МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ДЕЛО. ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.832 (035.3) DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-58-65

Государственные стандартные образцы состава и свойств радиоактивных рудных тел

Мирошниченко И. В.[1], Глушкова Т. А.[2], Талалай А. Г.[2], Шинкарюк И. Е.[2]*
[1] АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург, Россия
[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: shinkaryuk64@inbox.ru

Реферат

Введение. *Метрологическое обеспечение геологоразведочных работ играет ключевую роль в повышении точности и достоверности результатов измерений, особенно при геофизических исследованиях скважин. Применение стандартных образцов (СО) помогает осуществлять эффективную калибровку и аттестацию оборудования, используемого в полевых условиях, горнопромышленной геологии и горной геофизике.*

Цель работы *– рассмотреть и проанализировать методику и технологию изготовления стандартных образцов, используемых в радиометрических методах каротажа, и выработать меры по улучшению качества и точности СО.*

Методика изготовления стандартных образцов. *Для достижения высокого уровня метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа необходимо и достаточно иметь шесть стандартных образцов, пересеченных скважиной. Материалы для изготовления СО должны отвечать строгим требованиям по качеству и однородности состава. Чаще всего используются урановые, ториевые и калиевые руды, а также химически чистые соединения, такие как хлористый калий и двуокись тория. Максимальный размер частиц не должен превышать 5 мм. Укладку материала необходимо выполнять аккуратно во избежание образования пустот и неоднородного распределения радионуклидов. Качество изготовленных стандартных образцов проверяется специальными методами, направленными на оценку однородности и стабильности материала.*

Результаты и их анализ. *Полученные результаты показали, что правильная технология изготовления и аттестации СО позволяет обеспечить высокую точность и стабильность измерений, что является залогом успешной реализации геологоразведочных работ.*

Выводы. *Использование полного комплекта СО позволяет достичь высокой точности и достоверности результатов измерений, что чрезвычайно важно для современной геологоразведочной практики, горнопромышленной геологии и горной геофизики.*

Ключевые слова: *стандартные образцы; радиометрические методы каротажа; горнопромышленная геология; горная геофизика; метрологическое обеспечение; точность измерений; контроль качества.*

Введение. Метрологическое обеспечение геологоразведочных работ играет ключевую роль в повышении точности и достоверности результатов измерений. Особенно важное значение оно приобретает при выполнении сложных исследовательских задач, таких как каротаж методом мгновенных нейтронов деления,

гамма-каротаж и спектрометрический гамма-каротаж. Правильное применение стандартных образцов (СО) позволяет минимизировать погрешности и получать объективные данные о составе и характеристиках горных пород [1–3].

Согласно исследованию И. М. Хайковича [1], применение стандартных образцов на базе естественных полигонов существенно повышает качество и надежность геофизических измерений. Такие образцы помогают осуществлять эффективную калибровку и аттестацию оборудования, используемого в полевых условиях [4, 5].

Исторически возникновение и развитие СО можно проследить с середины прошлого века, когда впервые появилась необходимость калибровки и градуировки геофизической аппаратуры. Сегодня СО активно применяются не только в России, но и в зарубежных странах, таких как США, Канада и Австралия, где геологоразведочная отрасль получила активное развитие [3–5].

Актуальность. Особое внимание стоит уделить современным объектам, где применяются СО [6–9]. Например, в Свердловской области в пос. Верхняя Сысерть функционирует специализированный полигон стандартных образцов, предназначенный для метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа. Еще один известный объект – петербургский «Территориально-комплексный полигон», расположенный в пос. Мельничный Ручей Всеволожского района Ленинградской области [1]. Эти объекты подтверждают актуальность и востребованность СО в современных геологоразведочных работах [10, 11]. Применение стандартных образцов является незаменимым инструментом для калибровки и градуировки аппаратуры радиометрических методов каротажа, таких как гамма-каротаж (ГК), спектрометрический гамма-каротаж (СГК) и каротаж методом мгновенных нейтронов деления (КНД-М) [8, 12–14].

Цель работы – рассмотреть и проанализировать методику и технологию изготовления стандартных образцов, используемых в радиометрических методах каротажа, а также предложить рекомендации по улучшению качества и точности СО, что чрезвычайно важно для повышения эффективности геологоразведочных работ и горной геофизики.

Методика изготовления стандартных образцов. ***Набор стандартных образцов.*** Для обеспечения высокого уровня метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа необходимо и достаточно иметь шесть стандартных образцов, пересеченных скважиной. Каждый СО имеет определенные характеристики и предназначен для решения конкретных задач метрологического обеспечения, они представлены в табл. 1.

Выбор материалов и компонентов для СО. Материалы для изготовления СО должны отвечать строгим требованиям по качеству и однородности состава. Чаще всего используются урановые, ториевые и калиевые руды, а также химически чистые соединения, такие как хлористый калий KCl и двуокись тория ThO_2. Эти материалы подбираются таким образом, чтобы обеспечить точное воспроизведение условий естественного залегания и исключить посторонние примеси.

Размер частиц материала имеет огромное значение. Согласно ГОСТ 8.315-97, максимальный размер частиц не должен превышать 5 мм. Более крупная фракция может вызвать неоднородность состава и ухудшение точности измерений [1]. Наилучшие результаты получаются при использовании мелкой фракции, которая равномерно распределяется по всему объему СО.

Таблица 1. Характеристики шести стандартных образцов и решаемые с их помощью задачи метрологического обеспечения
Table 1. Characteristics of 6 reference materials and the metrological assurance tasks solved with their assistance

Стандартный образец	Определяемые параметры	Аттестуемые характеристики	
		основные	дополнительные
Урановый СО (СРРТ-U)	Состав уранового рудного тела (СУРТ)	Массовая доля урана	Массовые доли тория и калия Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде Коэффициент нарушения радиоактивного равновесия между радием и ураном Коэффициент влажности Плотность
Ториевый СО (СРРТ-Th)	Состав ториевого рудного тела	Массовая доля тория	Массовые доли урана и калия Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде Коэффициент влажности Плотность
Калиевый СО (СРРТ-К)	Состав калиевого рудного тела	Массовая доля калия	Массовые доли урана и тория Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде Коэффициент влажности Плотность
Смешанный СО (СРРТ-См)	Состав уранового, ториевого и калиевого рудного тела	Массовые доли калия, урана и тория Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде Коэффициент влажности Плотность	–
Урановый СО повышенного влагосодержания (СОСВУРТ)	Состав и свойства уранового рудного тела с повышенным влагосодержанием	Массовая доля урана Коэффициент влажности Плотность	Массовые доли тория и калия Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде Коэффициент нарушения радиоактивного равновесия между радием и ураном
Фоновый СО (ССФРТ)	Состав и свойства рудного тела с содержанием урана ниже кларкового значения и с повышенной влажностью	Массовая доля урана Коэффициент влажности Плотность	Массовые доли тория, калия и радия Эффективный атомный номер Коэффициент приведения к нормальной среде

Контроль влажности материала также важен, так как она влияет на плотность и стабильность состава. Оптимальная влажность достигается путем предварительного увлажнения материала и постоянного контроля этого параметра в процессе изготовления.

Технология подготовки и укладки материала. После выбора и подготовки материалов настает этап укладки материала в емкости для СО. Процесс укладки включает несколько последовательных шагов:

– подготовка емкости – внутреннюю поверхность емкости покрывают антикоррозийной мастикой и полиэтиленовой пленкой, чтобы предотвратить коррозию металла и обеспечить чистоту материала;

– укладка материала – материал засыпается слоями по 7–10 см, каждый слой тщательно утрамбовывается; поверхность предыдущего слоя покрывается специальной пленкой с отверстиями, что предотвращает образование воздушных зазоров и улучшает сцепление слоев;

– контроль однородности – на каждом этапе укладки материал проверяется на однородность с помощью сцинтилляционного гамма-радиометра; это позволяет выявить возможные дефекты и устранить их на ранней стадии.

Укладка материала должна выполняться аккуратно, чтобы избежать образования пустот и неоднородного распределения радионуклидов. Для этого рекомендуется использовать ручное или механизированное трамбование, а также регулярно контролировать однородность материала [2]. Согласно руководящим документам, правильное выполнение процедур укладки и уплотнения материала обеспечивает стабильные показания и длительную службу СО.

Контроль качества и аттестация СО. Качество изготовленных стандартных образцов проверяется специальными методами, направленными на оценку однородности и стабильности материала. Важно убедиться, что материал внутри СО равномерно распределен и сохраняет стабильность показателей в течение длительного периода эксплуатации.

Контроль качества СО включает следующие этапы:

– оценка однородности – проверка однородности распределения радионуклидов в материале с помощью сцинтилляционного гамма-радиометра;

– анализ влажности и плотности – влажность и плотность материала проверяются аттестованными методами;

– испытания на стабильность – проводятся эксперименты, подтверждающие постоянство характеристик СО в течение срока службы.

Особо важно регулярно проводить проверки однородности и стабильности СО, так как любые отклонения могут негативно влиять на точность измерений [1].

Методы контроля однородности и стабильности. Контроль однородности и стабильности стандартных образцов является критически важным этапом, обеспечивающим точность и надежность измерений. Основные методы контроля включают:

– измерение массовой доли радионуклидов сцинтилляционным гамма-радиометром (уран, торий, калий и другие элементы);

– анализ влажности и плотности с помощью аттестованных методов;

– тестирование стабильности характеристик СО в течение срока службы; если СО теряет стабильность, его заменяют или ремонтируют.

Регулярный контроль однородности и стабильности СО является залогом точности и надежности измерений, необходимо проводить тестирование СО один раз в полгода, чтобы убедиться в неизменности их характеристик [1].

Аттестация и поддержание качества СО. Процедура аттестации стандартных образцов подразумевает проведение необходимых лабораторных анализов и оценок, подтверждающих соответствие установленным стандартам, этот процесс включает:

– лабораторные исследования – выполняются химические и физические анализы, подтверждающие заданные характеристики СО.

– свидетельствование результата – выдается сертификат или протокол аттестации, подтверждающий пригодность СО для использования.

Аттестация СО является обязательным элементом метрологического обеспечения, позволяя снизить риск ошибок и обеспечить надежность измерений [1].

Результаты. В статье представлена методика и технология изготовления стандартных образцов для радиометрических методов каротажа (ГК, СГК, КНД-М). Рассмотрены вопросы выбора материалов, подготовки и укладки рудного материала, контроля однородности и стабильности СО, а также процедуры аттестации и подтверждения качества СО [15–16].

Правильные технологии изготовления и аттестации СО позволяют обеспечить высокую точность и стабильность измерений, что является залогом успешной реализации геологоразведочных работ и горнопромышленной геологии [17]. Выбор материалов и компонентов для СО, тщательная подготовка и укладка материала, а также регулярный контроль качества и аттестация являются необходимыми условиями для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов измерений.

Выводы. Для надежного метрологического обеспечения радиометрических методов каротажа рекомендуется использовать набор из шести стандартных образцов различного состава.

Урановый СО (СРРТ-U) используется для градуировки аппаратуры каротажа методом мгновенных нейтронов деления. Ториевый СО (СРРТ-Th) – для калибровки аппаратуры спектрометрического гамма-каротажа. Калиевый СО (СРРТ-К) – для оценки содержания калия и других микроэлементов в породах. Смешанный СО (СРРТ-См) – универсальный образец для комплексной калибровки аппаратуры. Урановый СО повышенного влагосодержания (СОСВУРТ) подходит для точного учета влияния влажности. Фоновый СО (ССФРТ) воспроизводит естественный фон и используется для калибровки аппаратуры гамма-каротажа.

Использование полного комплекта СО позволяет достичь высокой точности и достоверности результатов измерений [18, 19], что чрезвычайно важно для современной геологоразведочной практики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хайкович И. М. Стандартные образцы на базе естественных полигонов в системе метрологического обеспечения полевых геофизических методов // Стандартные образцы. 2009. № 2. С. 22–30.

2. Хайкович И. М., Шашкин В. Л. Опробование радиоактивных руд по гамма-излучению. Теория и методика. М.: Энергоатомиздат. 1982. 160 с.

3. Penny R., Stevens D. Prompt fission neutron (PFN) borehole logging technology, comparison with gamma logging techniques // AusIMM International Uranium Conference. Adelaide, June 2010. 27 p. URL: https://hotcopper.com.au/data/oldanns/2010/UXA/b16fca79-56a1-4094-9d62-8a84a181a601-UXA595889.pdf (дата обращения: 10.08.2025)

4. Skidmore C. Borehole wire-line logging for uranium // SMEDG Symposium. 11 September, 2009. 33 p. URL: https://www.smedg.org.au/Sym09/Skidmore.pdf (дата обращения: 10.08.2025)

5. Булашевич Ю. П. К теории нейтронного каротажа // Известия АН СССР. Серия Геофизика. 1951. Т. 1. № 3. С. 31–36.

6. Давыдов Ю. Б. Теория геофизических исследований скважин (теория, методика, интерпретация). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2015. 632 с.

7. Демехов Ю. В., Румянцев Д. Р., Талалай А. Г. Технология каротажа нейтронов деления. Алматы: АО «НАК «Казатомпром», 2016. 161 с.

8. Демехов Ю. В., Талалай А. Г., Шинкарюк И. Е. Система качества ядерногеофизических исследований скважин. Алматы: АО «НАК «Казатомпром», 2016. 116 с.

9. Хайкович И. М., Язиков В. Г. Каротаж при изучении и освоении месторождений урана. Томск: ТПУ, 2015. 158 с.

10. Способ определения длины замедления быстрых нейтронов в горных породах, пересеченных скважиной: пат 2164696 Рос. Федерация: № 97104611/28, заявл. 26.03.1997, опубл. 27.03.2001. 11 с.

11. Кучурина О. Е. Влияние физико-геометрических факторов на точность определения длины замедления по данным ННК-НТ // Техногенез и экология. 1996. Вып. 3. С. 145–159.

12. Bivens H. M., Smith G. W., Jensen D., Jacobs E. L., Rice L. Pulsed neutron uranium borehole logging with epithermal neutron dieaway // Explorations of Uranium Ore Deposits: Proc. Symp. Vienna, 1976. P. 45–54.

13. Czubek J. A. Pulsed neutron method for uranium well logging: report N 732/ph. Crakow: Institute of Nuclear Physics, 1971. 55 p.

14. Czubek J. A., Zoskiewer I. Optimum conditions for uranium detection in delayed neutron well logging // Symp. Exploration of Uranium Ore Deposits. Vienna, 29 March–2 April. Cracow, 1976. 827 p.

15. Давыдов Ю. Б., Талалай А. Г., Шинкарюк И. Е. Технологические комплексы геофизических методов при поисках и разведке минерального сырья. Екатеринбург: УГГУ, 2019. 352 с.

16. Kornilkov S. V. Mineral resources strategy and scientific-based management // IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 991. Art. 012021. DOI: 10.1088/1755-1315/991/1/012021

17. Корнилков С. В. В ногу со временем // Проблемы недропользования. 2024. № 1(40). С. 15–25. DOI: 10.25635/2313-1586.2024.01.015

18. Корнилков С. В., Дмитриев А. Н., Пелевин А. Е. О современных подходах к поддержанию и развитию минерально-сырьевой базы региона // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. науч. тр. Института горного дела УрО РАН. Вып. 6(96). Екатеринбург: УрО РАН, 2024. С. 70–80.

19. Гуман О. М., Макаров А. Б., Мусина О. М. Особенности инженерных изысканий при освоении рудных месторождений в Уральском регионе // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2012. № 1. С. 134–137.

Поступила в редакцию 11 августа 2025 года

Сведения об авторах:

Мирошниченко Иван Владимирович – инженер АО «ОКБ «Новатор». E-mail: apache6318@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-9867-9898

Глушкова Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: nedra@uralnedra.ru; https://orcid.org/0000-0003-2748-1638

Талалай Александр Григорьевич – доктор геолого-минералогических наук, доцент, заведующий кафедрой геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: groupnedra@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8986-1226

Шинкарюк Ирина Евгеньевна – заведующая лабораторией кафедры геофизики Уральского государственного горного университета. E-mail: shinkaryuk64@inbox.ru; https://orcid.org/0000-0002-1561-246X

DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-65

State reference materials of composition and properties of radioactive ore bodies

Ivan V. Miroshnichenko[1], Tatiana A. Glushkova[2], Aleksandr G. Talalai[2], Irina E. Shinkariuk[2]
[1] JSC Experimental Design Bureau Novator (JSC OKB Novator), Ekaterinburg, Russia.
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Metrological assurance of prospecting is key to of measurement results accuracy and reliability improvement, especially in well logging. Reference materials help to effectively calibrate and certify equipment used in field, mining geology, and mining geophysics.*

Research objective *is to consider and analyze the methods and technology of producing reference materials applied in radiometric logging and develop methods for reference materials quality and accuracy of the reference material.*
Methodology *for reference materials preparation. To ensure a high level of metrological assurance for radiometric logging, it is necessary and sufficient to have six reference material intersected by a borehole. The reference materials must meet strict quality and composition homogeneity requirements. Most often, uranium, thorium and potassium ores are used, as well as chemically pure compounds such as potassium chloride and thorium dioxide. The maximum particle size should not exceed 5 mm. The material must be laid carefully to avoid voids and inhomogenious radionuclides. The quality of the reference materials manufactured is tested using special methods aimed at assessing the homogeneity and stability of the material.*
Results and analysis. *The obtained results showed that the correct technology of manufacturing and certification of the reference materials allows for high accuracy and stability of measurements, which is key to successful prospecting.*
Conclusions. *The use of a complete set of reference materials allows for high accuracy and reliability of measurement results, which is essential for modern prospecting practice, mining geology, and mining geophysics.*

Keywords: *reference materials; radiometric logging; mining geology; mining geophysics; metrological assurance; measurement accuracy; quality control.*

REFERENCES

1. Khaikovich I. M. Standard samples based on natural polygons in the system of metrological support of field geophysical methods. *Standartnye obraztsy = Reference Materials.* 2009; 2: 22–30. (In Russ).
2. Khaikovich I. M., Shashkin V. L. Sampling radioactive ore for gamma-radiation. *Theory and methods.* Moscow: Energoatomizdat Publishin; 1982. (In Russ.)
3. Penny R., Stevens D. Prompt fission neutron (PFN) borehole logging technology, comparison with gamma logging techniques. In: *AusIMM International Uranium Conference.* Adelaide, June 2010. 27 p. Available from: https://hotcopper.com.au/data/oldanns/2010/UXA/b16fca79-56a1-4094-9d62-8a84a181a601-UXA595889.pdf [Accessed 10 August 2025]
4. Skidmore C. Borehole wire-line logging for uranium. In: *SMEDG Symposium.* 11 September, 2009. 33 p. Available from: https://www.smedg.org.au/Sym09/Skidmore.pdf [Accessed 10 August 2025]
5. Bulashevich Iu. P. On the theory of neutron logging. *Izvestiia AN SSSR. Ser. Geofizika = Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geophysics Series.* 1951; 1(3): 31–36. (In Russ.)
6. Davydov Iu. B. *Theory of geophysical research of wells (theory, methodology, interpretation).* Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2015. (In Russ.)
7. Demekhov Iu. V., Rumiantsev D. R., Talalai A. G. *Technology of fission neutron logging.* Almaty: NAC Kazatomprom JSC; 2016. (In Russ.)
8. Demekhov Iu. V., Talalai A. G., Shinkariuk I. E. *The quality system of nuclear and geophysical research of wells*. Almaty: NAC Kazatomprom JSC; 2016. (In Russ.)
9. Khaikovich I. M., Iazikov V. G. *Logging during the exploration and development of uranium deposits.* Tomsk: TPU Publishing; 2015. (In Russ.)
10. Kuchurin E. S., Mukhamadiev R. S., Kuchurina O. E. *Method for determining moderation length of fast neutrons in well-broken rock.* Patent RF no. 2164696; 2001. (In Russ.)
11. Kuchurina O. E. The influence of physico-geometric factors on the accuracy of the deceleration length determination according to the NOC-NT data. *Tekhnogenez i ekologiia = Technogenesis and Ecology.* 1996; 3: 145–159. (In Russ.)
12. Bivens H. M., Smith G. W., Jensen D., Jacobs E. L., Rice L. Pulsed neutron uranium borehole logging with epithermal neutron dieaway. In: *Explorations of Uranium Ore Deposits: Proc. Symp. Vienna, 1976.* P. 45–54.
13. Czubek J. A. *Pulsed neutron method for uranium well logging: report N 732/ph.* Crakow: Institute of Nuclear Physics, 1971. 55 p.
14. Czubek J. A., Zoskiewer I. Optimum conditions for uranium detection in delayed neutron well logging. In: *Symp. Exploration of Uranium Ore Deposits. Vienna, 29 March–2 April. Cracow, 1976.* 827 p.
15. Davydov Iu. B., Talalai A. G., Shinkariuk I. E. *Technological complexes of geophysical methods in the search and exploration of mineral raw materials.* Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2019. (In Russ.)
16. Kornilkov S. V. Mineral resources strategy and scientific-based management. In: *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science.* 2022; 991: 012021. Available from: doi: 10.1088/1755-1315/991/1/012021
17. Kornilkov S. V. Going with the tides. *Problemy nedropolzovaniia = Problems of Subsoil Use.* 2024; 1(40): 15–25. Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2024.01.015. (In Russ.)

18. Kornilkov S. V., Dmitriev A. N., Pelevin A. E. On modern approaches to the maintenance and development of the mineral resource base of the region. In: *Geotechnological problems of integrated exploitation of mineral resources.* Issue 6(96). Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2024. 70–80. (In Russ.)

19. Guman O. M., Makarov A. B., Musina O. M. Features of engineering researches at development of ore deposits in the Urals region. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2012; 1: 134–137. (In Russ.)

Received 11 August 2025

Information about the authors:

Ivan V. Miroshnichenko – engineer, JSC OKB Novator. E-mail: apache6318@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-9867-9898
Tatiana A. Glushkova – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: nedra@uralnedra.ru; https://orcid.org/0000-0003-2748-1638
Aleksandr G. Talalai – DSc (Geological and Mineralogical Sciences), Associate Professor, Head of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: groupnedra@mail.ru; https://orcid.org/0000-0001-8986-1226
Irina E. Shinkariuk – Head of the Laboratory of the Department of Geophysics, Ural State Mining University. E-mail: shinkaryuk64@inbox.ru; https://orcid.org/0000-0002-1561-246X

Для цитирования: Мирошниченко И. В., Глушкова Т. А., Талалай А. Г., Шинкарюк И. Е. Государственные стандартные образцы состава и свойств радиоактивных рудных тел // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2025. № 5. С. 48–65. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-65
For citation: Miroshnichenko I. V., Glushkova T. A., Talalai A. G., Shinkariuk I. E. State reference materials of composition and properties of radioactive ore bodies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2025; 5: 48–65 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2025-5-48-65