ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):170-185
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.8.05+004.94 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_170

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.Х.М. Нкрума[1], Т.С. Силина[2], Р.А. Файзрахманов[1]

[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: nkvetcho@gmail.com
[2] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Рассмотрен вопрос сравнения методов пространственной автокорреляции, применяемых для формирования классов перспективности в пределах неоднородного пространственного распределения минерализации месторождения. Классификаторы, являющиеся ключевыми при картировании перспективности полезных ископаемых на основе данных, позволяют разработать модели прогноза минерального потенциала малоизученных участков в пределах известных горнодобывающих районов. Проведено сравнительное исследование методов статистической обработки пространственных данных с использованием индекса Морана, индекса Гетис–Орда и авторского подхода, основанного на модификации индекса Морана. Методики апробированы на основе геохимических данных золоторудного комплекса Агбау в Кот-д'Ивуаре, предоставленных кампанией Endeavour Mining Corporation. Проведена оценка надежности полученных результатов с референсными данными с учетом текущих условий эксплуатации месторождения. По показателям эффективности получены результаты: авторский подход: accuracy = 98%, F1-score = 98% (при 250 pbb) и стабильность F1-score (от 93 до 96%) при изменении бортового содержания; подход на основе классического индекса Морана: accuracy = 77%, F1-score = 85% (при 250 pbb) и снижение F1-score (от 93 до 66%); подход на основе индекса Гетис–Орда: accuracy = 75%, F1-score = 84% (при 250 pbb) и снижение F1-score (от 90 до 55%). Авторский подход продемонстрировал устойчивость к колебаниям бортового содержания в отличие от классических методов.

Ключевые слова: картирование перспективности полезных ископаемых, метод пространственной автокорреляции, бортовое содержание, метод Морана, модифицированный индекс Морана, метод Гетис–Орда, золоторудный комплекс Агбау.

Для цитирования: *Нкрума А. Х. М., Силина Т. С., Файзрахманов Р. А.* Сравнительное исследование методов пространственной автокорреляции при анализе закономерностей распределения минерализации месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 170–185. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_170.

Comparative study of spatial autocorrelation methods in the statistical analysis of deposit mineralization patterns

A.H.M. Nkrumah[1], T.S. Silina[2], R.A. Fayzrakhmanov[1]

[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: nkvetcho@gmail.com
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: A comparison of spatial autocorrelation methods used to form perspective classes within the heterogeneous spatial distribution of mineralization of the deposit is carried out. Classifiers, which are key in mapping the prospects of minerals based on data, allow us to develop models for predicting the mineral potential of poorly studied sites within known mining areas. The paper presents a comparative study of methods of statistical processing of spatial data using the Moran's index, Getis-Ord index, and the author's approach based on a modified Moran's index. The methods have been tested on the basis of geochemical data from the Agbau gold mining complex in Côte d'Ivoire, provided by the Endeavour Mining Corporation campaign. An assessment of the reliability of the results obtained with reference data has been carried out, taking into account the current operating conditions of the field. The results were obtained in terms of performance indicators: the author's approach: accuracy = 98%, F1-score = 98% (at 250 pbb) and the stability of the F1-score (from 93 to 96%) when changing the onboard content; the approach based on the classical Moran index: accuracy = 77%, F1-score = 85% (at 250 pbb) and a decrease in F1-score (from 93 to 66%); approach based on the Goethis-Ord index: accuracy = 75%, F1-score = 84% (at 250 pbb) and a decrease in F1-score (from 90 to 55%). The author's approach It demonstrated resistance to fluctuations in onboard content, unlike classical methods.

Key words: mineral prospectivity mapping, spatial autocorrelation methods, the level of mineralization prospects, Cut-Off Grade, Modified Moran's Index Approach, Moran's method, Getis-Ord method, Agbau gold mining complex.

For citation: Nkrumah A. H. M., Silina T. S., Fayzrakhmanov R. A. Comparative study of spatial autocorrelation methods in the statistical analysis of deposit mineralization patterns. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):170-185. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_170.

Введение

Горнодобывающая промышленность на сегодняшний день сталкивается с хроническим сокращением числа открытий крупных месторождений, несмотря на рост инвестиций. Как отмечают в отчете In Gold We Trust [1] П.С. Рональд и Дж. В. Марк, управляющие партнеры компании Incrementum AG, сокращение минеральных запасов и снижение числа новых открытий представляют серьезную угрозу. Эта тенденция сохраняется даже при увеличении финансирования геологоразведочных работ, поскольку крупные и легко обнаруживаемые месторождения уже в значительной степени истощены [2].

Наблюдается тенденция значительного снижения уровня собственно поисковых работ на новых площадях и существенный рост разведочных работ в пределах известных рудных полей и месторождений, что привело к весьма ощутимым результатам. В пределах известных месторождений полезных ископаемых наиболее рационально и целесо-

образно наметить территории, на которых при минимальных затратах времени и средств можно было бы обнаружить предпосылки и признаки оруденения и подтвердить их проявление последующим бурением [3].

При переоценке потенциальных участков в пределах известных рудных полей и месторождений ключевую роль играют геологоразведочные данные участков. Эти данные, объединенные с современными методами анализа (геоинформационные системы, алгоритмы машинного обучения), позволяют эффективно прогнозировать минерализованные участки в малоизученных местах в пределах известных месторождений [4]. Метод картирования перспективности полезных ископаемых на основе данных представляет собой сложный процесс многопараметрического анализа геопространственных данных с использованием алгоритмов машинного обучения для разделения рудного района или месторождения на участки с разным минеральным потенциалом [5]. Необходима четкая классификация территории по уровням перспективности минерализации для интерпретации результатов и оценки рентабельности месторождений [6].

Существует несколько подходов к определению уровней перспективности минерализации:

- подход, основанный на бинарной закономерности, предложенный Carranza и Labort, который рассматривает известную минерализацию как дихотомическую переменную, характеризующуюся перспективными и неперспективными местоположениями [7];
- подход, основанный на методах кластеризации: метод K-means (кластеризация по разбиению), иерархическая кластеризация и метод пространственной кластеризации приложений с шумами на основе плотности (англ. Density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN) [8];
- подход, основанный на методах пространственной автокорреляции [9].

Подход Carranza и Labort широко применяется при картировании перспективности для масштабов (M ⩽ 1:500 000) и среднемасштабном картировании (M 1:200 000 — 1:100 000), но малоэффективен для крупномасштабного картирования (M 1:50 000 — 1:25 000) или масштаба месторождения (M ⩾ 1:10 000) [10, 11]. Игнорирование количественных показателей минерализации (значения интенсивности минерализации в каждой точке, пороговое значение минерализации и другие физико-геохимические параметры месторождения) делает данный подход неприменимым.

Методы кластеризации K-means и иерархическая кластеризация предлагают альтернативу, разделяя минерализацию на иерархические группы перспективности [12]. Однако эти методы не учитывают пространственное распределение данных и часто зависят от неизвестного оптимального количества кластеров, что существенно влияет на результаты прогнозов.

Преимущество метода пространственной кластеризации приложений с шумами на основе плотности (DBSCAN) заключается в том, что он учитывает пространственный характер точек измерения минерализации. Основным недостатком метода является субъективный аспект при определении значений параметров ε (радиус поиска соседних точек) и minPts (минимальное число точек) и необходимость экспертной интерпретации результатов кластеризации [13].

Подходы, основанные на методах пространственной автокорреляции, позволили преодолеть недостатки и улучшить преимущества предыдущих подходов. В работе [14] метод пространственной

автокорреляции Морана позволил выявить четыре однородных скопления, соответствующих различным уровням перспективности минерализации в неоднородном пространственном распределении содержаний колумбита-танталита в северной части геологического комплекса Hana-Lobo, расположенного в Кот-д'Ивуаре. В статье [15] авторы успешно применили пространственную автокорреляцию Гетис–Орда на данных горнодобывающего комплекса Агбау (Западная Африка). Метод позволил провести кластеризацию неоднородного пространственного распределения содержания золота и выделить три пространственных перспективных класса. Следует отметить, что метод гораздо более эффективен на новых участках в пределах территории уже известных месторождений [16]. Одной из причин может быть неучет горнотехнических, технологических и экономических факторов при оценке рентабельности месторождения.

В соответствии с требованиями стандартов Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO. International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. ICMM. November, 2019, 78 p.), Joint Ore Reserves Committee (Joint Ore Reserves Committee (JORC). Revised Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (JORC Code). Draft for Public Consultation. 2024.) и российского стандарта ГОСТ Р 55300-2012 (ГОСТ Р 55300-2012. Недра. Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. — М.: Стандартинформ, 2013. — 25 с.) классификация месторождения должна основываться на оценке экономической целесообразности, учитывающей множество факторов (технологии добычи и переработки, рыночные цены на сырье, экологические и социальные ограничения, затраты на инфраструктуру и другие параметры).

В работе использованы методы пространственной автокорреляции, основанные на модифицированном индексе Морана (МИМ), классическом индексе Морана (КИМ) и индексе Гетис–Орда (ИГО) для анализа закономерностей в неоднородном пространственном распределении минерализации. Эти закономерности имеют важное значение для выявления различных уровней перспективности минерализации.

Метод

Постановка задачи

Рассмотрим массив $Y = \{(x, y, z, t)_n\}$, представляющий совокупность точек измерения содержания показателя минерализации эксплуатируемого месторождения, где x, y и z соответствуют координатам n-й точки массива Y, по осям абсцисс, ординат и высот в пространственной системе отсчета (O, i, j, k), и t — значение содержания минерализации, измеренное в n-й точке.

Рассмотрим множество $\Phi = \{\phi_j\}$, представляющее совокупность горно-геологических, технологических и экономических факторов, позволяющих оценить экономическую рентабельность при текущих условиях эксплуатации рассматриваемого месторождения, ϕ_j — j-й фактор оценки рентабельности эксплуатации месторождения, при $j = 1, J$ (J — количество факторов оценки).

Задача заключается в сравнении результатов методов пространственной автокорреляции, основанных на МИМ, КИМ и ИГО, для выявления закономерностей в неоднородном пространственном распределении минерализации и их сопоставления с распределением однородных зон минерализации (ЗМ), учитывая текущие условия разработки рассматриваемого месторождения.

Алгоритм на основе модифицированного индекса Морана

Предлагаемый авторами подход, названный МИМ, представляет собой модификацию классических подходов Морана (глобального индекса и локальных индикаторов) за счет учета дополнительного параметра — величины бортового содержания (БС), рассчитываемого на основе множества факторов (горно-геологических, технологических и экономических) оценки рентабельности месторождений в условиях их эксплуатации [17—19].

Методика подхода, основанного на МИМ и включающего расчеты глобального индекса, локальных индексов, связанных со значением БС (S), представлена в виде алгоритма на рис. 1.

На первом этапе (блок 2) учтено множество факторов оценки экономической рентабельности (блок 1) при текущих условиях эксплуатации для расчета значения S:

$$S = \frac{\phi_1}{\phi_2 \times \phi_3 \times (1 - \phi_4)}, \qquad (1)$$

где S — минимальное допустимое содержание искомого минерала в руде или БС (г/т); ϕ_1 — полные эксплуатационные затраты (добыча, транспортировка, обогащение и т.д.) 1 г добытого минерала (денежная единица); ϕ_2 — оптовая цена товарной продукции, получаемой при переработке руд (денежная едини-

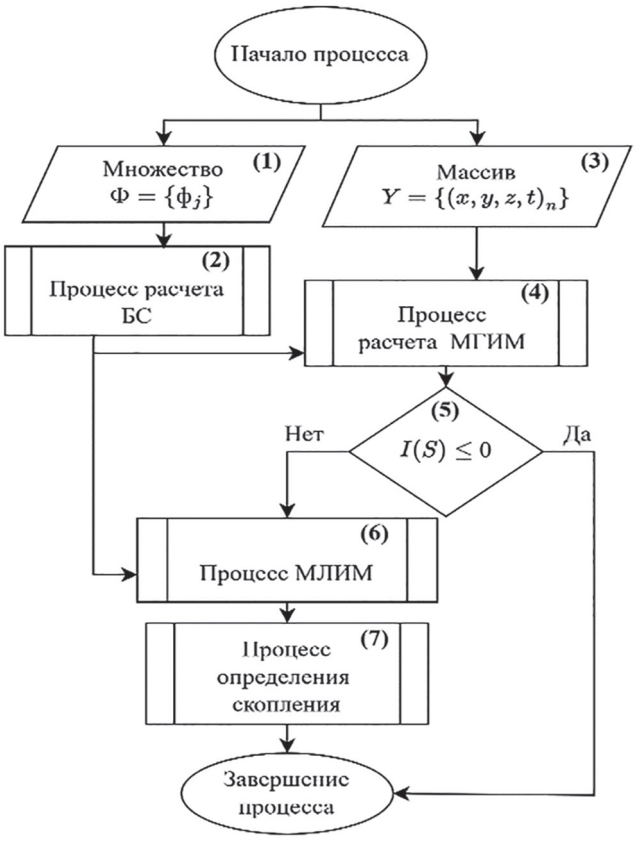

Рис. 1. Алгоритм подхода МИМ
Fig. 1. Algorithm of the MMI approach

ца); ϕ_3 — сквозное извлечение полезных ископаемых в товарную продукцию из минерального сырья (доли единицы) и ϕ_4 — коэффициент, учитывающий разубоживание при добыче (доли единицы).

Величина *S* может быть выражена в частях на миллион (ppm) или частях на миллиард (ppb), в зависимости от единиц измерения, используемых для количественной оценки минерализации проб из массива *Y*.

Значение *S*, широко используемое в горнодобывающей отрасли для определения минимального экономически рентабельного содержания полезного компонента в руде, применяется в исследовании для оценки уровня перспективности месторождения. Новизна подхода заключается в том, что изменение *S* приводит к пересмотру уровня перспективности, так как параметр тесно связан с колебаниями факторов оценки рентабельности месторождений, таких как рост цен на минеральное сырье. Данная реорганизация соответствует стратегическим требованиям приоритизации зон месторождения, основанным на значении *S*.

На втором этапе алгоритма (см. рис. 1) при расчете модифицированного глобального индекса Морана (МГИМ) (блок 4) параметры, связанные с точками измерения массива *Y* — а именно *x*, *y*, *z* и *t* (блок 3) — а также значение *S*, рассчитанное в блоке 2, используются для определения значения МГИМ по формуле

$$I_S = \frac{N}{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N} w_{n,m}} \times \times \frac{\sum_{n=1}^{N}(t_n - S) \times \sum_{m=1}^{N} w_{n,m}(t_n - \mu)}{\sum_{n=1}^{N}(t_n - S)^2} \quad (2)$$

где I_S — значение МГИМ при БС = *S*; $w_{n,m}$ — нормализованное значение обратного расстояния (an,m) между *n*-й и *m*-й точками массива *Y*, с

$$a_{n,m} = \frac{1}{\sqrt{(x_n - x_m)^2 + (y_n - y_m)^2 + (z_n - z_m)^2}}$$

N — количество точек массива *Y*; μ — среднее значение минерализации массива *Y*, с $\mu = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} t_n$.

Если $I_S > 0$ — это указывает на статистически значимую пространственную структуру в распределении содержания минерализации, характеризующуюся пространственными скоплениями точек со значениями выше значения *S*. В случае $I_S = 0$ — распределение является случайным, при $I_S < 0$ — содержание минерализации, превышающее значения *S*, не образует пространственных скоплений.

На третьем этапе алгоритма (см. рис. 1) в процессе расчета модифицированных локальных индексов Морана (МЛИМ) (блок 6) для каждого значения содержания минерализации массива *Y* (блок 3) необходимо вычислить связанный с ним индекс $i_n(S)$, учитывая при этом значение *S*, рассчитанное в блоке 2, согласно формуле

$$i_n(S) = \frac{N \times (t_n - S) \times \sum_{m=1}^{N} w_{n,m}(t_n - \mu)}{\sum_{n=1}^{N}(t_n - S)^2}, \quad (3)$$

где $i_n(S)$ — МЛИМ при БС = *S*, индекс связан со значением минерализации, измеренным в *n*-й точке массива *Y*.

Если $i_n(S) > 0$, то *n*-я точка находится в окрестности точек со значениями *t*, схожими с ее собственным значением, при заданном пороге *S*. Напротив, если $i_n(S) < 0$, *n*-я точка расположена в окрестности точек с непохожими значениями *t*, для того же порога *S*.

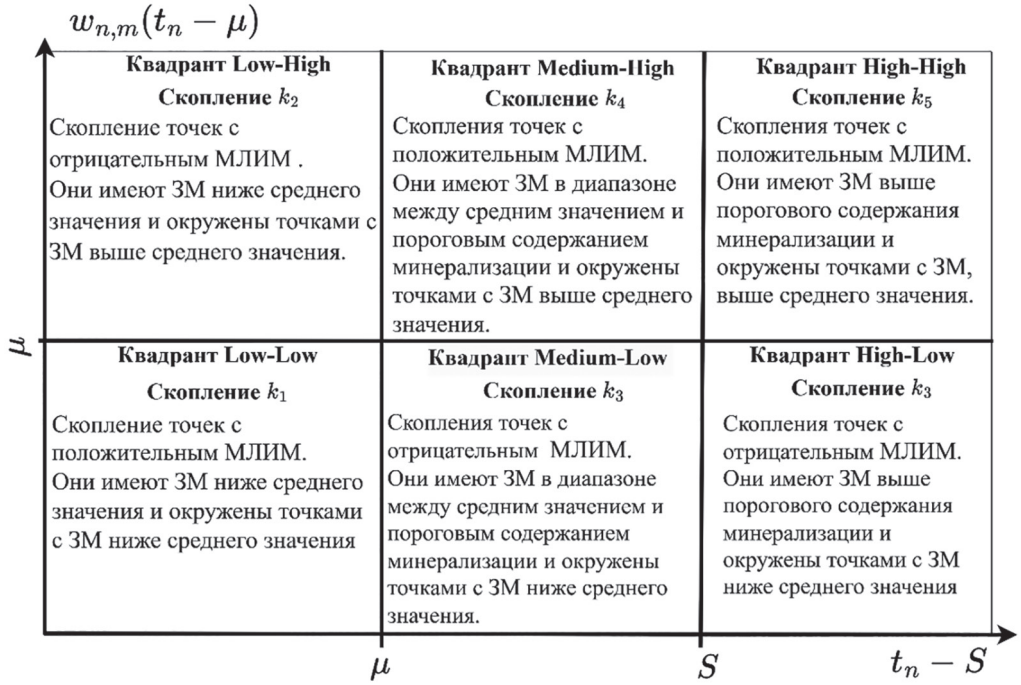

Рис. 2. Модифицированная диаграмма рассеяния Морана
Fig. 2. Modified Moran's scatterplot

МЛИМ представляет собой адаптацию локальных показателей пространственной ассоциации (*LISA*), предложенных Anselin в 1995 г. [20], так как алгоритм включает специфический порог (в данном случае — значение БС), что позволяет уточнить оценку пространственного сходства.

На четвертом этапе алгоритма (см. рис. 1) в процессе определения скоплений (блок 7) каждое значение *t* точек массива *Y* (блок 3) связывается с одним из квадрантов модифицированной диаграммы рассеяния Морана (рис. 2), соответствующих различным пространственным скоплениям. Для *n*-й точки массива *Y* отнесение к определенному квадранту зависит от значения $i_n(S)$, разности $t_n - S$ и взвешенной величины $w_{n,m}(t_n - S)$.

Данная модификация позволила уточнить результаты анализа закономерностей неоднородного пространственного распределения минерализации, формально выделив пространственные скопления точек, значения *t* которых превышают значение БС, в отличие от классических пространственных ассоциаций Морана.

Алгоритмы на основе КИМ и ИГО

Согласно методике, на основе КИМ глобальный индекс рассчитывается по формуле

$$I_G = \frac{N}{\sum_{n=1}^{N}\sum_{m=1}^{N} w_{n,m}} \times \times \frac{\sum_{n=1}^{N}(t_n - \mu) \times \sum_{m=1}^{N} w_{n,m}(t_n - \mu)}{\sum_{n=1}^{N}(t_n - \mu)^2} \quad (4)$$

где I_G — глобальный индекс Морана.

Если $I_G > 0$, это указывает на статистически значимую пространственную структуру распределения минерализации, в виде группировок точек со схо-

жими значениями; $I_G < 0$ — значимая структура проявляется в виде пространственного рассеивания точек; $I_G = 0$ распределение считается случайным, без статистически значимых закономерностей.

LISA, рассчитанные на основе значения *t* каждой точки (формула (5)), позволяют определить тип пространственной ассоциации, к которой принадлежат точки.

$$i_n = \frac{N \times (t_n - \mu) \times \sum_{m=1}^{N} w_{n,m}(t_n - \mu)}{\sum_{n=1}^{N}(t_n - \mu)^2}, \quad (5)$$

где i_n представляет собой *LISA*, связанный со значением *t n*-й точки массива *Y*.

Согласно методике, основанной на ИГО, для *n*-го значения *t* массива *Y* индекс G_n рассчитывается по формуле

$$G_n = \frac{\sum_{m=1}^{N} w_{n,m} \times t_m - \mu \sum_{m=1}^{N} w_{n,m}}{\sigma \sqrt{\frac{N \sum_{j=1}^{N} w_{n,m}^2 - \left(\sum_{j=1}^{N} w_{n,m}\right)^2}{N-1}}}, \quad (6)$$

где G_n — ИГО для *n*-го значения *t* массива *Y*; σ — отклонение значений *t* массива *Y*, рассчитанное по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{N} t_m^2}{N} - (\mu)^2} \quad (7)$$

Индекс $G_n > 0$ указывает на высокое значение *t*, относящееся к пространственной ассоциации «горячих точек», тогда как индекс $G_n < 0$ отражает низкое значение *t*, связанное с пространственной ассоциацией «холодных точек».

Результаты

В работе проведено сравнительное исследование различных подходов МИМ, КИМ и ИГО на основе исходных данных (табл. 1) геохимического содержания золота комплекса Агбау, расположенного в Кот-д'Ивуаре (см. рис. 3) и принадлежащего канадской компании Endevor Mining Corporation.

Согласно техническому отчету «О минеральных ресурсах и запасах золотого рудника Агбау в Кот-д'Ивуаре, Западная Африка», данные о содержании золота

Таблица 1

Исходные данные геохимического содержания золота комплекса Агбау
Raw data of the geochemical content of the Agbaou Complex

Точки отбора	Долгота (м)	Широта (м)	Высота (м)	Содержание золота (ppb)
1	253 944	674 777	303,1	1337
2	253 066	676 040	198,6	57
3	251 898	664 360	157,2	9
4	253 256	674 080	204,6	1981
5	253 555	670 276	189,3	53
...	...	...	...	...
1179	252 713	672 825	168,2	39
1180	253 691	668 643	281,3	20
1181	255 752	678 630	253,6	2
1182	254 930	675 137	209,1	30
1183	252 337	676 459	190,5	14

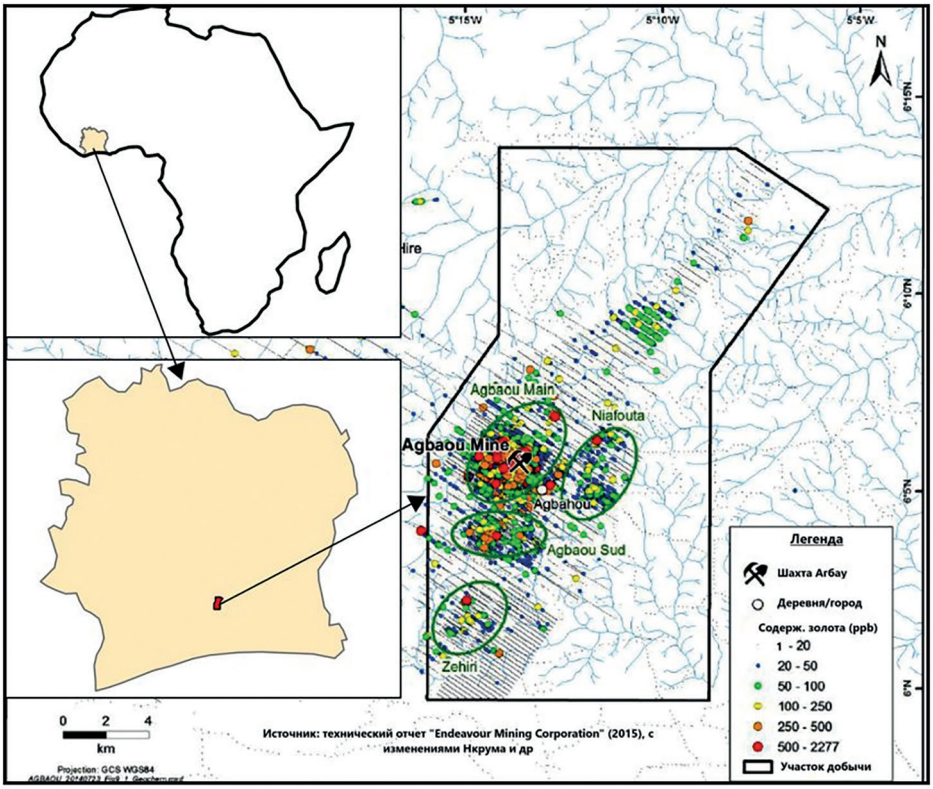

Рис. 3. Пространственное распределение точек отбора проб содержания золота горнодобывающего комплекса Агбау (Кот-д'Ивуар, Западная Африка)

Fig. 3. Spatial Distribution of Gold Assay Sampling Points in the Agbaou Mining Complex (Côte d'Ivoire, West Africa)

включают 1183 точки отбора проб почвы (в дальнейшем — точки), со следующими параметрами: долгота, широта, высота над уровнем моря и содержание золота в миллиардных долях (ppb) (см. табл. 1). Геодезические координаты, представленные в градусах, были преобразованы в пространственные прямоугольные координаты [21]. По отчету значение БС золота, необходимое для рентабельной переработки руды на руднике Агбау, принято равным 250 ppb (массовая доля 1 ppb = 1 мг/т = 1 мкг/кг = = 1 нг/г). Идентифицированы четыре области интереса: область «Agbaou Main» — действующий рудник, области «Niafouta», «Agbaou Sud» и «Zehiri» — резервные зоны (рис. 3). Зона, находящаяся между областями «Agbaou Main», «Niafouta» и «Agbaou Sud», представляющая интерес, исключена компанией Endeavour Mining Corporation из списка по этическим и экологическим причинам, поскольку в ней расположен населенный пункт Agbahou (рис. 3).

На исходных данных (см. рис. 4) выявлено 176 точек с содержанием, превышающим 250 ppb; 167 точек относятся к зонам интереса: перспективные точки (желтые точки на рис. 4); 9 точек не входят в зону интереса из-за пространственной разрозненности и признаны неперспективными.

Результаты выделения перспективных и неперспективных точек, полученные с использованием различных под-

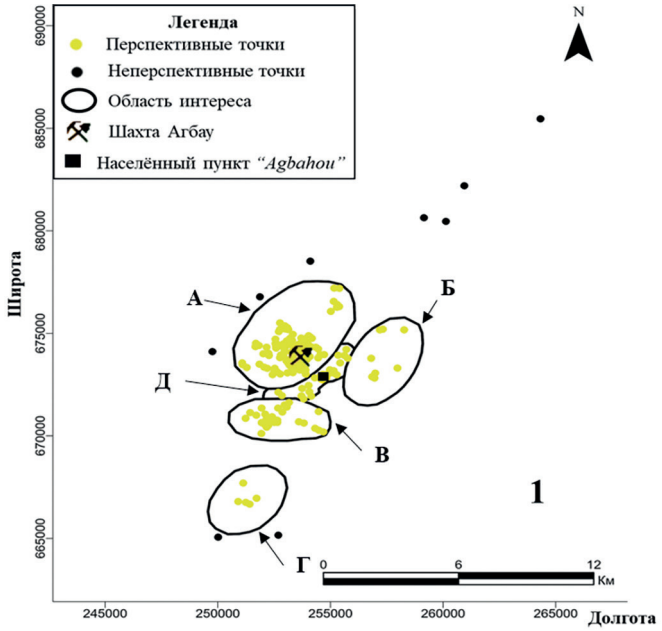

Рис. 4. Распределение точек с содержанием выше 250 pbb в соответствии с зонами интереса Endeavour Mining Corporation: А – область Agbaou Main, Б – область «Niafouta», В – область «Agbaou Sud», Г – область «Zehiri» и Д – область с населенным пунктом «Agbahou»

Fig. 4. Distribution of Points with Gold Content Above 250 ppb According to Zones of Interest Defined by Endeavour Mining Corporation: A – Agbaou Main Zone, B – Niafouta Zone, C – Agbaou Sud Zone, D – Zehiri Zone, E – Agbahou Populated Settlement Zone

Таблица 2

Результаты расчета показателей эффективности подходов МИМ, КИМ, ИГО и компании Endeavour Mining Corporation

Performance Metrics of the Modified Moran's Index (MMI), Classical Moran's Index (CMI), and Getis-Ord Index (GOI) Approaches, and Data Provided by Endeavour Mining Corporation

Наименование	Endeavour Mining Corporation	Методика МИМ	Методика КИМ	Методика ИГО
Точки с содержанием ⩾ 250 ppb	176	176	176	176
Перспективные точки (*TP*)	167	167	126	126
Неперспективные точки (*TN*)	9	9	9	8
Неперспективные точки, выявленные как перспективные (*FP*)	0	2	0	1
Перспективные точки, выявленные как неперспективные (*FN*)	0	2	41	41
Sensitivity (%)	100	98	76	75
Specificity (%)	100	82	100	89
positvePrecision (%)	100	98	100	99
negativePrecision (%)	100	82	18	16
Accuracy (%)	100	98	77	75
F1-score (%)	100	98	86	84

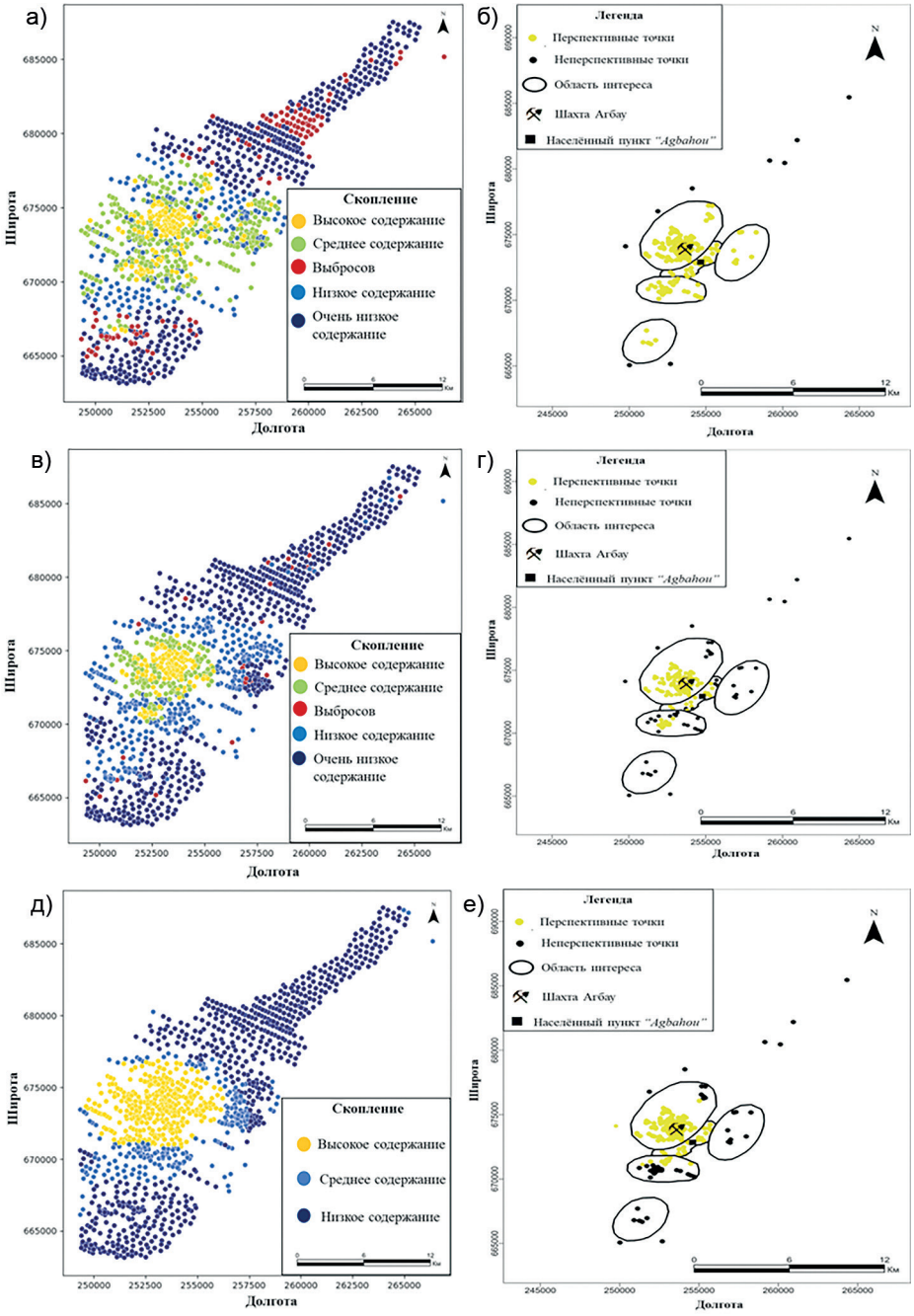

Рис. 5. Результаты исследования: методика МИМ (скопления (а); перспективные и неперспективные точки (б)); методика КИМ (скопления (в); перспективные и неперспективные точки (г)); методика ИГО (скопления (д); перспективные и неперспективные точки (е))

Fig. 5. The results of the study: MMI methods (clusters (a); promising and unpromising points (b)); CMI method (clusters (v); promising and unpromising points (g)); GOI method (clusters (d); promising and unpromising points (e))

ходов, представлены на рис. 5, *б, г, е*. Методика модифицированного индекса Морана позволила выделить скопления точек, отражающие различные уровни минерализации (рис. 5, *а*), По методу МИМ выявлено 167 точек с содержанием золота выше 250 ppb, отмеченных желтым и 9 неперспективных, отмечены черным цветом (рис. 5, *б*).

Метод КИМ позволил выделить пространственные скопления, отражающие различные уровни минерализации (см. рис. 5, *в*). Формально идентифицированы 126 точек с содержанием золота выше 250 ppb, принадлежащие к пространственной скоплению с высоким содержанием золота, отмечены желтым и 9 неперспективных, выделены черным цветом (рис. 5, *г*).

Для подхода, основанного на ИГО, рассчитанный индекс *G* позволил разделить исходные данные на скопления горячих точек (точки с высоким содержанием золота), скопления холодных точек (точки с низким содержанием золота) и незначительные скопления (точки с незначительным содержанием) (рис. 5, *д*). Метод ИГО позволил формально идентифицировать 126 точек с содержанием золота выше 250 ppb, и 8 неперспективных точек (рис 5, *е*).

Для оценки эффективности методов использовались следующие показатели [22]: чувствительность (англ. sensitivity), специфичность (англ. specificity), точность положительных (англ. positvePrecision), точность отрицательных (англ. negativePrecision), общая точность (англ. accuracy) и F-метрика (англ F1-score).

Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 2.

Из таблицы следует, что метрики эффективности accuracy и F1-score свидетельствуют о превосходстве авторского метода МИМ в определении перспективных точек. Для БС, равного 250 pbb, подход МИМ достиг accuracy 98% и F1-score 98%, за ним следует подход КИМ (accuracy: 77%; F1-score: 86%), а на третьем месте — подход ИГО (accurac: 75%; F1-score: 84%).

Таблица 3

Результаты расчета показателей F1-score. Диапазон изменения значения БС (141,6 ppb–500 ppb)
The results of calculating the F1-Score Metrics. Range of change Cut-Off Values (141.6 ppb–500 ppb)

Значения БС (pbb)	F1-score МИМ (%)	F1-score КИМ (%)	F1-score ИГО (%)
142	93	93	90
200	98	86	85
250	98	86	84
300	99	81	77
350	99	78	76
400	99	75	70
450	99	70	67
500	96	66	55

Для проверки устойчивости предложенного МИМ подхода были проанализированы изменения F1-score для каждой методики при варьировании значения БС в диапазоне от 142 ppb до 500 ppb. Значение БС является изменяемым параметром, основанным на технологических и экономических возможностях предприятия для рентабельной переработки руды. Результаты расчета F1-score при различных значениях БС (от 141,6 ppb до 500 ppb) приведены в табл. 3 и отображены на рис. 6.

Из расчетов следует, что эффективность подходов, основанных на методах КИМ и ИГО, имеет тенденцию к снижению при увеличении БС, в то время как эффективность подхода МИМ остается стабильной и постоянной.

Из рассмотренных подходов метод ИГО показывает наименьшую эффективность: его максимальный F1-score составляет 90% при БС, равном среднему содержанию (142 ppb). Метод КИМ

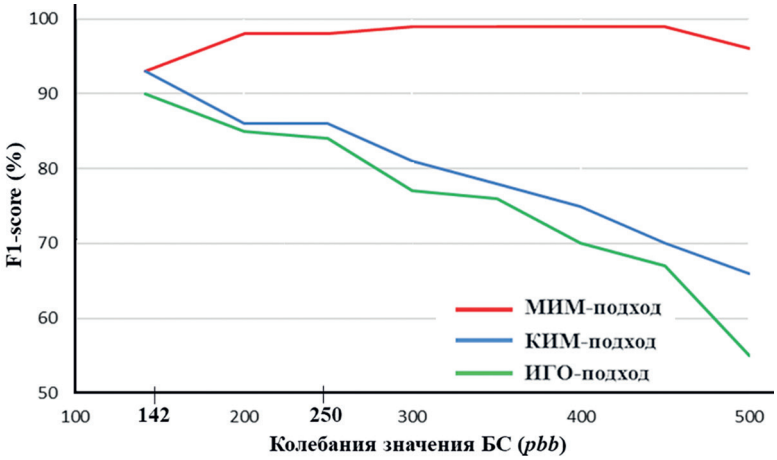

Рис. 6. Кривые тренда показателей F1-score при колебании порогового значения в диапазоне от 142 до 500 ppb по методам МИМ, КИМ и ИГО

Fig. 6. Trend Curves of F1-Score Metrics Under Varying Cut-Off Values (142–500 ppb) for the MMI, CMI, and GOI Methods

достигает F1-score 93% при БС 142 ppb, а метод МИМ показывает стабильную F1-score 99% в диапазоне БС от 300 ppb до 450 ppb.

Эффективность метода МИМ и КИМ существенно различается, поскольку при БС, отличного от среднего значения содержаний совокупности точек, ось *S* позволяет четко разделить полученные результаты на зоны, где содержание превышает БС и где оно ниже. В отличие от этого в подходе Морана группировка всегда происходит вокруг среднего значения (ось μ), которое остается неизменным показателем независимо от выбранного БС.

Можно предполагать, что авторский подход МИМ эффективен при выявлении закономерностей в неоднородном пространственном распределении минерализации и может быть применен в процессе картирования минерального потенциала на основе данных с целью классификации перспективности.

Заключение

В статье рассмотрены результаты проведенного сравнительного исследования методик пространственной автокорреляции: предложенный авторами подход МИМ, КИМ и ИГО, оценена их эффективность при выявлении закономерностей скоплений минерализации для формирования классификации перспективности полезных ископаемых, используемой для моделей машинного обучения. Анализ выполнен на основе данных известного горнодобывающего комплекса Агбау.

Исследование показало эффективность предложенной методики МИМ для формирования классификаторов перспективности, играющих ключевую роль при картировании минерального потенциала. Классификаторы согласуются с неоднородным распределением показателей минерализации, характеризующихся факторами оценки рентабельности (выраженными в виде БС) в текущих условиях их эксплуатации.

Результаты работы могут использоваться при разработке алгоритма машинного и глубокого обучения для картирования минерального потенциала.

В перспективе планируется использовать методику, основанную на МИМ,

наряду с известными подходами для выделения классов распределения однородных зон минерализации с учетом текущих условий разработки месторождения при создании нейронных моделей прогноза для малоизученных участков в пределах известных рудных районов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stöferle R. P., Valek M. J.* Stagflation 2.0: In gold we trust report. Liechtenstein: Incrementum, 2022, XVI, 393 p.

2. *Некрасов Е. М.* Принципы выбора рудных районов для поиска золоторудных месторождений // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2022. — № 63(6). — С. 77—86. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-6-77-86.

3. *Пискорский Н. П.* Минералого-геохимические модели зональности и локальный прогноз золотого оруденения // Золотодобыча. — 2022. — № 11 (288). https://zolotodb.ru/article/12883.

4. *Рустамов А. Р.*, *Пеньков Г. М.*, *Петраков Д. Г.*, *Рустамова М. А.* Современные методы применения машинного обучения как инструмента прогнозирования добычи нефти // Недропользование. — 2024. — Т. 24. — № 1. — С. 44—50. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.1.6.

5. *Rezapoor M., Abedi M., Bahroudi A., Rahimi H.* A clustering approach for mineral potential mapping: A deposit-scale porphyry copper exploration targeting // Geopersia. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 149—163. DOI: 10.22059/GEOPE.2019.284414.648488.

6. *Daviran M., Maghsoudi A., Cohen D., Ghezelbash R., Yilmaz H.* Assessment of various fuzzy c-mean clustering validation indices for mapping mineral prospectivity: Combination of multifractal geochemical model and mineralization processes // Natural Resources Research. 2019, vol. 29, pp. 229—246. DOI: 10.1007/s11053-019-09571-9.

7. *Carranza E. J. M.*, *Laborte A. G.* Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines) // Computers & Geosciences. 2015, vol. 74, pp. 60—70. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.10.004.

8. *Ram A., Sunita J., Jalal A. S., Kumar M.* A density based algorithm for discovering density varied clusters in large spatial databases // International Journal of Computer Applications. 2010, vol. 3, no. 6. DOI: 10.5120/739-1038.

9. *Красных С. С.* Пространственная автокорреляционная модель внедрения цифровых технологий в бизнес Российской Федерации // Вестник Академии знаний. — 2020. — № 4 (39). — С. 228—235. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10467.

10. *Хамидуллин Р. А.*, *Брехова И. Н.* Характеристика типов и видов геологических карт // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2017. — № 2(4). — С. 72—74.

11. *Брагин В. И.*, *Харитонова М. Ю.*, *Мацко Н. А.* Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 617—625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.

12. *Rezapoor M., Abedi M., Bahroudi A., Rahimi H.* A clustering approach for mineral potential mapping: A deposit-scale porphyry copper exploration targeting // Geopersia. 2019, vol. 10, pp. 146—163. DOI: 10.22059/GEOPE.2019.284414.648488.

13. *Митин Г. В.*, *Панов А. В.* Кластеризация одномерных потоковых данных на основе плотности распределения данных в пространстве признаков // Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт». — 2024. — № 1. — С. 18—33.

14. *Shaw K. O.*, *Goïta K., Germain M.* Prospectivity mapping of heavy mineral ore deposits based upon machine-learning algorithms: Columbite-tantalite deposits in west-central côte d'ivoire // Minerals. 2022, vol. 12, no. 11, article 1453. DOI: 10.3390/min12111453.

15. *Виллиамс М. В.*, *Кузяков О. Н.* Сравнительный анализ методов идентификации кластеров getis-ord gi* и dbscan при разведке полезных ископаемых // Автоматизация и информатизация ТЭК. — 2025. — № 1(618). — С. 35—41.

16. *Hronsky J. M. A.*, *Kreuzer O. P.* Applying spatial prospectivity mapping to exploration targeting: Fundamental practical issues and suggested solutions for the future // Ore Geology Reviews. 2019, vol. 107, pp. 647—653. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.03.016.

17. *Каширцева А. П.* Расчет бортового содержания при подготовке технико-экономических обоснований отработки золоторудных месторождений // Математическое и компьютерное моделирование в экономике. — 2016. — № 1. — С. 233—239.

18. *Нкрума А. Х. М.*, *Файзрахманов Р. А.*, *Силина Т. С.* Методика и алгоритм статистического анализа показателей минерализации территорий с использованием модифицированного индекса Морана // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2025. — № 2. — С. 150—160.

19. *Фомин С. И.*, *Говоров А. С.* Обоснование выбора бортового содержания полезных компонентов в руде при проектировании карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 12. — С. 169—182. DOI: 10.25018/0236_1493_ 2023 12 0 169.

20. *Anselin L.* Local indicators of spatial association — LISA // Geographic Analysis. 1995, vol. 27, pp. 93—115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995. tb 00338.x.

21. *Куприянов А. О.* Преобразования координат при проектировании протяженных объектов // Перспективы науки и образования. — 2016. — № 1(19). — С. 53—57.

22. *Тимофеев М. В.* Способ проверки гипотезы в прикладных задачах маркетинга при помощи матрицы ошибок // Столыпинский вестник. — 2022. — № 9. — С. 4830—4840. ГИАБ

REFERENCES

1. Stöferle R. P., Valek M. J. *Stagflation 2.0: In gold we trust report*. Liechtenstein, Incrementum, 2022, XVI, 393 p.

2. Nekrasov E. M. Principles governing the selection of ore regions for gold deposit search. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration*. 2022, no. 63(6), pp. 77—86. [In Russ]. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-6-77-86.

3. Piskorsky N. P. Mineralogical and geochemical models of zoning and local forecast of gold mineralization. *Gold mining*. 2022, no. 11(288). [In Russ]. https://zolotodb.ru/article/12883.

4. Rustamov A. R., Penkov G. M., Petrakov D. G., Rustamova M. A. Modern methods of using machine learning as a tool for oil production forecasting. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2024, vol. 24, no. 1, pp. 44—50. [In Russ]. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.1.6.

5. Rezapoor M., Abedi M., Bahroudi A., Rahimi H. A clustering approach for mineral potential mapping: A deposit-scale porphyry copper exploration targeting. *Geopersia*. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 149—163. DOI: 10.22059/GEOPE.2019.284414.648488.

6. Daviran M., Maghsoudi A., Cohen D., Ghezelbash R., Yilmaz H. Assessment of various fuzzy c-mean clustering validation indices for mapping mineral prospectivity: Combination of multifractal geochemical model and mineralization processes. *Natural Resources Research*. 2019, vol. 29, pp. 229—246. DOI: 10.1007/s11053-019-09571-9.

7. Carranza E. J. M., Laborte A. G. Random forest predictive modeling of mineral prospectivity with small number of prospects and data with missing values in Abra (Philippines). *Computers & Geosciences*. 2015, vol. 74, pp. 60—70. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.10.004.

8. Ram A., Sunita J., Jalal A. S., Kumar M. A density based algorithm for discovering density varied clusters in large spatial databases. *International Journal of Computer Applications*. 2010, vol. 3, no. 6. DOI: 10.5120/739-1038.

9. Krasnykh S. S. Spatial autocorrelation model for the implementation of digital technologies in the business of the russian federation. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2020, no. 4 (39), pp. 228—235. [In Russ]. DOI: 10.24411/2304-6139-2020-10467.

10. Khamidullin R. A., Brekhova I. N. Characteristics of types and kinds of geological maps. *Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2017, no. 2(4), pp. 72—74. [In Russ].

11. Bragin V. I., Kharitonova M. Yu., Matsko N. A. A probabilistic approach to the assessment of dynamic onboard contents. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 251, pp. 617—625. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.

12. Rezapoor M., Abedi M., Bahroudi A., Rahimi H. A clustering approach for mineral potential mapping: A deposit-scale porphyry copper exploration targeting. *Geopersia*. 2019, vol. 10, pp. 146—163. DOI: 10.22059/GEOPE.2019.284414.648488.

13. Mitin G. V., Panov A. V. Clustering of one-dimensional streaming data based on the density of data distribution in the feature space. *Electronic scientific journal «IT-Standard»*. 2024, no. 1, pp. 18—33. [In Russ].

14. Shaw K. O., Goïta K., Germain M. Prospectivity mapping of heavy mineral ore deposits based upon machine-learning algorithms: Columbite-tantalite deposits in west-central côte d'ivoire. *Minerals*. 2022, vol. 12, no. 11, article 1453. DOI: 10.3390/min12111453.

15. Williams M. V., Kuzyakov O. N. Application of Getis-Ord Gi* and DBSCAN method when prospecting for mineral resources. *Automation and informatization of the fuel and energy complex*. 2025, no. 1(618), pp. 35—41. [In Russ].

16. Hronsky J. M. A., Kreuzer O. P. Applying spatial prospectivity mapping to exploration targeting: Fundamental practical issues and suggested solutions for the future. *Ore Geology Reviews*. 2019, vol. 107, pp. 647—653. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.03.016.

17. Kashirtseva A. P. Calculation of cut-off grade in the preparation of feasibility studies for the development of gold ore deposits. *Mathematical and Computer Modeling in Economics*. 2016, no. 1, pp. 233—239. [In Russ].

18. Nkrumah A. H. M., Fayzrakhmanov R. A., Silina T. S. Methodology and algorithm for analyzing the patterns of spatial distribution of mineralization. dynamic spatial autocorrelation approach. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*. 2025, no. 2, pp. 150—160. [In Russ].

19. Fomin S. I., Govorov A. S. Validation of the chosen cutoff grade value in open pit mine design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 12, pp. 169—182. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023 12 0 169.

20. Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographic Analysis*. 1995, vol. 27, pp. 93—115. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995. tb 00338.x.

21. Kupriyanov A. O. Coordinate transformations in the design of extended objects. *Perspectives of Science and Education*. 2016, no. 1(19), pp. 53—57. [In Russ].

22. Timofeev M. V. Method of testing a hypothesis in applied marketing problems using an error matrix. *Stolypinsky Vestnik*. 2022, no. 9, pp. 4830—4840. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нкрума Ассуму Херве Мэтью[1] — аспирант,
e-mail: nkvetcho@gmail.com,
Силина Тамара Сергеевна — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, Уральский государственный горный университет,
e-mail: tamarasil@mail.ru,
Файзрахманов Рустам Абубакирович[1] — д-р экон. наук,
профессор, зав. кафедрой,
e-mail: Fayzrakhmanov@gmail.com,
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет.
Для контактов: Нкрума А.Х.М., e-mail: nkvetcho@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Assoumou Herve Mathieu Nkrumah[1], Graduate Student,
e-mail: nkvetcho@gmail.com,
T.S. Silina, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, Ural State Mining University,
620144, Ekaterinburg, Russia, e-mail: tamarasil @mail.ru,
R.A. Faizrakhmanov[1], Dr. Sci. (Econ.), Professor,
Head of Chair, e-mail: Fayzrakhmanov@gmail.com,
[1] Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia.
Corresponding author: A.H.M. Nkrumah, e-mail: nkvetcho@gmail.com.

Получена редакцией 24.07.2025; получена после рецензии 01.08.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 24.07.2025; received after the review 01.08.2025; accepted for printing 10.11.2025.