

**Оконтуривание рудных тел используя метод геостатистических индикаторов:
вероятностные модели**

Аннотация. В статье обсуждается предложенная автором методика оконтуривания рудных тел в 3-х мерном пространстве используя геостатистические индикаторы. Содержание металла (непрерывная пространственная переменная) преобразуется в дискретную переменную путем преобразования в геостатистические индикаторы. Выбранные индикаторы интерполируют в 3-х мерную блочную модель методом кригинг используя вариограммы индикаторов. Таким образом создается вероятностная 3-х мерная модель месторождения, где рассчитанные кригингом значения индикатора означают вероятность данного блока превысить пороговое содержание металла. Используя полученную блочную модель рудные тела оконтуриваются изолиниями по выбранному пороговому значению вероятности индикатора в блоках.

Ключевые слова. Геостатистика, индикаторы, домейны

Абзалов М.З.

**Кендердин тулкуларынын геостатистикалык көрсөткүчтөрүнүн жардамы менен
чектөө: ыктымалдык моделдер**

Аннотация. Макалада автор сунуштаган геостатистикалык көрсөткүчтөрүнүн жардамы менен кендердин тулкуларынын чектерин 3 өлчөмдүү мейкиндикте көрсөтүү ыкмасы талкууланат. Металл курамы (үзгүлтүксүз мейкиндик өзгөрмө) геостатистикалык көрсөткүчтөрдү өзгөртүп түзүү менен дискреттик туруксуздука айланат. Тандалган индикаторлор вариограмма көрсөткүчтөрүн пайдалануу менен кригинг ыкмасы аркылуу 3 өлчөмдүү блок моделин эсептейт. Натыйжада алынган блок-моделин колдонуу менен кен тулкулары сызыктар менен чектелет.

Ачкыч сөздөр. Геостатистика, индикаторлор (көрсөткүчтөр), домендер

Abzalov M.

Constraining of the ore-bodies using geostatistical indicators: probabilistic models

Abstract. The paper describes a special technique of constraining the mineralised bodies in 3D space using geostatistical indicators.

The metal grade (continuous regionalised variable) is transformed geostatistical indicators representing a discrete variable. The chosen indicators are interpolated into 3D block model using a kriging technique applying the variograms of the generated indicators. The obtained estimates represent a 3D probabilistic model of the deposit, where estimated values of the block grade indicators represent probability of the given block to exceed the threshold grade. Based on the block model the mineralised bodies are delineated by isolines at the chosen indicator probability threshold.

Key words. Geostatistics, indicators, domains

Для точной оценки запасов месторождения и выбора методов его отработки рудные тела оконтуриваются в 3-х мерном пространстве и строится их объемная (3-х мерная) модель. Кроме четкого представления геометрии рудных тел, 3-х мерные модели также должны отображать их внутреннюю структуру, включая зональность, наличие безрудных прослоев, наложенные изменения и распространение зон гипергенного выветривания вмещающих пород и руд. Модель так же должна включать небольшие геологические тела имеющие практическое значение для безопасной и экономически рентабельной работы рудника, например, жилы пегматитов, дайки и зоны тектонических нарушений. Точное картирование геологических объектов и, тем более, аккуратное представление их внутренней структуры не всегда возможно, особенно на геологически сложных объектах, где плотность опробования недостаточна для их детального крупномасштабного картирования. Поэтому современная горная индустрия широко использует математические методы для построения вероятностных моделей рудных тел [1,2,3].

Один из приемов построения вероятностной модели рудного тела был разработан автором и основывается на использовании геостатистических индикаторов содержания металла в руде [4].

Описание метода

В основе метода лежит принцип разделения непрерывной переменной, каковой является содержание металла в руде, на дискретные составляющие (Рис.1). Для этого выбирают пороговое значение содержания металла, которое далее используется для расчета геостатистических индикаторов [2,4,5]. Содержания металла трансформируются в индикаторы как показано на диаграмме (Рис.1), то есть присваивается значение 1, если содержание металла в данной пробе равно или превышает пороговое, для остальных случаев, где содержание в пробах меньше порогового, присваивается значение индикатора равное 0.

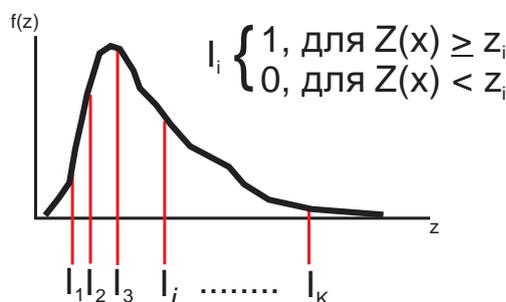


Рис. 1: Разделение непрерывной переменной на несколько индикаторов.

За пороговое значение обычно принимается содержание близкое минимальному экономически рентабельному бортовому содержанию металла на данном месторождении, но в зависимости от типа минерализации могут быть выбраны несколько индикаторов (Рис.1).

Полученные значения индикатора интерполируются, используя кригинг в блочную модель. Таким образом, создается вероятностная 3-х мерная модель месторождения, где рассчитанные кригингом значения индикатора означают вероятность данного блока превысить пороговое содержание металла. Рудные тела и отдельные участки (домены) оконтуриваются по вероятности блока превысить пороговое значение. Обычно это соответствует рассчитанной величине индикатора от 0.5 до 0.7 [5], но более точно оно определяется эмпирически, путем сопоставления вероятностной модели индикаторов с геологическими данными, которые используют для калибровки математической модели.

Применение

Метод первоначально предназначался для оконтуривания золоторудного штокверка на месторождении Мелиадин в Канаде [4] где наличие разновозрастных генераций и минеральных ассоциаций, контролируемых разно ориентированными и взаимно пересекающимися структурами, не позволили оконтурить рудные тела традиционными детерминистскими методами (wireframes). После успешного применения на этом месторождении, метод в последующем был использован для оконтуривания урановых роллов, а также применялся для оценки запасов тектонически перераспределенных медно-никелевых руд месторождений и на месторождениях медно-порфировой формации [4].

Золоторудное месторождение Мелиадин, Канада. Месторождение Мелиадин находится на севере Канады, где расположено в геологической структуре Ренкин Инлет складчатого пояса Черчилл. Месторождение относится к докембрийскому орогенному типу золоторудных месторождений. Вмещающие породы представлены песчаниками, преимущественно аркозового состава, переслаивающимися с алевролитами и аргиллитами с прослоями железистых кварцитов (Рис.2). Осадочные породы перекрыты мощной толщей основных вулканитов.

Золоторудная минерализация представлена кварцевыми штокверками, развитыми по зонам тектонических нарушений и сопровождается ореолами вкрапленной минерализации, развитыми в гидротермально измененных породах. Основной рудоконтролирующей структурой является зона межпластового смятия на контакте осадочной и вулканогенной толщ вместе с ее оперяющими разломами, развитыми в песчано-алевролитовой толще (Рис.2, 3).

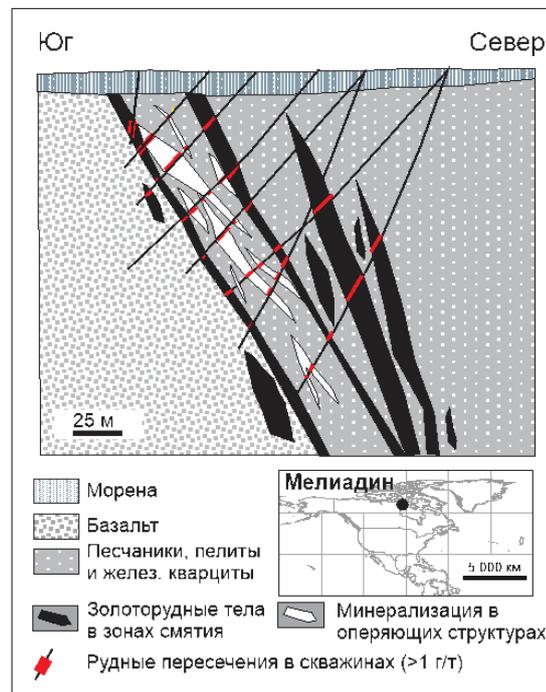


Рис. 2: Геологический разрез месторождения Мелиадин [4,5].

Для оконтуривания рудных тел был использован метод геостатистических индикаторов, которые рассчитывались для порогового содержания 1г/т золота в пробе. Выбранный индикатор $I_{Au>1г/т}$, соответствующему естественной геологической границе рудных тел месторождения и, поэтому, наиболее удобен для его 3-х мерного моделирования [5].

Распределение в пространстве индикатора $I_{Au>1г/т}$ рассчитывалось кригингом используя параметры соответствующей вариограммы $\Gamma_{Au>1г/т}$. Полученная 3-х мерная вероятностная модель далее сопоставлялась с исходными данными, в первую очередь с детальной геологической интерпретацией выполненной по типовым разрезам месторождения (Рис.4). Сравнительный анализ вероятностной модели индикатора с типовыми разрезами выявил, что изолиния 0.3 индикатора $I_{Au>1г/т}$ наиболее близко соответствует геологически откартированным контурам рудных тел на типовых разрезах (Рис.4а) и, в целом, построенная вероятностная модель хорошо согласуется со структурно-геологической интерпретацией месторождения (Рис. 4б). В дальнейшем, изолиния 0.3 индикатора $I_{Au>1г/т}$ была выбрана для оконтуривания рудных тел и оценки запасов месторождения. Участки богатых руд оконтуривались отдельно, используя пороговое значение 5 г/т для расчета индикатора $I_{Au>5г/т}$.

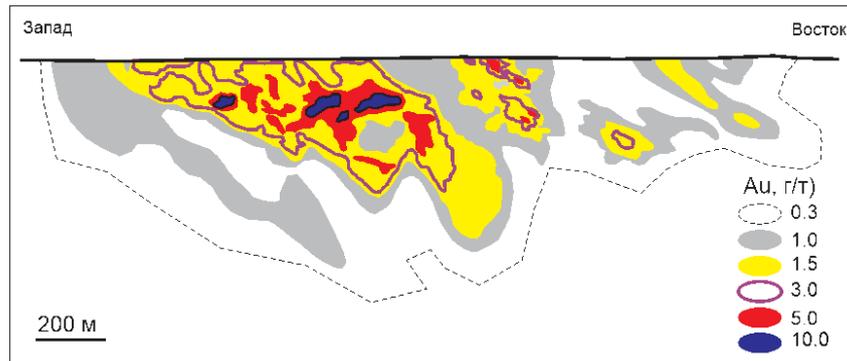


Рис. 3: Продольная геологическая проекция рудного тела 1000, месторождения Мелиадин [4,5].

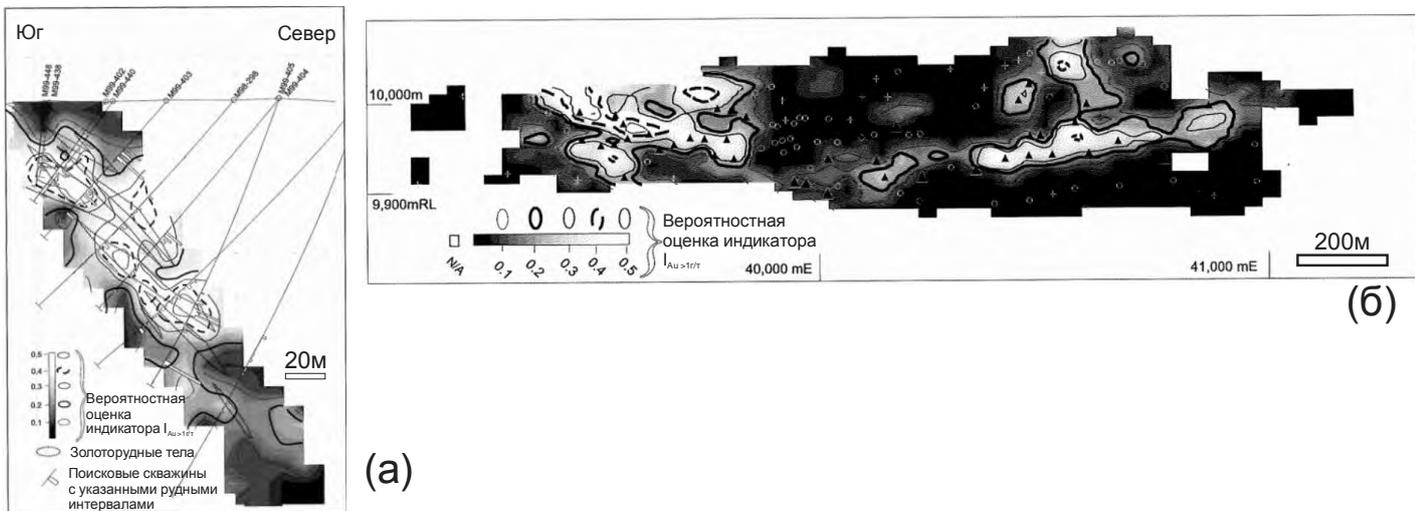


Рис. 4: (а) Геологический разрез месторождения Мелиадин и (б) продольная геологическая проекция рудного тела 1000, показывающие рассчитанные вероятностные оценки индикатора $I_{Au>1г/т}$

Медно-никелевое месторождение Клифф, Австралия. При наличии богатых рудных столбов, особенно если они контролируются другими структурами, отличными от тех, что контролируют распределение рядовых руд, выбираются дополнительные индикаторы (Рис.5). Подобная геологическая ситуация часто складывается на полихронных и/или полигенных месторождениях где разные генерации оруденения пространственно совмещены образуя сложный структурный узор месторождения. Примером такого объекта является медно-никелевое месторождение Клифф в Западной Австралии где взаимно наложилось 3 генерации медно-никелевых руд, преимущественно брекчиевых и прожилково-вкрапленных. Данные генерации руды отличаются

содержаниями никеля (Рис. 5а) и контролируются разными структурами (Рис.5 b, c). Для оконтуривания рудных тел были использованы 3 индикатора: $I_{Ni>0.7\%}$, $I_{Ni>2.4\%}$ и $I_{Ni>4.2\%}$. Полученная модель схематично представлена на Рисунке 5d.

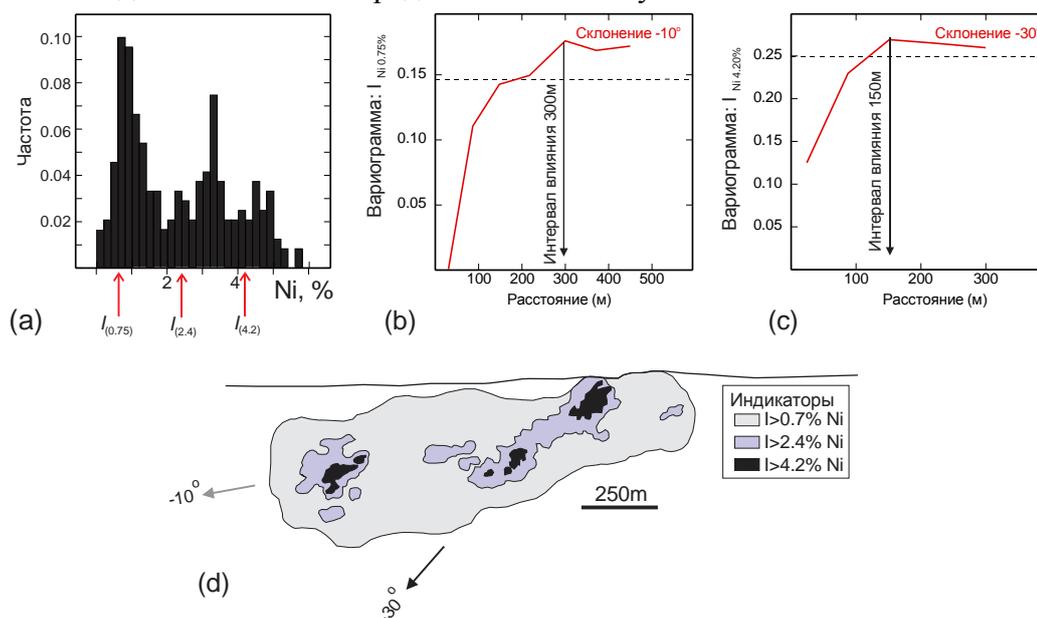


Рис. 5: Геоestatистическая модель, месторождение Клифф: (а) гистограмма содержаний никеля с указанными значениями индикаторов, выбранных для построения вероятностной модели; (b) вариограмма индикатора $I_{Ni} > 0.75\%$, соответствующего рядовым рудам; (c) вариограмма индикатора $I_{Ni} > 4.2\%$, соответствующего богатым рудам; (d) вероятностная модель индикаторов на продольной проекции рудного тела.

Заклучение

Предложенный метод 3-х мерного моделирования геостатистических индикаторов позволяет строить вероятностную математическую модель месторождения, используя которую рудные тела можно оконтуривать по выбранному бортовому содержанию. Апробация метода на различных месторождениях, включая золоторудные объекты, медно-никелевые и медно-порфиновые месторождения, показала в целом хорошее соответствие между математической моделью и традиционной геологической интерпретацией данных месторождений. Предложенный метод оптимально подходит для комплексных рудных тел, где структура месторождения осложнена наличием разновозрастных генераций и распределение минеральных ассоциаций контролируется разно ориентированными и взаимно пересекающимися структурами, что не позволяет оконтуривать рудные тела традиционными детерминистскими методами. При правильном выборе индикаторов и умелом анализе их пространственного распределения этот метод позволяет строить детальные 3-х мерные модели месторождений, даже для таких структурно сложных типов как урановые роллы.

Список литературы:

1. Strebelle. S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, v.34, 2002, pp.1-22.
2. Srivastava, R.M. Probabilistic modelling of ore lens geometry: an alternative to deterministic wireframes. *Mathematical Geology*, v.37, 2005, pp.513-544.
3. Armstrong. M., Galli. A., Beucher. H., Le Loc'h. G., Renard. D., Doligez. B., Eschard. R. and Geffroy. F. *Plurigaussian simulation in geosciences*, 2nd edn. Springer, Berlin: 2011, 149p.
4. Abzalov, M.Z. *Applied Mining Geology. Modern Approaches in Solid Earth Sciences*, 12, Springer, Berlin: 2016, 448p.

5. Abzalov, M.Z. and Humphreys, M. Resource estimation of structurally complex and discontinuous mineralisation using non-linear geostatistics: case study of a mesothermal gold deposit in northern Canada. *Exploration and Mining Geology*, v.11, 2002, pp.19-29.