

УДК 553.411:553.04

ТИПИЗАЦИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИХ ОЦЕНКИ И РАЗВЕДКИ

Петр Иванович Кушнарев^{1✉}, Алексей Андреевич Самсонов²

¹ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского», Москва, Россия; kushnarpi@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы выбора параметров разведочной сети на основе количественных критериев разведанности: точности оценки средних содержаний и ошибки геометризации. Допустимые значения критериев для запасов категории C_1 установлены по результатам анализа фактических данных. Типизация золоторудных месторождений базируется на оценке масштаба месторождений, их морфологии и фрактальной размерности; используется также оценка изменчивости содержания золота в пробах или композитах. Для оценки ошибок геометризации на ранних стадиях геологоразведочных работ предложена методика их определения, основанная на положениях фрактальной геометрии и на результатах геостатистических исследований.

Ключевые слова: разведочная сеть, категории запасов, производительность предприятия, точность оценки, ошибки геометризации, сложность строения

Для цитирования: Кушнарев П.А., Самсонов А.А. Типизация золоторудных месторождений для целей их оценки и разведки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 4. С. 43–50.

TYPIFICATION OF GOLD DEPOSITS FOR EVALUATION AND EXPLORATION PURPOSES

Petr I. Kushnarev^{1✉}, Alexey A. Samsonov²

¹ FSBI "All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky", Moscow, Russia; kushnarpi@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru

Abstract: The issues of choosing the parameters of the exploration network based on quantitative criteria of exploration: the accuracy of the assessment of average grades and the error of geometrization are considered.

Acceptable values of criteria for C_1 category reserves are established based on the results of the analysis of actual data. The typification of gold deposits is based on an assessment of the scale of deposits, their morphology and fractal dimension; an assessment of the variability of gold grade in samples or composites is also used. To assess geometrization errors at the early stages of geological exploration, a method for determining them based on the positions of fractal geometry and on the results of geostatistical studies is proposed.

Key words: exploration network, reserves categories, enterprise productivity, estimation accuracy, geometrization errors, structural complexity

For citation: Kushnarev P.I., Samsonov A.A. Typification of gold deposits for evaluation and exploration purposes. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 4: 43–50. (In Russ.).

Введение. Проблема выбора параметров разведочной сети для получения запасов определенных категорий всегда была в центре внимания геологов-разведчиков. Особенно остро она ставилась для ранних стадий геологоразведочных работ, когда информация о свойствах изучаемого объекта была достаточно ограниченной.

Для решения этой задачи в настоящее время используются Методические рекомендации [Классификация..., 2006; Методические..., 2007], где приведена группировка месторождений по сложности строения. Предлагаемые в ней параметры разведочной сети опираются на примеры месторождений, анализ изученности которых проводился 40–50 лет назад. За прошедшее время резко возросло число разведываемых и отрабатываемых золоторудных объ-

ектов; среди них появились «крупнообъемные» месторождения типа штокверковых и минерализованных зон с относительно низким содержанием золота, которые ранее практически не рассматривались как объекты промышленного освоения.

Следует особо отметить, что в Методических рекомендациях [Методические..., 2007] отмечена необходимость обоснования сети на основе количественных показателей. В то же время достаточность той или иной сети с позиций критериев разведанности — точности подсчета запасов и ошибок геометризации — тогда не анализировалась; в нормативно-методических документах отсутствуют указания относительно допустимых значений критериев для запасов той или иной категории.

Основные недостатки существующей группировки золоторудных месторождений по сложности строения были рассмотрены в ряде работ [Иванов, Кушнарев, 2019, 2021; Кушнарев, 2019; Кушнарев, Лазарев, 2021] и в основном заключаются в следующем:

- группировка базируется на неоднозначно определяемых количественных характеристиках — коэффициентах рудоносности, вариации, показателе сложности;

- группировка не учитывает наличие в пределах месторождения запасов, отрабатываемых разными способами и характеризующихся разной морфологией вследствие оконтуривания по разным кондициям;

- группировка не связана с использованием критериев разведанности для категорий запасов;

- группировка включает в третью группу объекты, различающиеся по размерам и запасам в несколько раз, которые требуют изучения разной сетью.

В целом существующая группировка мало чувствительна к действительной сложности строения объектов.

Материалы и методы исследований. Для решения задачи выбора параметров сети проведены статистические и геостатистические исследования золоторудных месторождений различных морфологических типов и масштаба; выполнены расчеты по определению характеристик формы рудных тел и ошибок геометризации при разном шаге сети. На этой основе разработана *типизация золоторудных месторождений*, которая использует допустимые значения критериев разведанности, а также более подробную характеристику свойств скоплений полезного ископаемого, включая определение изменчивости содержания (коэффициент вариации) по пробам или композитам и фрактальную размерность объектов [Иванов, Кушнарев, 2021; Иудин, Колосов, 2012; Кушнарев и др., 2020].

В типизации используется привычное деление на группы сложности и морфологические типы оруденения. В ней учитывается масштаб объектов в форме производительности горнодобывающего предприятия.

Подходы, предлагающие использовать в качестве объекта оценки рудные объемы недр, отрабатываемые горнодобывающим предприятием за определенный срок, изложены в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [Александрова, Куликов, 2020; Коткин и др., 2009; Abzalov, 2016; Coombs, 2008]. Календарный год — максимальный срок, на котором базируется отчетность предприятия, в том числе по финансово-экономическим показателям. Наиболее важна из них безубыточность работ за рассматриваемый период. Представляется, что именно это условие с позиций точности определения содержания золота должна обеспечивать выбранная разведочная сеть.

Типизация ориентирована на выбор параметров сети для категории C_1 , которую можно рассматривать как базовую относительно запасов других

категорий. Запасы категории В формально не требуются для месторождений 3- и 4-й групп сложности, а запасы категории C_2 играют ограниченную роль при оценке объектов на стадии разведки. Можно отметить, что запасы категории C_2 соответствуют ресурсам категории *inferred* в отчетах шаблона КРИРСКО, где они полностью не учитываются при геолого-экономической оценке [Александрова, Куликов, 2020; Australasian..., 2012].

В практике проведения геологоразведочных работ шаг сети для запасов категории В принимается в 2 раза меньше по сравнению с шагом для категории C_1 ; для категории C_2 он может быть увеличен в 2 раза.

В предлагаемой типизации принимается во внимание различие морфологических типов оруденения и характерной для них фрактальной размерности Хаусдорфа (D), которая рассматривается как один из классификационных признаков.

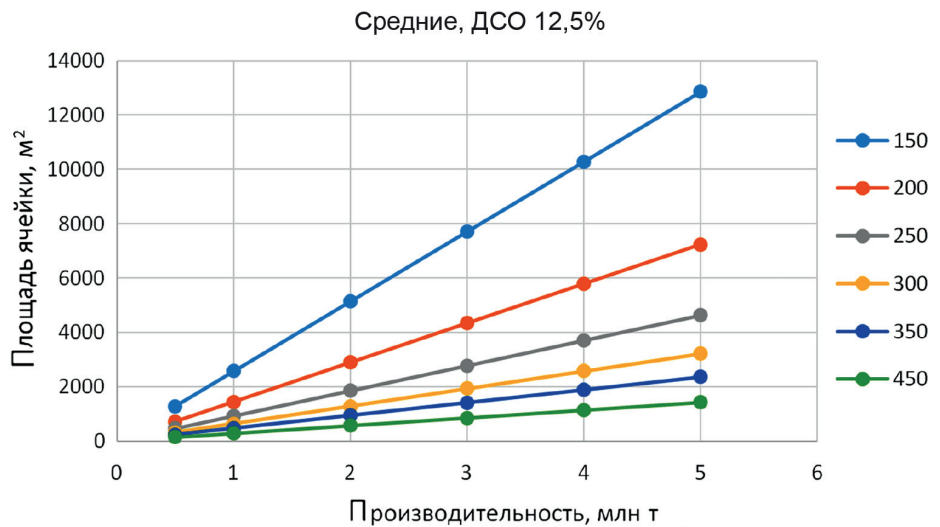
Теоретические основы фрактальной геометрии приложимы к геологическим явлениям, результаты оценки которых зависят от шкалы или базы измерений. В общем случае задача сводится к нахождению размерностей или пропорций, описывающих эту взаимосвязь [Горяинов, Иванюк, 2001; Иванов, Кушнарев, 2021; Иудин, Колосов, 2012]. Сущность практического использования выявленных закономерностей состоит в возможности прогноза показателей, интересующих исследователя, для любых условий измерений. Ведущая характеристика при этом анализе — фрактальная размерность объекта. Значения фрактальной размерности рудных тел для золоторудных месторождений разных масштаба и морфологических типов определены в работе [Иванов, Кушнарев, 2021]; эти величины использованы в предлагаемой типизации.

Исследование изменчивости геологоразведочных параметров — обязательный элемент характеристики свойств месторождения и сложности его строения. Вместе с тем в практике расчетов часто используются выборки, в которых характеристика содержания дается применительно к разведочным пересечениям. Такие выборки неоднородны по геометрической базе (по длине интервалов), в связи с чем получаемые оценки дисперсии и значения коэффициента вариации несостоятельны, и их нельзя использовать в дальнейшем для решения задач определения геометрии разведочной сети.

В предлагаемой типизации используется оценка степени изменчивости содержания золота по пробам или композитам равной длины.

Для расчета параметров разведочной сети с позиций *точности оценки среднего содержания* в работе [Кушнарев, 2019] был предложен алгоритм, основные положения которого характеризуются ниже. Погрешность оценки среднего содержания или доверительный интервал (Δ) в соответствии с правилами математической статистики [Вентцель, 1964] оценивается по формуле

Рис. 1. Номограмма для определения площади ячейки сети для категории С₁ при допустимом стандартном отклонении 12,5% (средние по масштабу месторождения)



$$\Delta = t_a V/\sqrt{N}, \tag{1}$$

где t_a — значение критерия Стьюдента при доверительной вероятности a ; V — значение коэффициента вариации содержания золота, %; N — объем выборки.

В случае, если допустимая погрешность оценки задана, можно вычислить необходимое число наблюдений N по формуле

$$N = (t_a V/\Delta_{\text{доп}})^2. \tag{2}$$

Для удобства расчетов при $t_a = 1$ величина доверительного интервала заменяется допустимым относительным стандартным отклонением $S_{\text{доп}}$, в результате чего формула (2) приобретает вид $N = (V/S_{\text{доп}})^2$.

Вычисленное число наблюдений относится к блоку, сопоставимому по запасам руды с производительностью предприятия на определенный период. Принимается, что для запасов категории С₁ он составляет 1 год. Затем вычисляются объем блока, приходящийся на одну пробу и, с учетом длины пробы, площадь ячейки сети. Конкретные размеры

сторон ячейки предлагается вычислять отдельно с учетом ожидаемой анизотропии объекта.

Возможность эффективного использования формул математической статистики для оценки точности определения среднего содержания в условиях распределений, отличающихся от нормального, подтверждена в работе Ю.Т. Усикова [Усиков, 1988] при наличии большого числа наблюдений (≥ 50).

Реализация этого алгоритма требует задания допустимого относительного стандартного отклонения (ДСО). Фактические значения этого показателя были установлены на уже разведанных месторождениях разного масштаба, запасы которых подсчитаны по категории С₁ [Кушнарев, 2021]. По результатам этих исследований можно принять, что допустимое стандартное отклонение составляет 10%, для крупных и уникальных по запасам месторождений, 12,5% для средних месторождений, 15% для мелких месторождений (преимущественно 4-я группа сложности).

Корректировку параметров сети можно выполнять по вспомогательным графикам-номограммам

Мелкие, ДСО 15%

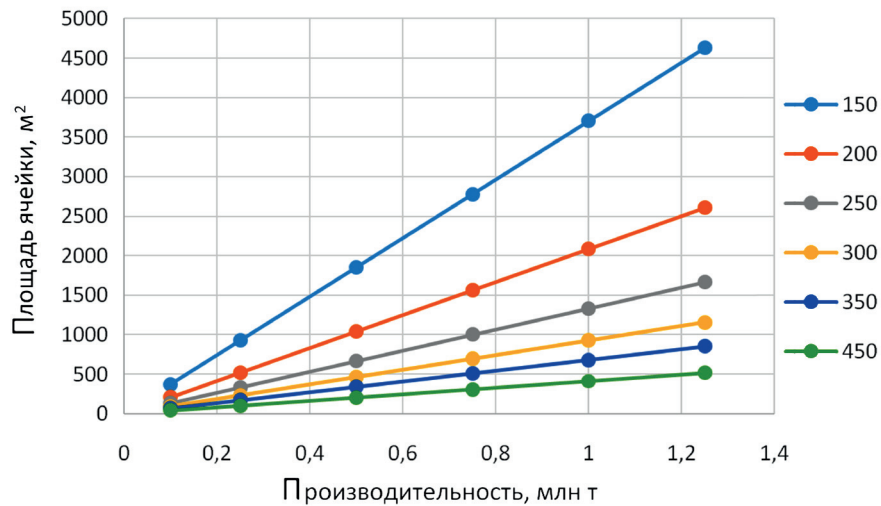


Рис. 2. Номограмма для определения площади ячейки сети для категории С₁ при допустимом стандартном отклонении 15% (мелкие по масштабу месторождения)

Таблица 1

Типизация золоторудных месторождений для целей разведки запасов категории С₁

Группа	Масштаб, запасы руды, млн т руды	А, млн т/год	Морфологический тип	D	Коэффициент вариации по пробам			
					1,5	1,5–2,5	2,5–3,5	более 3,5
2	Уникальные и крупные, более 250	более 15	штокверки	1,4–1,6	15000	7500	3500	–
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,4	16000	8000	4000	–
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1–1,3	18000	10000	5000	–
	Крупные, 100–250	5–15	штокверки	1,4–1,6	8000	4000	2500	–
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,4	10000	5000	3000	–
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1–1,3	12000	6000	3000	–
3	Средние, 20–100	1,5–5	жилы простого строения	1,1–1,2	10000	5000	2500	–
			штокверки	1,4–1,6	6000	3000	2000	–
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,4	6000	3500	2500	–
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1–1,3	6000	3500	2500	–
			жилы простого строения	1,1–1,25	5000	3000	2000	–
			жилы сложного строения	1,25–1,5	4000	2500	1500	–
	Мелкие, 5–20	0,5–1,5	минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,4	2500	1200	800	500
			залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1–1,3	2500	1200	800	500
			жилы простого строения	1,1–1,3	2500	1200	800	500
			жилы сложного строения	1,3–1,4	2000	1000	600	400
			трубообразные тела	1,0–1,2	2500	1200	800	500
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,5	1500	800	600	400
4	Весьма мелкие, менее 5	менее 0,5	залежи прожилково-вкрапленных руд	1,1–1,3	1500	800	600	400
			жилы простого строения	1,1–1,3	1500	800	600	400
			жилы сложного строения	1,3–1,5	1200	600	400	300
			трубки и трубообразные тела	1,0–1,2	1500	800	600	400
			минерализованные жильно-прожилковые зоны	1,3–1,5	1500	800	600	400

(рис. 1, 2), на которых цветными линиями показаны значения коэффициента вариации.

Результаты оценки площади ячейки отражены в предлагаемой типизации в табл. 1. Типизация использует показатели, достаточно просто определяемые на ранних стадиях работ по фактическим данным или на основе аналогии. Можно отметить, что в сравнении с группировкой, предложенной в Методических рекомендациях [Методические..., 2007], она более гибко реагирует на изменение степени изменчивости содержания золота и имеет более четкие градации по масштабам изучаемых объектов. Кроме того, она позволяет осуществлять выбор параметров сети для отдельных частей месторождения, отличающихся степенью изменчивости и условиями отработки.

Для подтверждения эффективности алгоритма расчета параметров сети, положенного в основу предлагаемой типизации, выполнены исследования на месторождениях, относительно недавно проходивших госэкспертизу в ГКЗ Роснедра. Для ряда из них квалификация запасов по имеющейся разведоч-

ной сети была далеко не однозначной. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Месторождение Каральвеем, находящееся в Чукотском АО, отрабатывается подземным способом с 1995 г. как жильный объект (ЖТ) золотокварцевой формации. К настоящему времени на нем проведена доразведка, выявившая новый морфологический тип оруденения — прожилково-жильные рудные тела (ПЖрт), характеризующийся повышенной мощностью, но малыми размерами по простиранию и ширине. Проведенные расчеты показали, что точность оценки содержания в $\pm 15\%$ в блоках, сопоставимых с годовой производительностью рудника, может обеспечиваться разведочной сетью 25×20 м для жильных тел и 20×15 м для прожилково-жильных рудных тел.

На проявлении Золотая Речка (Тенькинский район, Магаданская область) были проведены поисково-оценочные работы, по результатам которых зоны минерализации, изученные бурением по сети 100×50 м, были отнесены к прогнозным ресурсам категории Р₁. Расчеты показывают, что запасы ка-

Таблица 2

Примеры расчета параметров сети для категории C_1 для ряда месторождений

Объект	S , %	A , млн т	ОМ	Объем, м ³	L , м	$S_{об}$, м ²	V , %	N , шт	$S_{яч}$, м ²	$a \times b$, м
Каральвеем ЖТ	15	0,400	2,7	148148	0,5	296296	367	599	495	25×20
Каральвеем ПЖрт	15	0,400	2,7	148148	0,7	211640	407	735	289	20×15
Золотая речка	12	1,0	2,65	377358	2,0	188679	120	100	1887	60×30
Кундуми	15	0,15	2,7	55556	0,7	79366	152	102	778	40×20
Дражное	15	0,7	2,72	257353	0,8	321691	385	660	489	25×20
Утахан	12	2,2	2,7	814815	0,9	905345	187	243	3726	75×50
Западное	12	1,6	2,7	592592	0,9	658436	185	237	2778	50×50
Гора Рудная	15	0,78	2,7	288889	0,77	375180	192	164	2316	60×40
Озерновское	15	0,53	2,53	209486	0,55	308088	218	211	993	40×25

Примечания. Принятые обозначения: S — допустимая погрешность оценки; A — годовая производительность предприятия; ОМ — объемная масса; L — длина пробы в пересчете на истинную; $S_{об}$ — общая мощность блока применительно к длине пробы; V — коэффициент вариации; N — необходимое число проб на блок годовой производительности; $S_{яч}$ — площадь разведочной ячейки; a , b — стороны разведочной ячейки при оптимальном удлинении.

тегории C_1 (при погрешности $\pm 12\%$) могут быть получены при плотности разведочной сети 60×30 м. В этих условиях сеть для категории C_2 может быть принята равной 120×60 м, что вполне соответствует уже имеющейся.

На месторождении Дражное расчетная площади ячейки сети оказалась почти в 2 раза меньше, чем фактическая. Это расхождение объясняется довольно высоким коэффициентом вариации содержания по сравнению с другими объектами.

В целом результаты расчетов, за некоторыми исключениями, показали достаточно хорошую сходимость по рекомендуемым параметрам разведочной сети с фактически принятыми для разведки месторождения.

Выбранные на основе типизации параметры разведочной сети требуют корректировки с учетом второго критерия разведанности запасов — *ошибок геометризаций*, т. е. ошибок в определении пространственного положения оруденения. Необходимость использования этого критерия обсуждалась в литературе [Викентьев и др., 1979; Иванов, Кушнарев, 2019; Каждан, 1974; Коткин и др., 2009]. На основе обобщения опыта разведки рудных месторождений установлено, что для запасов категории C_1 допустимая величина ошибок геометризаций в сечениях может составлять 30–50%. Вместе с тем сложность применения этого критерия была связана с тем, что для определения ошибок при разном шаге сети использовался эмпирический метод разрежения, требующий наличия участков детализации, на которых морфология рудных тел изучена с исчерпывающей полнотой.

В работе В.А. Викентьева с соавторами [1979] показано, что ошибка геометризаций в сечении или разрезе теоретически может быть определена исходя из его размера (средней длины) по какому-либо направлению с учетом шага сети:

$$\delta(A) = 100 \cdot A / 4L, \% \quad (3)$$

где A — шаг сети по заданному направлению, L — средние размеры объекта по данному направлению.

Вместе с тем и в этом случае требовалось априорное знание средних размеров объекта.

В последнее время появились новые возможности для оценки этого параметра, а также ошибок геометризаций на ранних стадиях работ. С этой целью могут быть реализованы два подхода: 1) с использованием фрактальной размерности объектов, 2) с использованием вариограмм индикаторов.

Применение принципов фрактальной геометрии для оценки ошибок геометризаций можно пояснить на примере месторождения, на котором форма рудных тел изучена по относительно редкой разведочной сети, шаг которой по падению составляет 35–40 м (рис. 3). Установлено также, что месторождение относится к морфологическому типу минерализованных зон, фрактальная размерность D для которых составляет в среднем 1,35 (табл. 1). В результате изучения морфологии рудных тел по разведочному контуру на разрезе определено, что их средняя длина составляет 59,3 м. Для вычисления этого параметра использована палетка, ориентированная по падению рудного тела.

Предполагается, что при отработке открытым способом максимально плотная сеть скважин буровзрывных работ, по которой будет оцениваться «истинная» форма рудного тела, составит 5×5 м. Таким образом, ставится задача прогноза средней «истинной» длины рудного тела при данной плотности конечной сети наблюдений.

Для решения этой задачи вычисляется величина поправочного коэффициента, позволяющего привести фактические замеры по разведочному контуру к «истинным» размерам тел:

$$K_{\text{попр}} = D^{0,25 \cdot A/a}, \quad (4)$$

где D — фрактальная размерность; A — шаг сети, для которой определяется ошибка геометризаций; a — шаг предельно плотной сети.

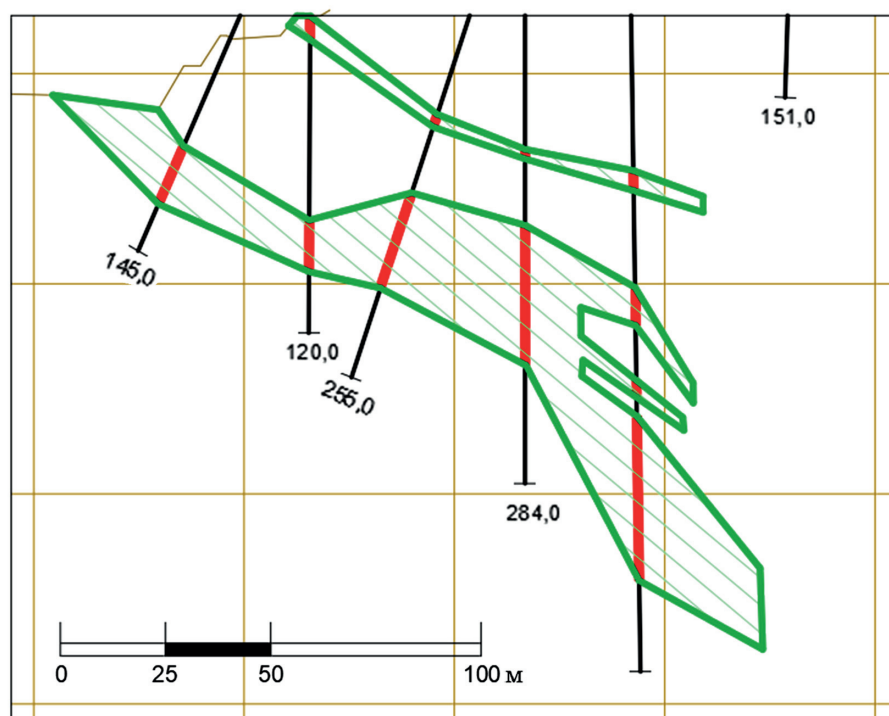


Рис. 3. Форма рудных тел в разрезе по данным геологоразведочных работ при шаге сети 35–40 м

«Истинная» длина рудного тела по заданному направлению определяется из выражения

$$L_{\text{ист}} = L_{\text{факт}} / K_{\text{попр}} \quad (5)$$

Для приведенного примера величина поправочного коэффициента составит

$$K_{\text{попр}} = 1,35^{0,25 \cdot 40/5} = 1,35^2 = 1,8.$$

Таким образом, ожидаемая истинная длина рудного тела $L_{\text{ист}}$ по падению будет равна $L_{\text{ист}} = 59,3 / 1,8 = 33$ м.

Ошибка геометризации $\delta(A)$ вычисляется по аналитическому выражению (3):

$$\delta(A) = 100 - 40 / 4 \cdot 33 = 30,3\%.$$

Можно заключить, что ошибка геометризации для шага 40 м по падению в этом случае составит 30,3%, что вполне удовлетворяет требованиям к оконтуриванию запасов категории C_1 .

Вариограммы индикатора для оценки ошибок геометризации можно применять на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях, в том числе на участках, различающихся по морфологическим свойствам оруденения. Этот подход использует «геометрическую» природу вариограммы и широко применяется зарубежными специалистами [Александрова, Куликов, 2019; Давид, 1980; Abzalov, 2016; Coombs, 2008] для квалификации запасов по уже созданной разведочной сети.

Индикация означает нелинейное преобразование исходных данных, при котором значения содержания, попадающие в границы рудного тела, получают индекс 1, а безрудные и некондиционные пробы — индекс 0. Таким образом, значения индикатора в ячейках блочной модели характеризуют

вероятность наличия оруденения в этих точках пространства. Преимущества использования индикаторных моделей заключаются в том, что они учитывают размеры рудных образований при разных значениях бортового содержания. Пример вычисления вариограммы индикатора по одной из золоторудных залежей при бортовом содержании 0,4 г/т приведен на рис. 4.

Предел корреляции, или зона влияния вариограммы, в данном случае составляет около 40 м. Это значение можно рассматривать как средний размер залежи по выбранному направлению. В этом случае величина ошибки геометризации при шаге сети 40 м в соответствии с выражением (3) будет равна 25%, что также удовлетворяет требованиям к запасам категории C_1 . Возможности широкого использования такого приема ограничиваются имеющимися параметрами разведочной сети, часто недостаточной для уверенного построения вариограммы.

В целом опыт применения изложенных подходов показывает, что ведущее значение при определении плотности разведочной сети имеет оценка точности определения среднего содержания.

Заключение. Выбор параметров разведочной сети для разных категорий запасов должен базироваться на изучении морфологии оруденения, его масштабов и изменчивости геологоразведочных параметров, особенно значений содержания полезного компонента. Каждый из этих факторов требует количественной оценки.

Обоснование разведочной сети, особенно на ранних стадиях геологоразведочных работ, традиционно основано на группировке месторождений по сложности геологического строения, которая в настоящее время требует корректировки на основе

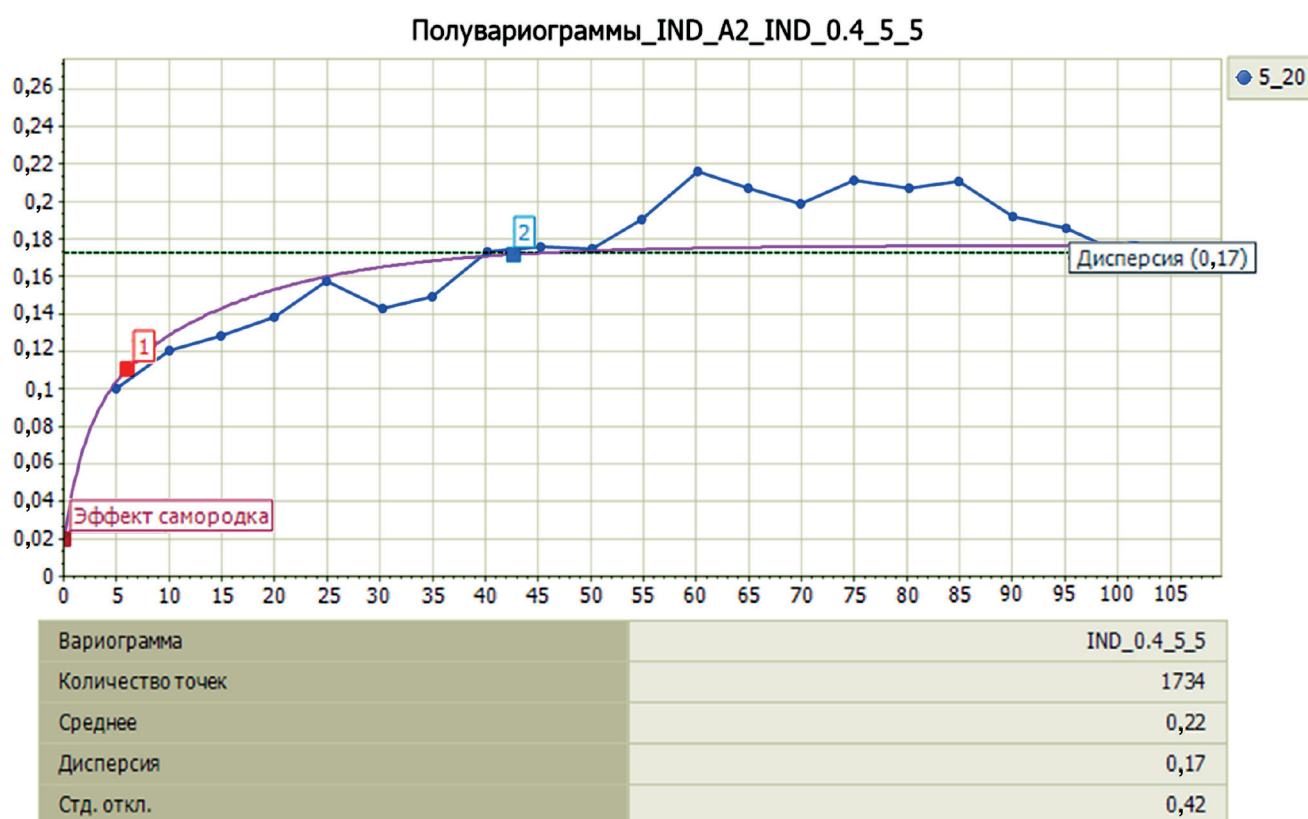


Рис. 4. Вариограмма индикатора по залежи А2 при бортовом содержании 0,4 г/т

использования критериев разведанности — точности оценки запасов и ошибок геометризаций.

Классификационными признаками предлагаемой типизации золоторудных месторождений служат масштаб объекта в виде годовой производительности предприятия, морфологический тип в сочетании с определением фрактальной размерности, а также изменчивость содержания полезного компонента, определяемая по пробам равной длины или по композитам.

Допустимые значения погрешности оценки среднего содержания, определенные с учетом фактических данных для запасов категории C_1 , можно принять равными:

- для крупных и уникальных по запасам месторождений — 10%;
- для средних месторождений — 12,5%.
- для мелких месторождений (преимущественно 4-я группа сложности) — 15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова А.Е., Куликов Д.А. Методы классификации запасов за рубежом // Недропользование XXI век. 2019. № 2. С. 34–42.

Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

Викентьев В.А., Воронцов В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П. О свойствах ошибок геометризации // Изв. вузов. Геология и разведка. 1979. № 2. С. 96–107.

Горяинов П.М., Иванюк Г.Ю. Самоорганизация минеральных систем. М.: ГЕОС, 2001. 311 с.

Давид М. Геоestatистические методы при оценке запасов руд. М.: Недра, 1980. 360 с.

Рассчитанные значения площади ячеек сети приведены в типизации; размеры сторон ячейки определяются с учетом анизотропии формы рудных тел.

Оценка ошибок геометризации на ранних стадиях геологоразведочных работ затрудняется отсутствием участков детализации. В этих условиях корректировку выбранной сети по этому критерию можно проводить с использованием положений фрактальной геометрии, позволяющих выполнять расчеты ошибок на основе аналитических выражений. Второй способ оценки ошибок геометризации в условиях ограниченной информации о форме рудных тел заключается в использовании вариограмм индикаторов.

Предложенные типизация и алгоритмы расчетов позволяют корректнее определять рациональные параметры разведочной сети для получения запасов категории C_1 в различных конкретных ситуациях в зависимости от свойств изучаемого объекта.

Иванов С.Н., Кушнарев П.И. Оценка разведанности запасов твердых полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2019. № 2 (78). С. 82–92.

Иванов С.Н., Кушнарев П.И. Фрактальная геометрия при решении задач разведки и оценки месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2021. № 2. С. 32–38.

Иудин Д.И., Колосов Е.В. Фракталы: от простого к сложному. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 200 с.

Каждан А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых. М.: Недра, 1974. 272 с.

Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. М.: МПР, 2006. 6 с.

Коткин В.А., Малухин Г.Н., Мельникова А.В. и др. Количественная оценка точности и достоверности разведанных запасов месторождений твердых полезных ископаемых // Недропользование XXI век. 2009. № 1. С. 29–33.

Кушнарев П.И. Обоснование геометрии разведочной сети и квалификация запасов (на примере золоторудных месторождений) // Недропользование XXI век. 2019. № 5. С. 32–37.

Кушнарев П.И. Анализ погрешностей оценки запасов золоторудных месторождений // Разведка и охрана недр. 2021. № 4. С. 25–30.

Кушнарев П.И., Лазарев А.Б. Объекты оценки сложности геологического строения месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2021. № 5. С. 28–32.

Кушнарев П.И., Сытенков В.Н., Чичерина А.Г. Применение методов фрактальной геометрии для оценки потерь и разубоживания при разработке месторождений

сложного строения // Рациональное освоение недр. 2020. № 5. С. 64–72.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Золото рудное. М.: ГКЗ, 2007. 68 с.

Усиков Ю.Т. Достоверность геологической разведочной информации М.: Недра, 1988. 122 с.

Abzalov M. Applied mining geology // Springer Intern. Publ. Switzerland, 2016. 448 p.

Australasian code for reporting of exploration results, mineral resources and ore reserves. the JORC code 2012 edition. Prepared by the joint ore reserves committee of the Australasian Institute of mining and metallurgy, Australian Institute of geosci. and minerals Council of Australia (JORC), 2012. 44 p.

Coombs J. The art and science of resource estimation. A practical guide for geologists and Engineers. Australia, Pert, 2008. 231 p.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022,
одобрена после рецензирования 09.03.2022,
принята к публикации 31.08.2022