

ФРАКТАЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗВЕДКИ И ОЦЕНКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

*Положения фрактальной геометрии в области разведки месторождений твердых полезных ископаемых ранее практически не использовались. В работе рассмотрены вопросы их применения для определения сложности морфологии рудных тел и типизации объектов, а также для оценки ошибок геометризации на ранних стадиях геологоразведочных работ. Освещены перспективы использования принципов теории фракталов для математического описания различных зависимостей между характеристиками геологических объектов, в том числе при повариантном подсчете запасов. **Ключевые слова:** фрактальная геометрия, размерность Хаусдорфа, ошибки геометризации, морфология, рудные тела.*

Kushnarev P.I., Ivanov S.N. (VIMS)

FRactal Geometry in Solving Problems of Exploration and Evaluation of Solid Mineral Deposits

*The provisions of fractal geometry in the field of exploration of solid mineral deposits were previously practically not used. The paper considers the issues of their application to determine the complexity of the morphology of ore bodies and the typification of objects, as well as to assess the errors of geometrization at the early stages of geological exploration. The prospects of using the principles of fractal theory for the mathematical description of various dependencies between the characteristics of geological objects, including in the case of variantwise calculation of reserves, are highlighted. **Key-words:** fractal geometry, Hausdorff dimension, geometrization errors, morphology, ore bodies.*

Теоретические положения фрактальной геометрии, предложенной Б. Мандельбротом [14], в настоящее время широко используются при решении задач многих научных дисциплин — от географии, метеорологии, медицины, биологии, радиотехники, астрономии, гидро- и термодинамики до прикладного декоративного искусства. Современные достижения в изучении дисциплин с данных позиций позволяют заключить, что *фрактальная дробность является одним из фундаментальных свойств природных объектов.*

Необходимость и возможность использования принципов фрактального анализа при изучении и описании геологических объектов отмечается в работах отечественных исследователей [4, 8]. Главным образом эти работы затрагивают вопросы прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископа-

емых. Для целей разведки и геолого-экономической оценки эти подходы ранее широко не применялись.

Природные геологические, в том числе рудные объекты, относятся к стохастическим фрактальным системам. По Б. Мандельброту «*Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому*» [14]. Главной количественной характеристикой фрактального объекта является его размерность, которая в масштабно-инвариантных системах определяется нецелой (дробной) величиной. Размерность, определенная с помощью покрытия множества областями фиксированной формы и размера, математики называют емкостью множества или размерностью Хаусдорфа. Для геологических объектов геометрическая размерность может оцениваться применительно к линии, площади и объему.

Формирование фрактальной структуры рудных объектов связано с особенностями их генезиса. Для гидротермальных месторождений в качестве теоретической основы процессов их образования рассматривается перколяционная модель [8, 9], которая в полной мере согласуется с положениями фрактальной геометрии. В результате возникают поля концентраций полезного ископаемого, характеризующиеся наличием определенной размерности.

Одной из задач, для решения которой могут быть использованы принципы фрактальной геометрии, является *оценка сложности строения геологического объекта* и, в частности, описания морфологии рудных образований. Последняя является следствием проведения границ в пределах поля содержаний компонентов по определенным кондиционным показателям.

Описание сложности строения месторождений являются основой их классификации [11] для целей выбора объектов-аналогов и определения параметров разведочной сети, особенно на ранних стадиях изучения рудных объектов. Основными признаками для группировки месторождений являются: масштаб оруденения, его морфологические особенности и изменчивость свойств полезного ископаемого, в том числе содержаний.

Для количественной характеристики сложности строения по морфологическим признакам в ряде Методических рекомендаций по применению классификации запасов [15] предлагаются коэффициент рудоносности, показатель сложности и коэффициент вариации мощности. Первые два показателя в действительности не характеризуют морфологию рудных тел и не могут являться классификационными признаками. Они не определяют геометрию сети и сами изменяются по мере ее сгущения.

Низкая эффективность использования коэффициента вариации мощности (V_m) для характеристики сложности строения объекта может быть проиллюстрирована на примере модельных объектов А, Б и В, представленных на рис. 1. Они имеют одинаковые показатели: площадь в сечении, общую длину, среднюю мощность, а также коэффициенты вариации, рудоносности и сложности. Вместе с тем, визуально

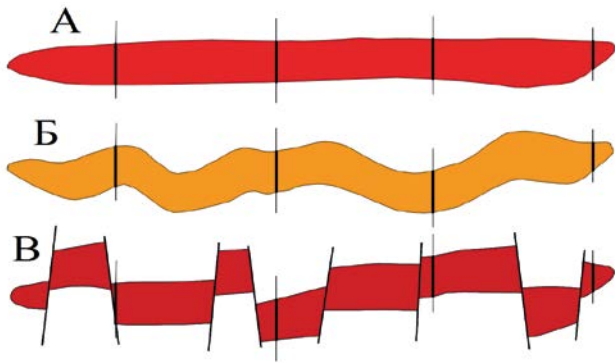


Рис. 1. Модельные объекты (А, Б, В) разной сложности при сходстве формальных показателей

эти объекты обладают разной сложностью контуров, которая в системе существующих подходов к описанию морфологии объектов никак не характеризуются.

Сложность формы рудных тел отражается на величине ошибок геометризации. При шаге сети 50 м, отмеченном на рисунке, величина ошибок геометризации по объектам составит 7, 19 и 30 % соответственно.

Таким образом, все количественные показатели сложности, касающиеся описания морфологических характеристик объектов, являются не состоятельными. Главный их недостаток состоит в том, что они не используются для обоснования выбора параметров разведочной сети [12], что является основной целью группировки объектов по сложности строения.

Проблема оценки сложности формы объектов может решаться на основе теории фракталов. Контур природного объекта, в том числе рудных образований относится к стохастическим фрактальным системам. Главной количественной характеристикой фрактального объекта является его размерность, которая характеризует зависимость длины линии ($L(\epsilon)$) от шкалы измерений — ϵ (базы):

$$L(\epsilon) = \epsilon^{-D}$$

Размерность (D), определенная с помощью покрытия множества областями фиксированной формы и размера, называется емкостью множества или размерностью Хаусдорфа.

Исходными данными для определения размерности рудных образований в 2-D пространстве являются разрезы, планы и проекции, на которых установлена их форма. С теоретических позиций размер шкалы измерений — базы

может быть бесконечно малым, что предопределяет бесконечную длину линии $L(\epsilon)$. С практической точки зрения при изучении формы рудных объектов предельная длина шага измерений должна соответствовать линейным размерам участков селективной выемки при отработке — минимальной выемочной единицы. На открытых горных работах она составляет обычно 3–5 до 10–15 м. Для подземной отработки этот размер может сокращаться до 1–2 м. Этими пределами ограничивается детальность изучения формы рудных тел.

Наиболее простым и эффективным приемом оценки размерности D на плоскости является процедура boxcounting [2, 9]. Она состоит в неоднократном наложении квадратной сетки с определенной длиной стороны на объект исследований. Примеры таких однократных наложений сеток последовательно уменьшающихся размеров показаны на рис. 2.

Для сетки каждого размера подсчитывается число «занятых» ячеек, то есть ячеек, в которых отмечается наличие границ рудного тела. Далее подсчитывается среднее число таких ячеек для каждой сетки и в билוגарифмическом масштабе строится их зависимость от размеров стороны ячейки. График такой зависимости приведен на рис. 3.

Тангенс угла наклона графика, взятый с обратным знаком, характеризует фрактальную размерность D или метрику Хаусдорфа. В данном случае ее величина составляет 1.3688.

Величина фрактальной размерности D была исследована для месторождений различного морфологического типа и размеров. Ее оценка проведена на основе характеристик формы, установленных по данным сопровождающей эксплуатационной разведки (СЭР). Результаты исследований, в которых участвовали как

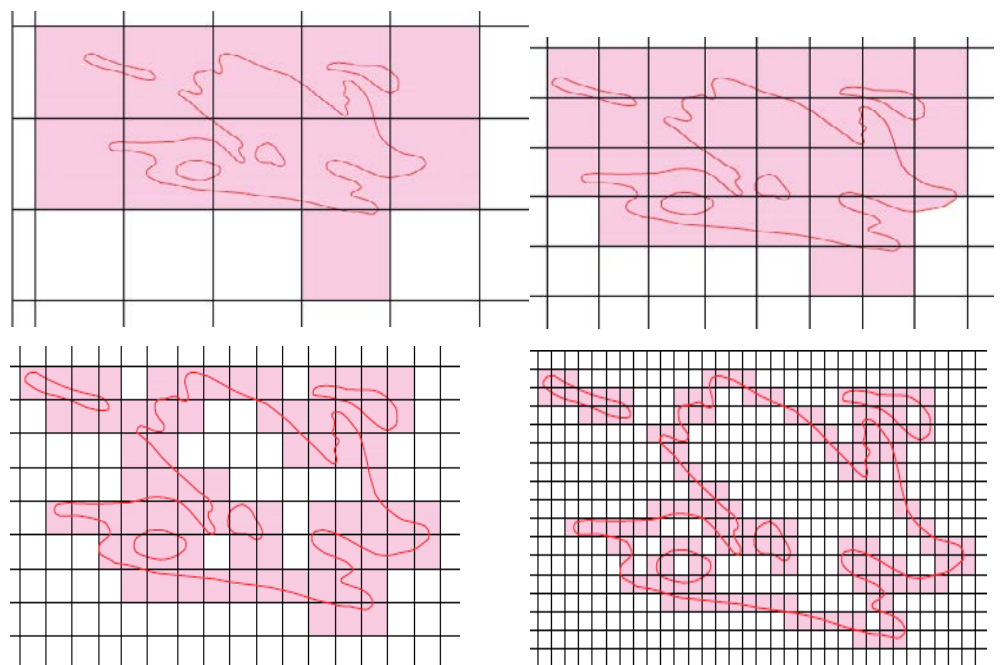


Рис. 2. Примеры наложения на контур рудного тела сеток с размером ячеек 40, 20, 10 и 5 м

золоторудные месторождения, так и объекты других видов минерального сырья, приведены в таблице.

По ряду месторождений определения проведены как по разным участкам, так и для рудных тел, окон-

туренных при разных значениях бортовых содержаний. На основе приведенных данных можно сделать следующие выводы, касающиеся свойств показателя фрактальной размерности D для рудных объектов:

- максимально высокие значения метрики Хаусдорфа характерны для штоковерковых месторождений; ее величина закономерно снижается при переходе к минерализованным зонам (линейные штоковёрки) к залежам и жилам;

- величина метрики D для конкретного месторождения практически не зависит от объекта измерений — плана, разреза, проекции; она определяется с достаточной надежностью по отдельным участкам (фрагментам) рудных образований;

- величина метрики не зависит от бортового содержания (при остальных фиксированных показателях).

С позиций задач разведки самоподобие определяет их еще одно важное свойство рудных объектов: соподчиненность рудных образований разного масштаба при сохранении их размерности. Таким образом, отнесение месторождения к определенному морфологическому типу и классу крупности на ранних стадиях работ позволяет определять геометрию разведочной сети, обеспечивающую достаточную изученность рудных тел и их параметров.

В этом отношении следует вспомнить, что принципы описания рудных объектов на основе выделения в их строении образований разного масштабного уровня предлагались А.Б. Кажданом [10]. Подобные элементы неоднородности и приемы их выделения рассматривались в работах коллектива авторов ЦНИГРИ [6, 16]. С позиций теории фрак-

пример

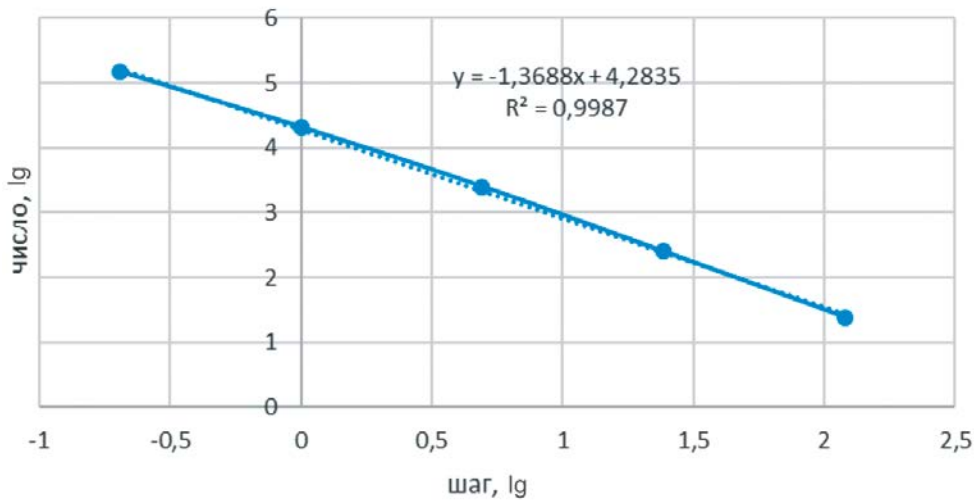


Рис. 3. Зависимость количества «занятых» ячеек от размера их стороны

Фрактальная размерность для месторождений различных морфологических типов

№№	Морфологический тип	Месторождение	Объект	D
1	штоковёрк	Павлик	планы горизонтов	1,46–1,52
2	штоковёрк	Мурунтау	проекция залежей	1,457
3	штоковёрк	Жирекен	планы горизонтов	1,38–1,42
4	штоковёрк	Белая Гора	планы горизонтов	1,41–1,44
5	штоковёрк	Березитовое	планы горизонтов	1,415–1,47
6	штоковёрк	Павлик р-з 16	разрез	1,443
7	штоковёрк	Павлик р-з 17	разрез	1,436
8	штоковёрк	Павлик р-з 19	разрез	1,374
9	минерализованная зона	Наталка	планы горизонтов	1,32–1,38
10	минерализованная зона	Албазино	планы горизонтов	1,27–1,32
11	минерализованная зона	Албазино	разрезы	1,22–1,429
12	минерализованная зона	Березняковское	планы горизонтов	1,36–1,43
13	залежь	Боковое	планы горизонтов	1,16–1,32
14	залежь	Ватугинское	план горизонта	1,351
15	жилы	Дарасун	планы горизонтов	1,16–1,18
16	жилы	Дарасун	проекции	1,152–1,21
17	жилы	Каральвеем	проекции	1,121–1,18
18	жилообразное тело	Майское р.т.1	проекции	1,466
19	жилообразное тело	Майское р.т.1 фр	проекции	1,463
20	жилообразное тело	Майское рт2	проекции	1,478
21	жила	Первенец к	планы горизонтов	1,252
22	жила	Первенец з	планы горизонтов	1,234
23	жила	Двойное 37/3	проекции	1,469
24	жила	Двойное 37/4	проекции	1,439

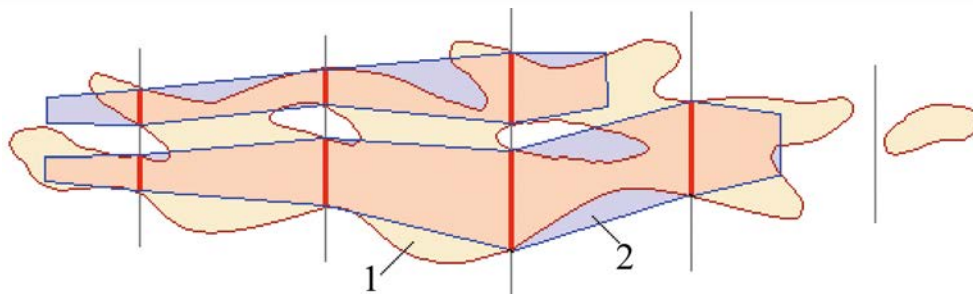


Рис. 4. Определение ошибок геометризации методом разрезания: 1 — площади руды за пределами разведочного контура; 2 — участки пустых пород внутри разведочного контура

талов можно говорить о том, что эти образования характеризуются подобием основных черт, в том числе морфологических, и что в соотношениях количественных показателей элементов строения существует определенная пропорциональность.

На основе оценки размерности Хаусдорфа для рудных объектов определенных морфологических типов возможно определение ошибок геометризации (ОГ), которые рассматриваются в качестве критерия разведанности запасов [7]. Ошибки геометризации (δ) зависят от шага разведочной сети (A) по определенному направлению. Их вычисление возможно эмпирическим методом (разрезания) и по аналитическим выражениям:

$$\delta(A) = 100 * (\sum S_{pz} + \sum S_{пв}) / 2 * S_{ист}, \% \quad (1)$$

$$\text{аналитический расчет —} \\ \delta(A) = 100 * A / 4 * L_{cp}, \% \quad (2)$$

где: A — шаг сети; S_{pz} площади руды за разведочным контуром; $S_{пв}$ — площади безрудных участков в разведочном контуре; $S_{ист}$ — истинная площадь рудного тела. L_{cp} — средняя длина рудного тела.

При использовании эмпирических и аналитических методов «истинные» характеристики формы устанавливаются по сечениям (горизонтам, разрезам) с предельно высокой плотностью наблюдений (рис. 4). Для открытых горных работ «шкала измерений» обычно составляет 4–5×4–6 м (сеть СЭР).

На начальных стадиях геологоразведочных работ, когда участки детализации отсутствуют, «истинная» форма рудных тел и ее характеристики, в том числе средняя длина, остаются неизвестными, что практически исключает возможность использования ОГ для выбора разведочной сети.

Исходные положения для оценки величины ошибок геометризации на основе фрактальной геометрии включают:

- установление размеров предельно плотной сети наблюдений (a), достаточной для выделения минимальных выемочных единиц (МВЕ);

- определение величины фрактальной размерности D для исследуемого объекта.

Величина размерности D принимается по аналогии с учетом морфологического типа оруденения.

Длина рудного контура/периметра, установленная по относительно редкой разведочной сети, будет последовательно увеличиваться по мере ее сгущения до предельно плотного шага a . Соотношение длины «разведочного» и

«истинного» контура в рамках фрактальной геометрии может быть охарактеризовано коэффициентом удлинения ($K_{уд}$), вычисляемым как:

$$K_{уд} = (A/a)^{D-1},$$

где: A — шаг разведочной сети, a — предельно плотный шаг наблюдения, D — метрика Хаусдорфа. Для удобства расчетов может быть использована номограмма, приведенная на рис. 5.

В формуле (1) определения ОГ эмпирическим методом сумму искажающих площадок ($\sum S_{pz} + \sum S_{пв}$) можно выразить через их среднюю ширину как:

$$H_s * P,$$

где: H_s — средняя ширина искажающей площадки, P — ожидаемая (по имеющимся данным) длина периметра рудного тела.

Средняя ширина искажающей площадки H_s может быть оценена по эмпирическому выражению:

$$H_s = A / 20 * (K_{уд}^2 - 1)^{0,5},$$

где: A — шаг выбранной разведочной сети.

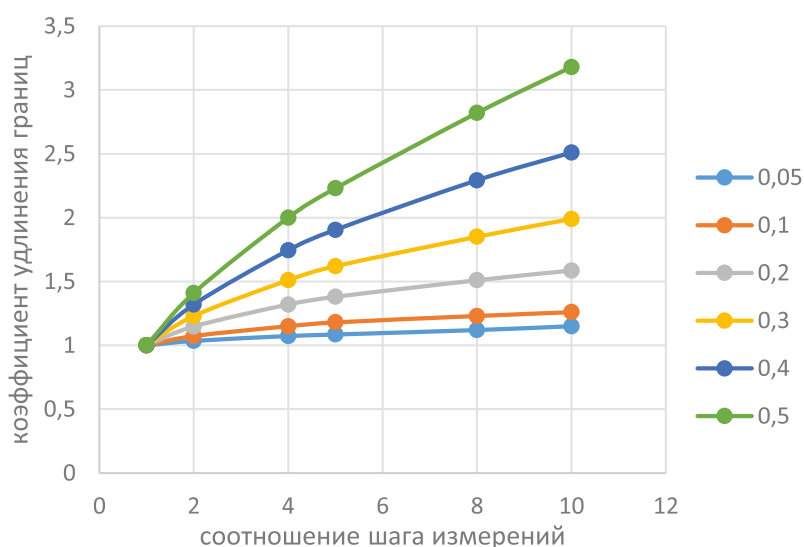


Рис. 5. Номограмма для определения величины коэффициента удлинения контура в зависимости от соотношения шага исходной сети к конечному размеру шага измерений при разном значении $D-1$

Далее, ожидаемая величина ошибки геометризации для выбранного шага разведочной сети A определяется как отношение ширины искажающей площадки к средней мощности рудного тела:

$$\delta(A) = H_S/m_{cp} \times 100 \%,$$

где: m_{cp} — средняя мощность рудного тела.

Проведенными ранее исследованиями [3] было установлено, что предельное значение ошибок геометризации для квалификации запасов по кат. C_1 составляет 50 %. Для выбора сети на начальных стадиях работ для этой категории рекомендуется ориентироваться на среднее допустимое значение ошибок геометризации 30–40 %.

Применение данного подхода может быть рассмотрено на примере. Известно, что проявление, на котором планируются разведочные работы относится к типу минерализованных зон, для которых размерность D может составлять 1,25. Исходя из предполагаемого масштаба оруденения, для разведки запасов кат. C_1 предлагается использовать сеть 40×60 м. Предполагается обработка объекта открытым способом; шаг сети сопровождающей разведки — 5×5 м. Средняя мощность рудных тел по результатам проведенных ранее работ — 17,2 м.

Коэффициент удлинения для шага сети по падению составит 1,6; ширина искажающей площадки — 3,56 м. Расчетное значение ошибки геометризации составит 20,7 %.

Коэффициент удлинения для шага сети по простиранию составит 1,8; ширина искажающей площадки — 6,0 м. Расчетное значение ошибки геометризации составит 34,9 %. Таким образом, выбранные в примере параметры разведочной сети по ожидаемым величинам ошибок геометризации позволят квалифицировать запасы по кат. C_1 .

Рассмотренный подход позволяет дифференцированно оценивать ошибки геометризации для блоков и участков, обладающих разной мощностью рудных тел, при квалификации запасов по итогам геологоразведочных работ.

На основе принципов фрактальной геометрии может проводиться оценка (корректировка) величины потерь и разубоживания [13]. Эта проблема возникает в случае, когда в процессе эксплуатации выявляется более сложная форма рудных тел, чем представлялась по данным ГРП. В основу расчетов также положено определение фрактальной размерности объекта и удлинения контура.

Ширина приконтурной полосы (h), в пределах которой происходят примешивание пустых пород и некондиционных руд и формируются потери, может быть определена в конкретных условиях с учетом технологии горных работ и геологических особенностей объекта. Далее задача сводится к определению периметра/длины контура рудного тела применительно к «шкале измерений» — минимальному размеру выемочной единицы (МВЕ). Величина размерности D для конкретного объекта может быть определена по фактическим данным или принята по аналогии.

Площадь зоны примешивания ($S_{пр}$) вычисляется как произведение расчетной длины контура на ширину зоны. Ожидаемая величина разубоживания R определяется как отношение площади зоны примешивания к общей площади рудного тела в пределах участка исследования. Величина потерь оценивается как доля относительно величины разубоживания по существующим нормативам.

Предлагаемый подход позволяет оценивать величину потерь и разубоживания дифференцированно по участкам и выемочным единицам с учетом их морфологических характеристик.

Теоретические положения фрактальной геометрии позволяют проводить анализ других показателей оруденения и математически описывать соотношения между ними.

Например, известно, что по результатам поисков и разведочных работ в пределах отдельных регионов выявляются тысячи аномалий, сотни точек минерализации, десятки проявлений и единичные месторождения. Эта особенность была замечена различными исследователями достаточно давно [1]. Для описания соответствия между этими проявлениями и их коли-

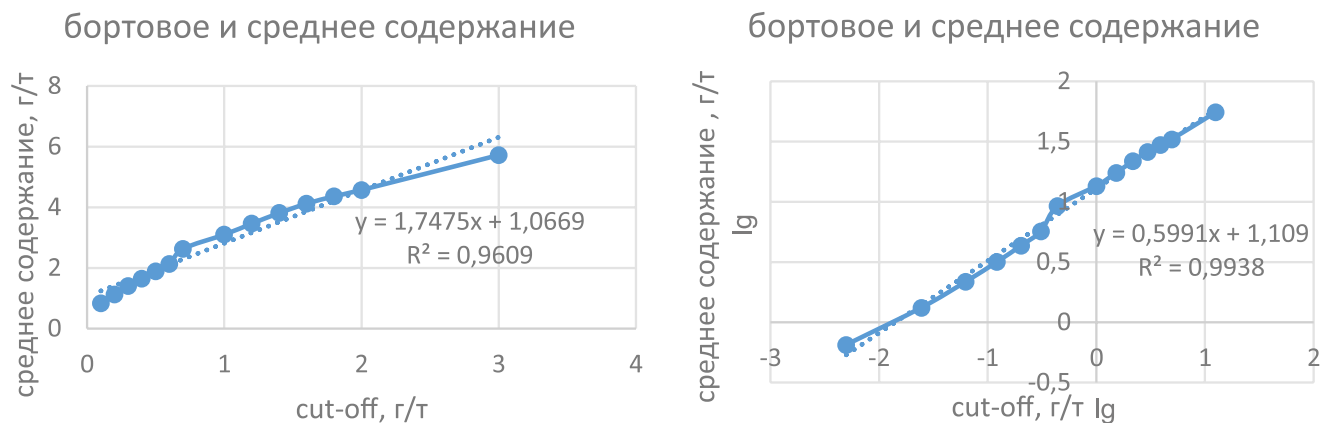


Рис. 6. Зависимости среднего содержания золота от уровня cut-off-grade в натуральном (слева) и логарифмическом масштабе (справа)

борт-запасы руды

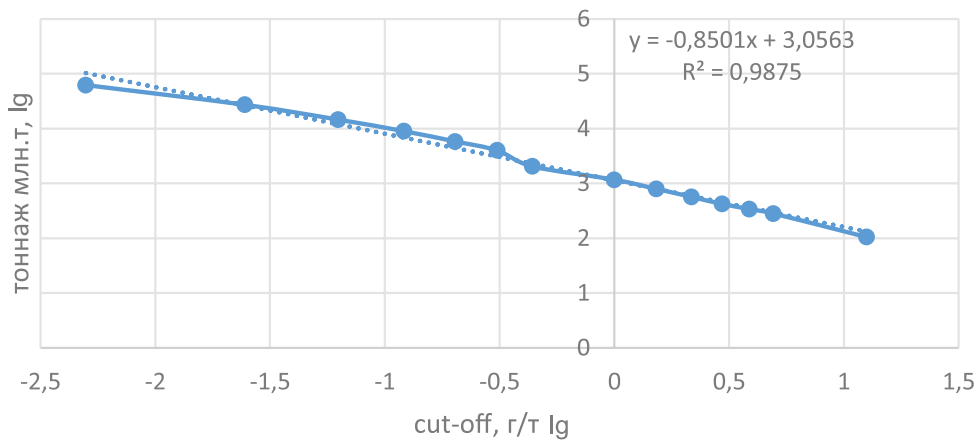


Рис. 7. Зависимость запасов руды от уровня cut-off-grade золота

чеством предлагались различные зависимости, в числе которых можно упомянуть известный «закон Ципфа». Такие зависимости могут строиться в соответствии с принципами фрактальной геометрии и использоваться для оценки перспективности территорий. Размерность данного явления определяется по графикам, также построенным в билогарифмическом масштабе.

Наличие подобия или пропорциональности, вытекающей из основных положений теории фракталов, выражается в определенном соотношении между бортовыми содержаниями и другими характеристиками рудных объектов — запасами руды, средними содержаниями и запасами полезного компонента. Математическое описание этих соотношений может использоваться при повариантном подсчете запасов.

Для иллюстрации этих взаимосвязей использованы данные публичной отчетности о запасах по золоторудному месторождению Сонгджягу (КНР) [17], в основу которых положены результаты блочного моделирования. На рис. 6 показаны зависимости между средними содержаниями золота и граничными лимитами (cut-off-grade). Слева показана зависимость, выраженная в натуральном масштабе. Видно, что зависимость не соответствует линии и требует более сложного выражения для ее описания. В правой части рисунка зависимость выражена в билогарифмическом масштабе; она достаточно хорошо описывается линейным уравнением.

На рис. 7 в таком же масштабе показана зависимость между запасами золота и уровнем cut-off-grade. С высокой надежностью эта зависимость также описывается линейным уравнением при градиенте/размерности $-0,85$.

При анализе изменения геологоразведочных параметров от кон-

диций следует иметь в виду, что на их динамику оказывают влияние не только бортовое содержание, но и другие показатели — минимальная мощность рудного тела и максимальная мощность прослоев пустых пород и некондиционных руд, включаемых в контур подсчета. Влияние этих требований также можно описать математически с определением размерности явлений.

В качестве примера, характеризующего возможности такого описания, взяты результаты повариантного подсчета запасов для одного

из золоторудных месторождений. Варианты кондиций включали бортовое содержание 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 г/т при сочетаниях минимальной мощности и пустого прослоя 1×3, 3×3 и 5×5 м. Итоги расчетов в виде графиков отражены на рис. 8. Зависимости вполне удовлетворительно описываются линейными уравнениями, которые имеют разную размерность — от $-0,214$ до $-0,339$. Таким образом, появляется возможность не только математического описания зависимостей, но и сравнения объектов по величине размерности. На этой основе может осуществляться прогноз значений геологоразведочных параметров при показателях кондиций, не участвовавших в исходных расчетах.

Одной из важных задач изучения коренных месторождений алмазов является исследование зависимости между количеством кристаллов в 1 т руды и их крупностью или массой. Ее значение определяется недостаточной представительностью разведочных проб для уверенного суждения о наличии алмазов крупных классов, определяющих основную ценность этого вида полезного ископаемого. Выявление и описание зави-

бортное содержание - запасы золота

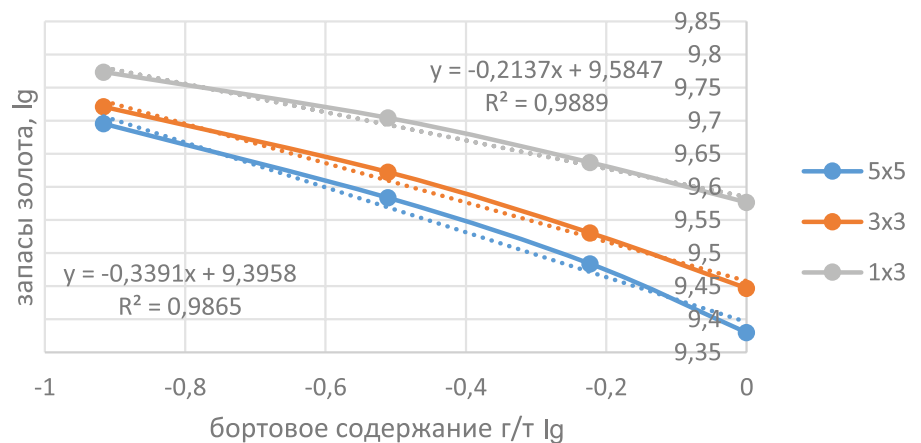


Рис. 8. Зависимости запасов золота от бортового содержания при разных сочетаниях минимальной мощности рудного тела и мощности пустого прослоя

масса кристалла - концентрация

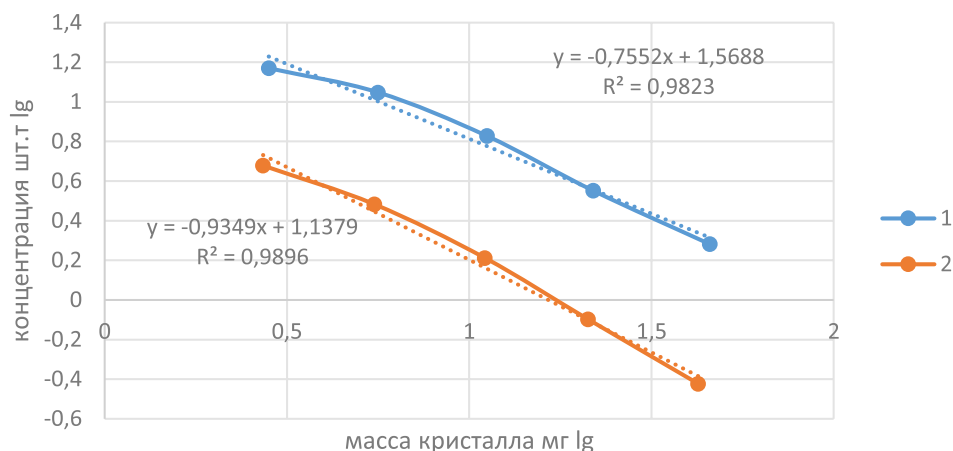


Рис. 9. Зависимость средняя масса кристаллов — концентрация (шт/т) по алмазональным трубкам (по Зуеву В.М.)

симости между концентрацией кристаллов в 1 т руды и их размерностью/крупностью позволяет уточнять оценку алмазональности объекта, особенно в условиях ограниченного объема опробования. Исследования, проводимые в этом направлении, [5] показывают, что подходы к выявлению таких зависимостей полностью соответствуют принципам фрактальной геометрии.

Для иллюстрации этого положения на рис. 9 показана зависимость между данными показателями, выраженная в билогарифмическом масштабе. В качестве примера приняты данные по двум трубкам, различающимся, прежде всего, средними содержаниями в них алмазов.

Между средней массой кристаллов в весовых классах и их концентрацией (шт/т), выраженных в логарифмах, имеется почти линейная зависимость с градиентами или размерностью $-0,755$ и $-0,935$. Полученные зависимости позволяют рассчитывать концентрацию алмазов в определенных весовых классах, в том числе в тех, которые не принимали участие в выводе данной зависимости. Для трубки 1 следует ожидать наличие одного кристалла в тонне руды в весовом классе более 100 мг. Для трубки 2 концентрация алмазов в данном весовом классе ничтожно мала.

Следует отметить, что в подобного рода исследованиях могут наблюдаться некоторые отклонения от линейной взаимозависимости логарифмов. Как правило, они связаны с фактором *мультифрактальности* [2], т.е. с наложением других явлений и процессов на исследуемые свойства. Применительно к оценке морфологии рудных тел этими факторами могут быть эрозионный срез, тектоника, другие стадии рудоотложения. На результатах изучения гранулярного состава алмазов могут сказываться процессы пострудного растворения мелких алмазов, техногенные нарушения целостности, неполное извлечение при обогащении.

В последнее время при изучении алмазональных объектов используется опробование на микроалмазы, которое ориентировано на определение фрактальной

размерности для предельно мелких классов. С учетом этой размерности можно рассчитать количество кристаллов в более крупных классах и оценить степень алмазональности объекта. Такие исследования играют особую роль на ранних стадиях геолого-разведочных работ, когда возможности отбора проб большого объема ограничены.

Выводы

1. Фрактальная геометрия является эффективным инструментом для исследования зависимостей между свойствами рудных объектов при анализе данных разведки

и геолого-экономической оценки.

2. Фрактальная размерность рудных образований должна рассматриваться в качестве классификационного признака для отнесения к группе сложности геологического строения. На ее основе могут решаться задачи определения ошибок геометризации при разном шаге разведочной сети, а также задачи оценки величин потерь и разубоживания по участкам и выемочным единицам в процессе проектирования и ведения добычных работ.

3. Принципы фрактальной геометрии могут использоваться для решения других практических задач, в том числе:

- оценки перспективности рудных районов;
- при анализе данных повариантного подсчета запасов;
- оценки алмазональности коренных месторождений алмазов.

Перечень таких задач будет расширяться по мере овладения данным математическим аппаратом специалистами-геологами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аристов, В.В. Поиски твердых полезных ископаемых / В.В. Аристов. — М.: Недра, 1975. — 253 с.
2. Божогин, С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божогин, Д.А. Паршин. — Ижевск, 2001. — 128 с.
3. Викентьев, В.А. Экспертиза подсчетов запасов рудных месторождений / В.А. Викентьев, И.А. Карпенко, М.В. Шумилин. — М.: Недра, 1988. — 268 с.
4. Григоров, С.А. Локализация таксонов геохимического поля ореолообразующей и рудообразующей системы в масштабах 1:1 000 000 — 1:2 000 (структурная геохимия) / С.А. Григоров. — М.: ИМГРЭ, 2018. — 147 с.
5. Зуев, В.М. Методические основы системы геологического обеспечения современного горного производства (на примере алмазной промышленности Якутии). Автореф. на соискание уч. степени д. г.-м. н. / В.М. Зуев. — М. — 2008 г.
6. Иванов, В.Н. Методика разведки золоторудных месторождений / В.Н. Иванов, В.П. Кувшинов, В.И. Батрак. — М.: ЦНИГРИ, 1991. — 262 с.
7. Иванов, С.Н. Оценка разведанности запасов твердых полезных ископаемых / С.Н. Иванов, П.И. Кушнарев. — Недропользование XXI век. — № 2(78). — 2019. — С. 82–92.

8. *Иванюк, Г.Ю.* Самоорганизация рудных комплексов / Г.Ю. Иванюк, П.М. Горяинов, А.О. Пахомовский и др. — М.: ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2009. — 392 с.
9. *Иудин, Д.И.* Фракталы: от простого к сложному / Д.И. Иудин, Е.В. Колосов. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. — 200 с.
10. *Каждан, А.Б.* Методологические основы разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. — М.: Недра, 1974. — 272 с.
11. *Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых.* — М.: МПР, 2006. — 6 с.
12. *Кушнарев, П.И.* Обоснование геометрии разведочной сети и квалификация запасов (на примере золоторудных месторождений) / П.И. Кушнарев // Недропользование XXI век. — № 5(81). — 2019. — С. 34–45.
13. *Кушнарев, П.И.* Применение методов фрактальной геометрии для оценки потерь и разубоживания при разработке месторождений сложного строения / П.И. Кушнарев, В.Н. Сытенков, А.Г. Чичерина // Рациональное освоение недр. — № 5. — 2020. — С. 64–71.
14. *Мандельброт, Б.Б.* Фрактальная геометрия природы / Б.Б. Мандельброт. — М.: Институт компьютерных технологий, 2002. — 656 с.
15. *Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Золото рудное.* — М.: ГКЗ, 2007. — 68 с.
16. *Системы оценки и разведки золоторудных месторождений на основе многофакторных моделей* / А.И. Кривцов, С.Н. Жидков, М.Ю. Катанский и др. — М.: ЦНИГРИ, 2002. — 121 с.
17. *Independent Technical Report of Songjiagou Gold project, Shandong Province, the People's Republic of China. Prepared by SRK Consulting for Majestic Corp.* 2016.

© Кушнарев П.И., Иванов С.Н., 2021

Кушнарев Петр Иванович // kushnarpi@mail.ru
Иванов Сергей Николаевич // sn.ivanov@vims-geo.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 546.253+546.59/.91+553.313/.411

Пшеничкин А.Я., Колпакова Н.А., Домаренко В.А., Дмитриенко В.П., Перегудина Е.В., Кенесбаев Б.К. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРОМЕТРИИ

*В настоящее время особое внимание уделяется комплексной переработке минерального сырья. В последние десятилетия в России, ближнем и дальнем зарубежье в месторождениях различного генезиса были выявлены повышенные (вплоть до промышленно значимых) концентрации элементов платиновой группы (платины, палладия, осмия, иридия, родия), золота, редкие и радиоактивные элементы. **Ключевые слова:** инверсионная вольтамперометрия, модифицированный графитовый электрод, золото, платиновые металлы.*

Pshenichkin A.Ya., Kolpakova N.A., Domarenko V.A., Dmitrienko V.P., Peregudina E.V. (Tomsk Polytechnic National Research University)

METHOD OF DETERMINING NOBLE METALS BY INVERSION VOLTAMMETRY

*Currently, special attention is paid to the complex processing of mineral raw materials. In recent decades, in Russia, near and far abroad, deposits of various genesis have revealed increased (up to industrially significant) concentrations of platinum group elements (platinum, palladium, osmium, iridium, rhodium), gold, rare and radioactive elements **Keywords:** inverse voltammetry, modified graphite electrode, gold, platinum group metals.*

Введение

В последние десятилетия в России, ближнем и дальнем зарубежье в золоторудных, редкометалльных, медно-порфириновых, железорудных и других генетических типах месторождений были выявлены повышенные (вплоть до промышленно значимых) концентрации элементов платиновой группы (платины, палладия, осмия, иридия, родия), золота, редких и радиоактивных элементов [1]. Поэтому в настоящее время особое внимание уделяется комплексной переработке минерального сырья. При этом эффективность комплексной переработки минерального сырья зависит от достоверности и полноты оценки его на сопутствующие (в том числе на благородные и редкие) элементы на стадии изучения руд ввиду их незначительных содержаний и рассеянного характера распределения в руде. Все это требует применения чувствительных аналитических методов анализа.

В Инновационном научно-образовательном центре «Золото-платина» Томского политехнического университета разработаны методики определения золота, платины, палладия, родия, рения инверсионно-вольтамперометрическим (ИВ) методом анализа пород, метасоматитов, руд и минералов из железорудных, золоторудных, меднорудных, редкометалльных месторождений из навески 1–5 г с пределами измерений от 10^{-8} до 10^{-2} масс. % и воспроизводимостью анализов 85–90 %. Методы отличаются сравнительно простым и недорогим аппаратным оформлением [2, 3, 4].

Экспериментальная часть

В рудах месторождений и рудопроявлений сопутствующие благородные и редкие металлы находятся в низких содержаниях [1, 5]. Поэтому при анализе минерального сырья на сопутствующие элементы необходимо разрабатывать схемы отделения благородных компонентов пробы от неблагородных.