.В., Копчик Г.Н. Оценка современных рисков избыточного накопления тяжелых металлов в почвах на основе концепции критических нагрузок (обзор) // Почвоведение. 2022. № 5. С. 615–630. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
15. Pouyat R.V., Yesilonis I.A., Szlavecz K., Csuzdi C., Hornung E., Korsós Z., et al. Response of forest soil properties to urbanization gradients in three metropolitan areas // *Landscape Ecology*. 2008. Vol. 23. Iss. 10. P. 1187–1203. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9288-6>. EDN: IOOZBK.
16. Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская Е.В., Кирюшина А.П. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 2. С. 35–45. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>. EDN: KOJVCN.
17. Sirkovich E.C., Walser S.L., Perdrial N., Richardson J.B. Evaluating trace elements in urban forest soils across three contrasting New England USA towns and cities by pXRF and mass spectrometry // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 336. P. 122441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122441>. EDN: DMXQXJ.
18. Scharenbroch B.C., Trammell T.L., Paltseva A., Livesley S.J., Edmondson J. Urban soil formation, properties, classification, management, and function // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022. Vol. 10. P. 987903. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.987903>.



19. Васенев В.И., Ауденхофен А.П.В., Ромзайкина О.Н., Гаджиягаева Р.А. Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177–1191. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100131>. EDN: XWNQRV.
20. Максютова Е.В., Башалханова Л.Б., Корытный Л.М., Сороковой А.А. Природно-климатические факторы в экологическом зонировании г. Иркутска // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 55–59. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-055-059>. EDN: FYRGWW.
21. Михайлова Т.А., Шергина О.В. Питательный статус древесных растений как интегральный показатель состояния урбоэкосистемы // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2011. Т. 4. № 2. С. 66–73. EDN: NXQRXR.
22. Cools N., De Vos B. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Hamburg: ICP Forests Programme Coordinating Centre, 2010. 477 p.
23. Алябина И.О., Андроханов В.А., Вершинин В.В., Волков С.Н., Ганжара Н.Ф., Добровольский Г.В. [и др.]. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0. М.: Гриф и К, 2014. 768 с. EDN: TNAMEB.
24. Воробьева Л.А. Химический анализ почв: монография. М.: Изд-во МГУ, 2012. 186 с. EDN: QLCNED.
25. Carter M.R., Gregorich E.G. Soil sampling and methods of analysis. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007. 1264 p.
26. Кузнецов В.А., Стома Г.В. Влияние рекреации на лесные городские ландшафты (на примере национального парка «Лосиный остров» г. Москвы) // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2013. № 3. С. 27–33. EDN: RGQSWP.
27. Molchanov V. Biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Russian Far East // Development and Modern Problems of Aquaculture: International scientific and practical conference. BIO Web of conferences (Divnomorskoe, 27 September – 4 October 2023). Divnomorskoe: EDP Sciences, 2024. Vol. 84. P. 01002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401002>. EDN: XIKTUZ.
28. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile // Norwegian Journal of Development of the International Science. 2021. Vol. 54. Iss. 1. P. 8–12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.

#### References

1. Martynova N.A., Pushkareva V.S. Environmental sustainability of soils in forest landscapes of Irkutsk and its environs. *The Journal of Soils and Environment*. 2019;2(1):1-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.31251/pos.v2i1.48>. EDN: SWIVXG.
2. Taran I.V., Spiridonov V.N., Belikova N.D. *Transformation of suburban forests*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2006, 145 p. (In Russ.). EDN: QKXZCN.
3. Burova N.V., Feklistov P.A. *Anthropogenic transformation of suburban forests*. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University; 2007, 263 p. (In Russ.). EDN: QKQMAF.
4. Skripalshchikova L.N., Tatartsev V.I., Zubareva O.N., Perevoznikova V.D., Stasova V.V., Greshilova N.V., et al. *Ecological state of suburban forests of Krasnoyarsk*. Novosibirsk: Geo; 2009, 179 p. (In Russ.). EDN: OUBBIT.
5. Ovesnov S.A., Efimik E.G., Molganova N.A. Anthropogenic transformation of urban forest ecosystems in Perm. *Anthropogenic transformation of natural environment. Antropogennaya transformaciya prirodnoj sredy*. 2017;3:157-159. (In Russ.). EDN: ZUJVLX.
6. Danchenko M.A. *Ecological and economic justification of forest management activities in urban forests (case study of Tomsk city)*. Tomsk: Tomsk State University; 2011, 200 p. (In Russ.). EDN: SYWRSZ.
7. Bednova O.V. Ecological standardization and indication technology of the forest ecosystems state in urban specially protected natural areas. *Forestry Bulletin*. 2014;18(6):36-52. (In Russ.). EDN: TBQEXV.
8. Kichigin N.V. Urban forests: protection and use regime. *Journal of Russian Law*. 2011;6:28-34. (In Russ.). EDN: OGYUBJ.
9. Potapova E.V. City woods and parks of Irkutsk: attractiveness and condition. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences*. 2014;8(2):80-90. (In Russ.). EDN: SIZUWL.
10. Puzachenko Yu.G. General basis of conception of sustainable development and ecosystem surveys. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2012;3:22-39. (In Russ.). EDN: PAGJLX.
11. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B.C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*. 2022;13:938481. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>. EDN: YNIOCT.
12. Kozhevin P.A. Soil “health” indicators in soil assessment (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;78:84-92. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-16-25>. EDN: FQQDNU.
13. Shergina O.V., Mironova A.S., Tupitsyna Y.S. Assessment of ecosystem functions of urban forests in terms of soil and trees. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(4):447-458. (In Russ.). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-447-458>. EDN: CPGZGO.
14. Koptsik S.V., Koptsik G.N. Assessment of current risks of excess heavy metals accumulation in soils based on the critical loads concept (Review). *Eurasian Soil Science*. 2022;5:615-630. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0032180X22050033>. EDN: SNJYDE.
15. Pouyat R.V., Yesilonis I.a.D., Szlavecz K., Csuzdi C., Hornung E., Korsós Z., et al. Response of forest soil properties to urbanization gradients in three metropolitan areas. *Landscape Ecology*. 2008;23(10):1187-1203. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9288-6>. EDN: IOOZBK.



16. Terekhova V.A., Kulachkova S.A., Morachevskaya E.V., Kiryushina A.P. A soil biodiagnosics methodology and features of some bioindication and biotesting methods (review). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2023;2:35-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>. EDN: KOJVCN.
17. Sirkovich E.C., Walser S.L., Perdrial N., Richardson J.B. Evaluating trace elements in urban forest soils across three contrasting New England USA towns and cities by pXRF and mass spectrometry. *Environmental Pollution*. 2023;336:122441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122441>. EDN: DMXQXJ.
18. Scharenbroch B.C., Trammell T.L., Paltseva A., Livesley S.J., Edmondson J. Urban soil formation, properties, classification, management, and function. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2022;10:987903. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.987903>.
19. Vasenev V.I., Oudenhoven A.P.E., Romzaykina O.N., Hajiaghaeva R.A. The ecological functions and ecosystem services of urban and technogenic soils: from theory to practice (a review). *Eurasian Soil Science*. 2018;10:1177-1191. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100131>. EDN: XWNQRV.
20. Maksyutova E.V., Bashalkhanova L.B., Korytny L.M., Sorokovoi A.A. Natural-climatic factors in ecological zoning of the city of Irkutsk. *Theoretical and Applied Ecology*. 2021;2:55-59. (In Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-2-055-059>. EDN: FYRGWW.
21. Mikhailova T.A., Shergina O.V. Nutritional status of arboreal plants as an integrated indicator reflecting urban ecosystem conditions. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology*. 2011;4:66-73. (In Russ.). EDN: NXQRXR.
22. Cools N., De Vos B. *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. Hamburg: ICP Forests Programme Coordinating Centre; 2010, 477 p.
23. Alyabina I.O., Androkhanov V.A., Vershinin V.V., Volkov S.N., Ganzhara N.F., Dobrovolsky G.V., et al. *Unified State Register of soil resources of Russia. Version 1.0*. Moscow: Grif i K; 2014, 768 p. (In Russ.). EDN: TNAMEB.
24. Vorobyova L.A. *Chemical analysis of soils*. Moscow: Moscow University; 2012, 186 p. (In Russ.). EDN: QLCNED.
25. Carter M.R., Gregorich E.G. *Soil sampling and methods of analysis*. Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2007, 1264 p.
26. Kuznetsov V.A., Stoma G.V. The influence of recreation on the city forest landscape (based on the example of national park "Losinuy ostrov"). *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*. 2013;3:27-33. (In Russ.). EDN: RGQSWP.
27. Molchanov V. Biogeochemical accumulation of trace elements in soils and plants of the Russian Far East. In: *Development and Modern Problems of Aquaculture: International scientific and practical conference. BIO Web of conferences*. 27 September – 4 October 2023, Divnomorskoe. Divnomorskoe: EDP Sciences; 2024, vol. 84, p. 01002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20248401002>. EDN: XIKTUZ.
28. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021;54(1):8-12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>. EDN: SMJVYI.

#### Информация об авторе / Information about the author



##### Шергина Ольга Владимировна,

кандидат биологических наук,  
ведущий научный сотрудник отдела устойчивости наземных экосистем,  
Сибирский институт физиологии и биохимии растений  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
г. Иркутск, Россия,

✉ sherolga80@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

##### Olga V. Shergina,

Cand. Sci. (Bio.),  
Leading Researcher of the Department of Terrestrial Ecosystem Stability,  
Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia,

✉ sherolga80@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

#### Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.



### Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
The author declares no conflicts of interests.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.  
The final manuscript has been read and approved by the author.*

### Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 02.09.2025 одобрена после рецензирования 16.09.2025; принята к публикации 25.09.2025.

The article was submitted 02.09.2025; approved after reviewing 16.09.2025; accepted for publication 25.09.2025.



### Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по всем направлениям наук о Земле и окружающей среде, недропользования и горных наук.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском и английском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

– электронными версиями всех документов (скан), в том числе:

авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;

авторского договора;

сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия места работы, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи, а также номера телефона автора, ответственного за коммуникацию;

акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;

– цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате PNG/JPEG;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

*Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!*

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu). Шрифт – Arial, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху и снизу – 2,5 см, слева и справа – 2 см, абзацный отступ – 0,6 см, ориентация страницы – книжная.

6. В журнал принимаются статьи трех типов:

**Научная статья.** Научная статья представляет собой оригинальную исследовательскую рукопись. Такого рода работа должна сообщать о результатах проведения научно обоснованных экспериментов и содержать значительный объем новой информации. Подготовка оригинальной статьи подразумевает использование самых свежих и актуальных источников в данной области. Структура подобной работы включает разделы «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем научной статьи – 3500 слов.

**Обзорная статья.** Обзорная статья предполагает проведение всестороннего анализа существующей литературы в области исследования, который выявляет текущие пробелы или проблемы. Такая работа должна быть критической и конструктивной и содержать рекомендации для будущих исследований. В ней не следует представлять никаких новых неопубликованных данных. Структура обзорной статьи может включать введение, другие необходимые разделы, обсуждение полученных результатов, а также заключение с указанием будущих направлений для возможных исследований. Рекомендуемый минимальный объем обзорной статьи – 4000 слов.

**Краткое сообщение.** Краткое сообщение представляет собой краткую статью, посвященную новому объекту, технологии, методу. Оно также может содержать предварительные результаты исследования либо краткое изложение полного исследования. В кратком сообщении должны быть описаны важные модификации или уникальные применения описанного метода. Краткие сообщения обычно содержат два-три рисунка и/или таблицу; раздел «Материалы и методы исследования» в них должен быть детализирован, чтобы обеспечить воспроизводимость



представленной работы, а обзорная часть сокращена. Структура подобной работы аналогична структуре научной статьи и включает такие разделы, как «Введение», «Материалы и методы исследования», «Результаты исследования», «Обсуждение полученных результатов» и «Заключение». Рекомендуемый минимальный объем краткого сообщения – 2500 слов. Допускается последующая публикация расширенного материала, изложенного в кратком сообщении, в нашем либо ином издании с обязательной ссылкой на первую статью.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском/китайском/монгольском) и английском языках, введение, цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул Microsoft Word посредством опции «вставка» – «уравнение».

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 170×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

Все надписи на рисунках должны быть редактируемыми и выполненными 8 кеглем шрифта Arial (основной) на языке текста статьи. В некоторых случаях размер шрифта может быть уменьшен до 5-6 pt. Если на рисунке имеются условные обозначения, они должны быть пронумерованы, а их расшифровку стоит выносить в экспликацию к рисунку. Буквенная нумерация рисунков выполняется 10 кеглем шрифта Arial (полужирный курсив) на английском языке. Помимо представления в тексте статьи рисунки должны быть дополнительно предоставлены отдельными файлами. Векторная графика дополнительно предоставляется в форматах CDR, AI с возможностью редактирования, при экспорте из других программ следует использовать формат PostScript (EPS) с разрешением 300 dpi. Фотографии, сканированные материалы представляются в формате TIFF или PNG/JPEG (сохранение в формате PNG/JPEG необходимо производить в максимально высоком качестве). Разрешение растровой графики должно составлять не менее 600 dpi для черно-белых рисунков и не менее 300 dpi для фотографий. Схемы, графики, диаграммы предоставляются с расширением .xls (MS Excel).



13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте.

Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, при этом минимум 50 % списка рекомендуется занимать материалами, вышедшими в течение последних 5 лет, в том числе не менее 5 источников должны составлять статьи из иностранных журналов. Самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников, самоцитирование журнала рекомендуется свести до минимума.

В списке литературы допускаются ссылки на источники на русском и английском языке: на статьи из научных журналов, из сборников материалов научных конференций, из неперIODических сборников научных статей, на книги, посвященные научным исследованиям, а также авторские патенты. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в ядро РИНЦ (Russian Science Citation Index, Web of Science Core Collection, Scopus).

Не допускаются ссылки на нормативные правовые акты (законы, кодексы, указы, положения и пр.), учебные издания (учебники, учебные пособия, конспекты лекций, методические указания и т. д.), справочные издания (справочники, словари и энциклопедии), диссертации и авторефераты, геологические карты, а также страницы электронных ресурсов, не имеющие конкретного авторства. При необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске.

14. Список литературы составляется в двух вариантах. Первый вариант (список источников) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008. Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. Для каждого из соавторов в конце статьи прописывается индивидуальный вклад, который выбирается из следующего списка: разработка концепции; разработка методологии; курирование данных; формальный анализ; получение финансирования; проведение исследования; административное руководство исследовательским проектом; предоставление ресурсов; разработка программного обеспечения; научное руководство; валидация результатов; визуализация; написание черновика рукописи; редактирование рукописи.

16. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография, конфликт интересов.

17. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

18. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

19. Редакция оставляет за собой право на научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

20. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

21. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

### **Внимание! Публикация статей является бесплатной.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте в качестве авторов, рекламодателей и читателей.*

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Академика Курчатова, 3, каб. 207 (институт «Сибирская школа геонаук», Иркутский национальный исследовательский технический университет).

Главный редактор Александр Вадимович Паршин, тел.: +7 (902) 7666990, e-mail: sarhin@geo.istu.edu.  
Заместитель главного редактора Лариса Ивановна Аузина, e-mail: lauzina@mail.ru.

Статьи следует направлять ответственному секретарю Марии Николаевне Долгих через личный кабинет на сайте [www.nznj.ru](http://www.nznj.ru) или по электронной почте [nzn@istu.edu](mailto:nzn@istu.edu); тел.: +7 (952) 6214436, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.



Образец оформления статьи

УДК 549.09

## Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

Е.М. Курчевская<sup>а</sup>, М.В. Яхно<sup>б✉</sup>, А.Е. Сенченко<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», Иркутск, Россия

<sup>б</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Резюме.** Цель. Цель данного исследования заключается в изучении технологических типов руд Томинского месторождения меди, а также минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфирового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитово-формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

**Ключевые слова:** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

**Финансирование:**

**Благодарности:**

## Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

Elena M. Kurchevskaya<sup>а</sup>, Marina V. Yakhno<sup>б✉</sup>, Arkady Y. Senchenko<sup>с</sup>

<sup>а,с</sup>NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia

<sup>б</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract. Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition.



Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

**Keywords:** Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

**Funding:**

**Acknowledgements:**

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение), **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** (references), **вклад авторов** (contribution of the authors) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

#### Информация об авторах / Information about the authors

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Курчевская Елена Михайловна,**  
старший научный сотрудник,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

**Elena M. Kurchevskaya,**  
Senior Researcher,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
kurchevskaya@tomsgroup.ru  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Яхно Марина Владиславовна,**  
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,  
Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

**Marina V. Yakhno,**  
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russia,  
✉ ymar@istu.edu  
ORCID

Портретное  
фото автора  
(4×4 см)

**Сенченко Аркадий Евгеньевич,**  
генеральный директор,  
НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,  
г. Иркутск, Россия,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

**Arkady E. Senchenko,**  
CEO,  
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,  
Irkutsk, Russia,  
senchenko@tomsgroup.ru  
ORCID

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

**Том 48 № 3 (92) 2025**

Дизайнер А.А. Хохряков  
Редактор Ю.А. Егорова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Компьютерная верстка Ю.В. Макаровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.09.2025 г. Формат 60×90/8.  
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,75.  
Тираж 500 экз. Зак. 86. Поз. плана 4н

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83А

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический университет»,  
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

