НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 550.84:553.43:622.013
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 550.84:553.43:622.013

Композитная типизация геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы

И. О. Паничкин✉
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Горный институт, г. Москва, Российская Федерация
✉ *ilja.pani4kin@yandex.ru*

Резюме. Предложен метод композитной типизации геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы, предназначенный для пространственного разделения рудного поля на высокопотенциальные, переходные и низкопотенциальные горно-геологические типы. Актуальность исследования связана с необходимостью учитывать при интерпретации не только содержание меди, но и форму локального геохимического поля, направленность его изменчивости, положение относительно рудного ядра и периферийных ореолов, а также литологический домен. Методика основана на комплексировании геохимических индексов, локальном квадратичном приближении поля, гессианном анализе и оценке линейной анизотропии. Проверка выполнена по фактическим содержаниям меди, геологическим доменам и двум независимым вариантам выделения кондиционных интервалов. Установлено, что типы 110 и 120 характеризуются долей длины с содержанием меди не ниже 0,30 % на уровне 75,2 %, а их средневзвешенные содержания составляют 0,706 и 0,698 %. Высокопотенциальная группа покрывает 43,1 % кондиционных интервалов по схеме Государственной комиссии по запасам Российской Федерации и 49,0 % интервалов по канадскому варианту. При включении переходных типов покрытие возрастает до 81,9 и 94,0 % соответственно. Научная новизна заключается в объединении геохимической выраженности, локальной геометрии поля и его анизотропии в едином интервальном показателе рудного потенциала. Практическая значимость состоит в возможности использования типизации для детализации рудного тела, выделения перспективных участков, обоснования доразведки и последующего планирования горных работ. Результаты исследований могут быть полезными при комплексной интерпретации данных опробования, пространственном районировании рудного поля, оценке его внутренней неоднородности и выборе участков, требующих дополнительной геологической детализации.

Ключевые слова: медно-порфировая система, трехмерное геохимическое поле, гессианный анализ, пространственная анизотропия, композитная типизация, содержание меди, геологические домены, кондиционные интервалы, рудный потенциал, планирование горных работ

Благодарность: Автор выражает благодарность научному руководителю кандидату технических наук, доценту Георгию Ониковичу Абрамяну за научные консультации, обсуждение методических решений и рекомендации при подготовке статьи.

Для цитирования: Паничкин И.О. Композитная типизация геометрических структур трехмерного геохимического поля медно-порфировой системы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 113-117. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117.

Composite typing of geometric structures of a three-dimensional geochemical field in a porphyry copper system

I. O. Panichkin✉
National University of Science and Technology MISIS, Mining Institute, Moscow, Russian Federation
✉ *ilja.pani4kin@yandex.ru*

Abstract. This study proposes a method for composite typing of geometric structures within the three-dimensional geochemical field of a porphyry copper system. The method is intended to divide an ore field into high-potential, transitional and low-potential mining-geological types while accounting not only for copper grade but also for the local shape of the geochemical field, spatial anisotropy, position relative to the ore core and peripheral halos, and lithological domain. The workflow combines geochemical indices, local quadratic field approximation, Hessian analysis and an estimate of linear anisotropy into a composite interval-scale ore-potential indicator.

© Паничкин И. О., 2026

Validation was performed using measured copper grades, geological domains and two independent scenarios for defining mineralized intervals. Types 110 and 120 showed the most stable relationship with copper mineralization: 75.2 % of their interval length has copper grades not lower than 0.30 %, while their length-weighted grades are 0.706 % and 0.698 %, respectively. The high-potential group covers 43.1 % of mineralized intervals under the Russian State Commission on Mineral Reserves criterion scheme and 49.0 % under the Canadian-style scenario; inclusion of transitional types increases coverage to 81.9 % and 94.0 %. The novelty of the approach is the integration of geochemical intensity, local field geometry and anisotropy within a single interpretable classification framework. The method can support ore-body detailing, selection of prospective areas, planning of follow-up exploration, and subsequent mine planning while preserving geological interpretability at the interval scale. The research results may be useful for the integrated interpretation of sampling data, spatial zoning of the ore field, assessment of its internal heterogeneity, and selection of areas requiring additional geological detailing.

Keywords: porphyry copper system, three-dimensional geochemical field, Hessian analysis, spatial anisotropy, composite typing, copper grade, geological domains, mineralized intervals, ore potential, mine planning

Acknowledgments: The author expresses his gratitude to his scientific supervisor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Georgy O. Abramyan, for scientific consultations, discussion of methodological approaches, and recommendations during the preparation of the article.

For citation: Panichkin I.O. Composite typing of geometric structures of a three-dimensional geochemical field in a porphyry copper system**.** *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 113-117. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-113-117.

Введение

При оценке медно-порфировых объектов важны не только содержания полезного компонента, но и пространственная организация минерализации. Рудное ядро, переходные и периферийные зоны различаются формой геохимического поля, направленностью изменчивости и связью с литолого-петрографическими доменами [1–3].

Для горного дела такая типизация позволяет разделять участки с различной степенью рудного потенциала, уточнять внутреннюю неоднородность рудного тела и обосновывать направления доразведки.

Цель работы: разработать и апробировать метод композитной типизации геометрических структур трехмерного геохимического поля и оценить его согласованность с содержанием меди, геологическими доменами и независимыми вариантами выделения кондиционных интервалов.

Материал и методика исследований

Исходные данные и система индексов

Исходные данные представлены интервалами кернового опробования. Для каждого интервала использованы координаты, глубины начала и окончания, мощность, содержание Cu и сопутствующих элементов, линия разреза и геологический домен. Набор признаков обеспечивает совместную оценку рудоносности, пространственной формы поля и геологической приуроченности выделенных типов [4–8]. Геохимические индексы и ранговые веса признаков приведены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Геохимические индексы и ранговые веса признаков / Geochemical indices and rank weights of indicators

Индекс	Геологическая роль	Вес
Core Index	Рудное ядро Cu – Mo – Ag	1,00
Periphery Index	Периферийная Zn – Pb – As – Sb ассоциация	0,90
Position Ratio	Соотношение ядра и периферии	0,80
Cu Ag ratio	Тип рудной ассоциации	0,70
Cu As ratio	Положение относительно As-ореола	0,60
Arsenic Halo	Мышьяково-сурьмяный ореол	0,50
Sulfide Index	Сульфидизация и пиритовая составляющая	0,50
Mafic Index	Литологический и петрогеохимический фон	0,25
Fe Mg ratio	Литологический модификатор	0,25

Весовая шкала таблицы 1 является экспертно-ранговой. Максимальный вес присвоен Core Index как прямому индикатору Cu – Mo – Ag минерализации; меньшие веса – периферийным и ореольным признакам, характеризующим положение интервала в системе. Литологические показатели используются как модификаторы геохимического поля, поэтому имеют минимальные веса.

Локальная форма поля и гессианный анализ

Для каждого индекса геохимическое поле рассматривается как дискретная функция трех координат.

Его локальная форма описывается квадратичной аппроксимацией в эллипсоидальной окрестности анализируемого интервала [9, 10]:

$$f(\Delta r) \approx a_0 + g^T \Delta r + \frac{1}{2} \Delta r^T H \Delta r, \quad (1)$$

где Δr – локальное смещение; g – градиент; H – гессиан поля.

Гессиан используется для определения локальной кривизны.

Вклад соседних проб задается эллипсоидальной весовой функцией; в расчетах приняты горизонтальный радиус – 100 м и вертикальный – 30 м, что соответствует вытянутой конфигурации скважинной сети.

$$H_f = (2a_4\ a_7\ a_8\ a_7\ 2a_5\ a_9\ a_8\ a_9\ 2a_6\ ). \quad (2)$$

Собственные значения гессиана характеризуют форму поля, а собственные векторы – направления максимальной и минимальной кривизны. Направление минимальной кривизны принято за ось локальной вытянутости.

Ее выраженность оценивалась коэффициентами линейной и плоскостной анизотропии:

$$C_l = \frac{|\lambda_1| - |\lambda_2|}{|\lambda_1|}, \quad C_p = \frac{|\lambda_2| - |\lambda_3|}{|\lambda_2|}, \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 и λ_3 – собственные значения гессиана, упорядоченные по убыванию абсолютной величины.

При сравнении использовались оси, противоположные направления считались эквивалентными.

Композитный рудный потенциал

Композитный рудный потенциал определяет положение интервала среди высокопотенциальных, переходных и низкопотенциальных типов и объединяет три нормированных вклада – структурный, анизотропный и геохимический [11–14]:

$$P_i = \min\left(1;\ S_i^w + A_i^w + B_i\right) \quad (4)$$

где P_i – композитный потенциал; S_i^w – структурный вклад локальной формы; $\bar{A}_i^w$ – вклад линейной анизотропии; B_i – геохимический вклад.

Высокие значения P_i соответствуют участкам, приоритетным для детализации рудного тела.

Результаты

Согласованность направлений геохимических структур

Осевое сравнение направлений минимальной кривизны приведено в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Осевое сравнение направлений минимальной кривизны / Axial comparison of minimum-curvature directions

Сопоставляемые признаки	Средний угол, град.	Доля углов менее 30°, %
Рудное ядро – периферия	23,3	68,3
Рудная ассоциация – ореол	23,1	69,0
Тип руды – положение относительно As-ореола	22,1	70,0

Средние углы между сопоставляемыми направлениями составляют 22,1–23,3°, а доля углов менее 30° – 68,3–70,0 %, что свидетельствует о согласованной пространственной организации рудных, периферийных и ореольных признаков.

Распределение композитных типов

Распределение композитных типов приведено в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Распределение композитных типов / Distribution of composite types

Тип	Количество интервалов	Доля, %	Горно-геологическая интерпретация
100	3 668	8,3	Высокий потенциал неопределенного типа
110	2 748	6,2	Высокопотенциальная рудная фаза ядра
120	7 175	16,1	Высокопотенциальная рудно-переходная фаза
210	2 738	6,2	Переходная периферийная фаза
220	14 483	32,6	Переходная периферийно-ореольная фаза
230	7 448	16,8	Структурно-анизотропная поисковая фаза
240	8	0	Слабоконтрастная переходная фаза
300	6 179	13,9	Низкопотенциальная фаза

Наиболее распространен тип 220 (14 483 интервала; 32,6 %), отражающий периферийно-ореольную переходную зону. Высокопотенциальные типы 100, 110 и 120 суммарно составляют 30,6 % выборки, низкопотенциальный тип 300 – 13,9 %.

Связь композитной типизации с фактическим содержанием Cu

Среднее и медианное содержание Cu по композитным типам и доля длины с Cu не ниже 0,30 % представлены на рисунках 1 и 2.

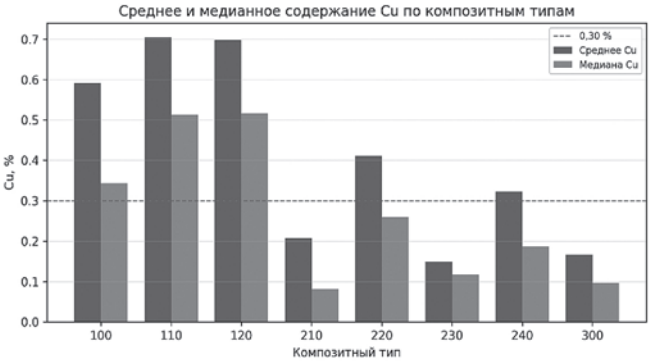


Рис. 1. **Среднее и медианное содержание Cu по композитным типам /**
Fig. 1. **Mean and median copper content by composite type**

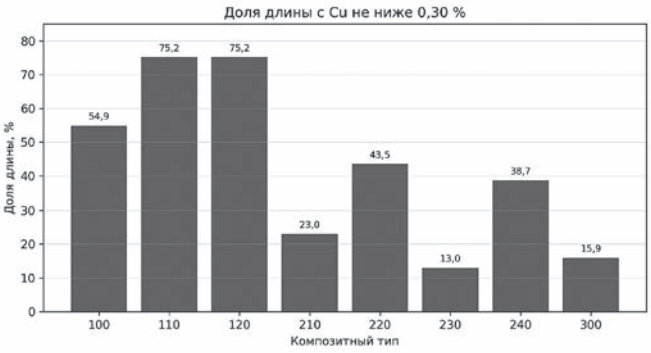


Рис. 2. **Доля длины с Cu не ниже 0,30 % /**
Fig. 2. **Share of length with Cu not lower than 0.30 %**

По содержанию Cu наиболее устойчиво выделяются типы 110 и 120: средневзвешенные содержания равны 0,706 и 0,698 %, медианные – 0,513 и 0,517 %, а доля длины с Cu не ниже 0,30 % составляет 75,2 % для обоих типов. Для типа 100 этот показатель равен 54,9 %.

Переходные типы демонстрируют закономерное снижение рудоносности: для типа 210 средневзвешенное Cu составляет 0,194 %, а доля длины выше 0,30 % – 23,0 %; для типа 220 – 0,399 и 43,5 % соответственно. Типы 230 и 300 характеризуются более низкими значениями Cu.

Связь с геологическими доменами

Структура геологических доменов по композитным типам представлена на рисунке 3.

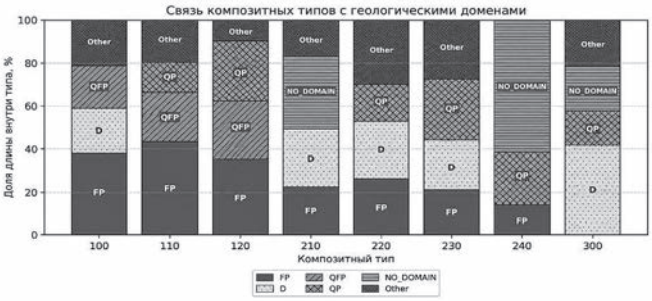


Рис. 3. **Структура геологических доменов по композитным типам /**
Fig. 3. **Geological-domain structure by composite type**

Высокопотенциальные типы 100, 110 и 120 преимущественно связаны с доменом FP, доля которого составляет 37,6, 43,2 и 34,6 % соответственно. Домен QFP входит в число ведущих только в высокопотенциальной группе; для типа 120 суммарная доля QFP и QP достигает 54,6 %, что соответствует его рудно-переходной природе.

Тип 220 связан преимущественно с D, FP и QP, тип 230 имеет максимум в QP, а тип 300 характеризуется доминированием D и повышенной долей неуточненных доменов. Распределение доменов согласуется с принятой горно-геологической интерпретацией типов.

Сравнение композитной типизации с вариантами выделения кондиций по Государственной комиссии по запасам Российской Федерации и канадской системе

По кондиционной схеме ГКЗ выделено 2 074 интервала, по канадскому варианту – 1 724; композитная типизация сформировала 14 918 интервалов, обеспечивая более детальное пространственное разбиение рудного поля.

Подтверждение типов независимыми интервальными сценариями представлено на рисунке 4.

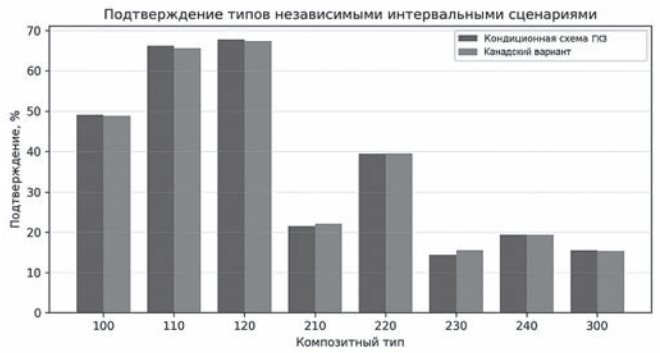


Рис. 4. **Подтверждение типов независимыми интервальными сценариями /**
Fig. 4. **Confirmation of types by independent interval scenarios**

Наибольшее подтверждение имеют типы 110 и 120: по схеме ГКЗ – 66,2 и 67,8 %, по канадскому варианту – 65,6 и 67,4 %. Тип 120 также обеспечивает наибольшее среди высокопотенциальных типов покрытие опорных интервалов – 24,7 и 28,1 % соответственно.

Тип 220 имеет умеренное подтверждение, но значительное покрытие – 30,1 % интервалов по схеме ГКЗ и 34,5 % – по канадскому варианту, что подтверждает прикладную роль переходных периферийно-ореольных зон.

Обсуждение

Композитная типизация формирует горно-геологически интерпретируемую систему типов рудного поля. Высокопотенциальные типы 110 и 120 одновременно подтверждаются содержанием Cu, кондиционными интервалами и связью с доменом FP; присутствие QFP преимущественно в этой группе усиливает геологическое обоснование выделенных рудных фаз. Тип 100 характеризует участки с высокой геометрической выраженностью поля, но менее специализированной геохимической природой.

Переходные типы имеют самостоятельное значение: тип 220 отражает периферийно-ореольную зону и обеспечивает существенное покрытие опорных интервалов, а тип 230 выделяет структурно-анизотропные участки, потенциально связанные с контактами и каналами флюидопереноса. Таким образом, метод дополняет кондиционную интерпретацию пространственной информацией и может использоваться при выборе участков детализации и доразведки. Совместное использование геохимических и пространственных признаков соответствует современному направлению выявления многомерных геохимических аномалий [15].

Для планирования горных работ высокопотенциальные типы целесообразно использовать при выборе участков первоочередной детализации и доразведки, переходные – для уточнения границ и оценки риска разубоживания, низкопотенциальные – для предварительного ограничения менее перспективных участков.

Ограничения и направления дальнейших исследований

Результаты зависят от плотности и конфигурации опробования, качества пространственной привязки, размеров локальной окрестности и экспертных весов; поэтому параметры требуют повторной калибровки для других объектов. Метод является инструментом поддержки интерпретации и не заменяет процедуры установления кондиций и подсчета запасов. Дальнейшие исследования должны включать анализ чувствительности к разрежению сети, автоматизированный подбор весов и проверку устойчивости типизации на независимых месторождениях.

Заключение

1. Предложенная композитная типизация объединяет локальную форму геохимического поля, анизотропию и геохимические индексы, дополняя кондиционную интерпретацию пространственными характеристиками.

2. Наиболее устойчивые результаты получены для типов 110 и 120: средневзвешенные содержания Cu составляют 0,706 и 0,698 %, а доля длины с Cu не ниже 0,30 % – 75,2 % для обоих типов.

3. Типы 110 и 120 подтверждаются независимыми кондиционными интервалами и геологическими доменами. Высокопотенциальная группа 100/110/120 покрывает 43,1 % интервалов по схеме ГКЗ и 49,0 % по канадскому варианту; с учетом переходных типов – 81,9 и 94,0 %.

4. Практическое значение метода состоит в выделении участков для детализации и доразведки, уточнении переходных границ и более обоснованном планировании последующих горных работ.

5. Результаты исследований могут быть полезными при комплексной интерпретации данных опробования, пространственном районировании рудного поля, оценке его внутренней неоднородности и выделении участков, требующих дополнительного геологического изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*. 1970; 65 (4): 373-408. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.65.4.373.
2. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010; 105 (1): 3-41. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3.
3. Викентьев И.В., Шатов В.В., Смирнов Д.И. и др. Медно-золотопорфировое месторождение Юбилейное (Западный Казахстан): геологическая позиция и условия образования. *Геология рудных месторождений*. 2023; 65 (7). https://doi.org/10.31857/S0016777023070080.
   Vikentiev I.V., Shatov V.V., Smirnov D.I., et al. The Yubileinoe Cu–Au Porphyry Deposit (Western Kazakhstan): Geological Setting and Formation Conditions. *Geology of Ore Deposits.* 2023; 65 (7). (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0016777023070080.
4. Cheng Q., Agterberg F.P., Ballantyne S.B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*. 1994; 51 (2): 109-130. https://doi.org/10.1016/0375-6742(94)90013-2.
5. Zuo R., Xia Q., Wang H. Compositional data analysis in the study of integrated geochemical anomalies associated with mineralization. *Applied Geochemistry*. 2013; 28: 202-211. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.031.
6. Zhang S., Carranza E.J.M., Fu C., et al. Interpretable machine learning for geochemical anomaly delineation in the Yuanbo Nang District, Gansu Province, China. *Minerals*. 2024; 14 (5): 500. https://doi.org/10.3390/min14050500.
7. Min Y., Zhao J., Sui Y., et al. Comparison of manifold learning algorithms for identifying geochemical anomalies associated with copper mineralization. *Scientific Reports*. 2025; 15: 39628. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23301-7.
8. Nathwani C.L., Wilkinson J.J., Fry G., et al. Machine learning for geochemical exploration: classifying metallogenic fertility in arc magmas and insights into porphyry copper deposit formation. *Mineralium Deposita*. 2022; 57: 1143-1166. https://doi.org/10.1007/s00126-021-01086-9.
9. Frangi A.F., Niessen W.J., Vincken K.L., et al. Multiscale vessel enhancement filtering. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI'98. Lecture Notes in Computer Science*. 1998; 1496: 130-137. https://doi.org/10.1007/BFb0056195.
10. Bolsinov A.V., Konyaev A.Yu., Matveev V.S. Nijenhuis geometry. *Advances in Mathematics*. 2022; 394: 108001. https://doi.org/10.1016/j.aim.2021.108001.
11. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*. 2020; 3: 29-37. https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
    Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Assessment of mineral quality indicators using geoinformation technologies for block modeling. *Geoinformatika.* 2020; 3: 29-37. (In Russ.). https://doi.org/10.47148/1609-364X-2020-3-29-37.
12. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С. Применение геоинформационных технологий блочного моделирования для совершенствования методов оценки качественных показателей полезных ископаемых. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2021; 1: 63-73. https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
    Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S. Application of geoinformation block modeling technologies to improve methods for assessing mineral quality indicators. News of the Higher Institutions. *Mining Journal.* 2021; 1: 63-73. (In Russ.). https://doi.org/10.21440/0536-1028-2021-1-63-73.
13. Мельниченко И.А., Кожухов А.А., Омельченко Д.Р. и др. Построение трехмерной модели месторождения с использованием принципов блочного моделирования и искусственных нейронных сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022; 10: 5-19. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_5.
    Melnichenko I.A., Kozhukhov A.A., Omelchenko D.R., et al. Construction of a 3D deposit model using block modeling principles and artificial neural networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2022; 10: 5-19. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_10_0_5.
14. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Тимохин А.В. и др. Совершенствование методов учета повышенных потерь и разубоживания полезного ископаемого при добыче. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3-1: 453-464. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-453-464.
    Kantemirov V.D., Titov R.S., Timokhin A.V., et al. Improving methods for accounting for increased mineral losses and dilution during extraction. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2020; 3-1: 453-464. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-453-464.
15. Mou N., Wang G., Sun X. Identification of geochemical anomalies related to mineralization: a case study from porphyry copper deposits in the Qulong-Jiama mining district of Tibet, China. *Journal of Geochemical Exploration*. 2023; 244: 107126. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107126.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Илья Олегович Паничкин –
аспирант кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Российская Федерация;
e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR

Ilia O. Panichkin *–*
Postgraduate Student, Department of Geology and Mine Surveying, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation;
e-mail: ilja.pani4kin@yandex.ru

Информация о статье
Поступила в редакцию: 24.09.2026
Поступила после рецензирования: 29.09.2026
Принята к публикации: 12.10.2026

Article info
Received: 24.09.2026
Revised: 29.09.2026
Accepted: 12.10.2026