



**Борисов А.А.**  
ФГБУ «ВИМС»  
заместитель заведующего отделом методики  
геолого-экономической оценки и разведки  
месторождений, аспирант МГУ имени М.В.  
Ломоносова кафедры Геологии, геохимии и  
экономики полезных ископаемых  
borisov@vims-geo.ru



**Богуславский М.А.**  
канд. геол.-мин. наук  
МГУ им. М.В. Ломоносова  
доцент кафедры Геологии, геохимии и  
экономики полезных ископаемых  
mboguslavskiy@yandex.ru

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОЙ СЕТИ БУРУКТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Рассмотрены методы количественного обоснования параметров геологоразведочной сети. На основании аналитического расчета количественных критериев разведанности III участка Буруктальского месторождения оценены параметры погрешности расчета средних содержаний и ошибки геометризации. Проведено сравнение расчётных параметров для оптимальных разведочных сетей, удовлетворяющих требованиям всех категорий запасов: в соответствии с классификацией ГКЗ и кодексом JORC.*

**Ключевые слова:** обоснование разведочной сети, погрешность оценки, ошибка геометризации, классификация запасов, Буруктальское месторождение.

При проектировании геологоразведочных работ важно определить параметры буровой сети для оптимизации затрат: как в отношении физических объемов работ, так и денежных расходов. Параметры разведочной сети – ее размер и геометрия, оказывают прямое влияние на выявляемую изменчивость распределения полезных компонентов (в частности, на анизотропию закономерной изменчивости), что подтверждает необходимость определения рациональных параметров разведочной сети при проектировании буровых работ.

Существует два основных метода обоснования оптимальных параметров разведочной сети: качественный и количественный. Качественные методы основаны на имеющемся опыте разведки и разработки месторождений. Параметры разведочных сетей, применяющиеся на различных генетических и морфологических типах полезных ископаемых с группировкой по сложности строения обобщены в Методических рекомендациях ГКЗ [5]. Количественные методы обоснования

разведочной сети основаны на анализе критериев разведанности, среди которых выделяется точность оценки средних содержаний полезных компонентов и ошибки геометризации.

## **Характеристики III участка Буруктальского месторождения**

Исследования параметров разведочной сети проводились на III участке Буруктальского месторождения силикатного никеля, представляющего из себя линейно-площадную кору выветривания одноименного массива ультраосновных пород. По группе сложности месторождение отнесено ко 2 группе. Месторождение изучено с высокой степенью детальности, за весь период его разведки и разработки в общей сложности пробурено около 6 тысяч скважин. Все расчеты в работе проведены на основании базы данных скважин месторождения.

Применяемые параметры разведочной сети на месторождениях никелевых и кобальтовых руд второй группы по сложности строения, согласно методическим рекомендациям ГКЗ [5],

составляют: категории В – от 50×50 до 100×100 м, для категории С1 – от 75×100 до 100×200 м.

Для обоснования параметров сети на основании количественных показателей предлагается использовать подход, изложенный в работе П. И. Кушнарева [4]. Расчет погрешности оценки содержания и ошибок геометризации проводится аналитически на основании следующих показателей:

- годовая производительность предприятия по добыче руды (А) – 5 400 тыс. тонн;
- средняя длина проб ( $l_{пр}$ ) – 1.73 м;
- коэффициент вариации содержания никеля по пробам ( $V_{пр}$ ) – 64 %;
- средняя объемная масса руд ( $\gamma$ ) 1.33 кг/м<sup>3</sup>;
- фактическая площадь разведочной ячейки, применяемой на месторождении ( $S_i$ ):
- для категории В (50×50 м) – 2500 м<sup>2</sup>;
- для категории С1 (100×100 м) – 10 000 м<sup>2</sup>;
- для категории С1 (200×200 м) – 40 000 м<sup>2</sup>.

#### **Обоснование параметров разведочной сети на основе величины погрешности оценки содержания**

Предельная погрешность оценки запасов применительно к объему недр, сопоставимому с годовой производительностью предприятия, для различных категорий запасов, предложена в ряде работ [2, 3, 4]. Для запасов категории В она составляет 5-7 %, для запасов категории С1 – 10-15 %, для запасов категории С2 – 20-30 %.

Для расчета фактической величины погрешности оценки среднего содержания никеля предварительно рассчитывается максимальный объем недр (V) и масса руды (Q), приходящейся на одну разведочную пробу для каждой категории запасов:

$$V = S \times l_{пр} \quad (1)$$

$$Q = V \times \gamma \quad (2)$$

где V – максимальный объем недр, приходящийся на одну пробу, S – площадь ячейки разведочной сети,  $l_{пр}$  – средняя длина пробы, Qi – масса руды, приходящаяся на одну пробу,  $\gamma$  – средняя объемная масса руд.

Фактическое (минимальное) число проб ( $N_i$ ) в блоке, сопоставимом с годовой производительностью, рассчитывается по формуле:

$$N = A / Q \quad (3)$$

где A – годовая производительность предприятия по добыче руды, Q – масса руды, приходящаяся на одну пробу.

Погрешность оценки среднего содержания в блоке может быть определена по формуле математической статистики:

$$\lambda = t_a \times V_{пр} / \sqrt{N} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – погрешность оценки среднего содержания никеля,  $t_a$  – критерий Стьюдента,  $V_{пр}$  – коэффициент вариации содержания никеля по пробам,

N – число проб в блоке, сопоставимом с годовой производительностью.

Оценка погрешности выполнена для доверительной вероятности 1 %, критерий Стьюдента в этом случае составляет 2.58.

Согласно проведенным расчетам, погрешность оценки средних содержаний в блоке годовой производительности при фактических параметрах разведочной сети на Буруктальском месторождении составила для категории В – 5.4 %, для категории С1 – 10.8 %, для категории С2 – 21.6 %.

Погрешность оценки средних содержаний никеля находится в допустимых пределах для каждой категории запасов, что говорит о соответствии параметров имеющейся разведочной сети для достоверной оценки содержания металла по всем категориям.

Оптимальную густоту разведочной сети с позиций допустимой погрешности оценки средних содержаний для различных категорий запасов можно определить исходя из формул (1), (2), (3), (4). Для этого сначала рассчитывается необходимое количество наблюдений (разведочных проб) в блоке, соответствующем годовой производительности, для пределов допустимой погрешности оценки содержания каждой категории запасов, затем запасы, приходящиеся на одну пробу. Площадь блока рассчитывается исходя из объема запасов и длины пробы. Для запасов категории В оптимальная площадь ячейки составляет 2 152 – 4 218 м<sup>2</sup>, для категории С1 – 8 606 – 19 368 м<sup>2</sup>, для категории С2 – 34 432 – 77 471 м<sup>2</sup>.

Таким образом, оптимальная густота разведочной сети с позиций допустимой величины погрешности оценки средних содержаний составляет: для категории В – 46-65 м, для категории С1 – 93-139 м, для категории С2 – 186-278 м. Определенные аналитическим путем требования к густоте разведочной сети соотносятся с параметрами буровых сетей, применяющихся на подобных месторождениях: от 50×50 до 100×100 м для категории В и от 75×100 до 100×200 м для категории С1 [5].

#### **Обоснование параметров разведочной сети на основе ошибок геометризации**

Другим количественным показателем, характеризующим достаточность густоты разведочной сети для корректности оконтуривания рудных тел, является ошибка геометризации, отражающая степень достоверности контуров рудных залежей, построенных по разведочным данным. Аналитически ошибка геометризации ( $\Delta_i$ ) может быть рассчитана исходя из среднего размера рудного тела или залежи по заданному направлению – падению или простиранию. В случае

оконтуривания рудных тел в проекции ошибка рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta_{(A, B)} = [(A/4L_{cp})^2 + (B/4H_{cp})^2]^{0.5} \times 100 \% \quad (5)$$

где А и В шаг разведочной сети по падению и простиранию, L<sub>cp</sub> и H<sub>cp</sub> – длина рудного тела по заданному направлению.

Величины ошибки геометризации для запасов категории В изменяются в диапазоне 15-30 %, для категории С1 они составляют 30-50 %, для категории С2 превышают 50 % [1].

Основные направления изменчивости рудных залежей III участка Буруктальского месторождения, по которым проведена оценка ошибок геометризации – по простиранию и вкрест простирания, аналогично применяемой в настоящее время ориентировке разведочной сети.

Полувариограмма по простиранию рудных залежей III участка Буруктальского месторождения приведена на **рис. 1**. Предел корреляции выделяется на расстоянии 1300 м, что соответствует среднему размеру рудной залежи по этому направлению.

Полувариограмма вкрест простирания рудных залежей III участка Буруктальского месторождения приведена на **рис. 2**. Предел корреляции выделяется на расстоянии 480 м, что соответствует среднему размеру рудной залежи по этому направлению.

Ошибки геометризации при оконтуривании рудных залежей Буруктальского месторождения аналитическим расчетом по формуле (5), составят: для категории В – 2.8 %, для категории С1 – 5.6 %, для категории С2 – 11.1 %.

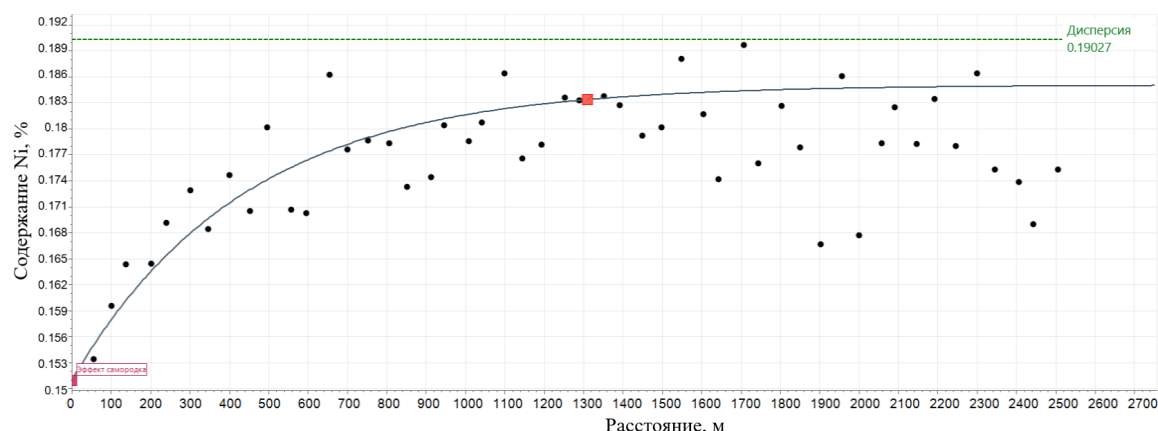
Низкое значение ошибок геометризации, рассчитанное по показателям длины минерализованной зоны по основным направлениям изменчивости, связано с морфологией рудной залежи III участка Буруктальского месторождения. При оконтуривании в плане рудная залежь, хоть и включает себя «окна» и прослойки безрудных пород, по большей части, непрерыв-

ная (**рис. 3**). Это связано, вероятно, с выдержанностью окислительных процессов корообразования по площади.

Кровля залежи имеет достаточно простую субгоризонтальную форму, в то время, как морфология подошвы более сложная: с карманами и резкими перепадами мощности за счет развития окислительных процессов на глубину. Извилистая конфигурация подошвы рудной залежи наглядно иллюстрируется разрезом по профилю +XX, где приведено сравнение вариантов оконтуривания рудного тела (**рис. 4**) по разведочным сетям различной густоты. При сгущении разведочной сети от 50×50 м до 25×25 м нижняя граница залежи усложняется и приобретает более выраженную пилообразную форму. При этом мощность залежи по пересечениям изменяется как в сторону увеличения, так и уменьшения.

В условиях относительно простой формы рудного тела в плане наиболее целесообразно оценивать ошибки геометризации для оконтуривания рудных залежей в разрезах. При этом в первую очередь необходимо учитывать сложную морфологию подошвы залежей. Определить средние размеры участков залежей, характеризующиеся резким изменением глубины подошвы, возможно с помощью геостатистических методов, для этого можно использовать полувариограммы мощностей рудных залежей, построенные по основным направлениям анизотропии.

При анализе полувариограммы мощностей рудного тела, построенной по направлению простирания рудного тела, можно отметить, что наиболее резкое, скачкообразное изменение мощности отмечается в пределах интервала 0-90 м (**рис. 5**), что характеризует усредненный размер обособленных интервалов распространения окислительных процессов на глубину. Этот интервал можно использовать для аналитического расчета по формуле (5) для определения ошибок геометризации в направлении разреза



**Рис. 1.** Полувариограмма содержаний никеля по направлению простирания рудных залежей

применительно к оконтуриванию подошвы рудного тела. В направлении вкрест простирания эта область ограничивается интервалом 0-110 м.

Ошибки геометризации в разрезе, применительно к оконтуриванию подошвы рудного тела, составят: для категории В – 17.9 %, для категории С1 – 35.9 %, для категории С2 – 71.8 %.

Согласно проведенным расчетам, действующая на месторождении разведочная сеть удовлетворяет к требованиям к ошибкам геометризации по всем категориям запасов, что говорит о достаточной степени достоверности определения пространственного положения рудной залежи III участка Буруктальского месторождения по данным имеющихся геологоразведочных сетей. Параметры сети, определенные по аналитическому расчету погрешности оценки содержаний, также будут находиться в пределах допустимых значений ошибки геометризации.

**Зарубежные подходы к обоснованию сети (кодекс JORC)**

В Австралийском кодексе по подготовке отчетности о результатах геологоразведочных работ, минеральных ресурсов и рудных запасов (JORC) параметры разведочной сети рассматриваются в разделе плотность данных и их распределение [6]. Основным критерием является достаточность плотности разведочной сети и ее распределение в пространстве для достоверного оконтуривания рудных тел и оценки запасов, при этом какой-либо качественной либо количественной оценки оптимальных параметров сети в кодексе JORC, по сравнению с рекомендациями ГКЗ, не приводится.

Наиболее распространенным приемом по определению достаточности имеющейся разведочной сети для квалификации запасов по требуемой категории является использование вариограмм. Основная идея этого подхода состоит в том, что по вариограмме определяется расстояние (range или предел корреляции), при котором она выходит на пороговые значения

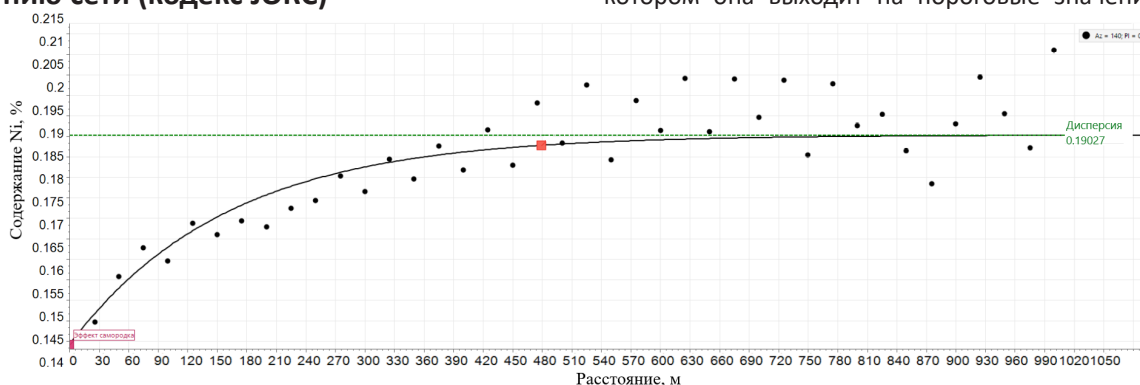


Рис. 2. Полувариограмма содержаний никеля по направлению вкрест простирания рудных залежей

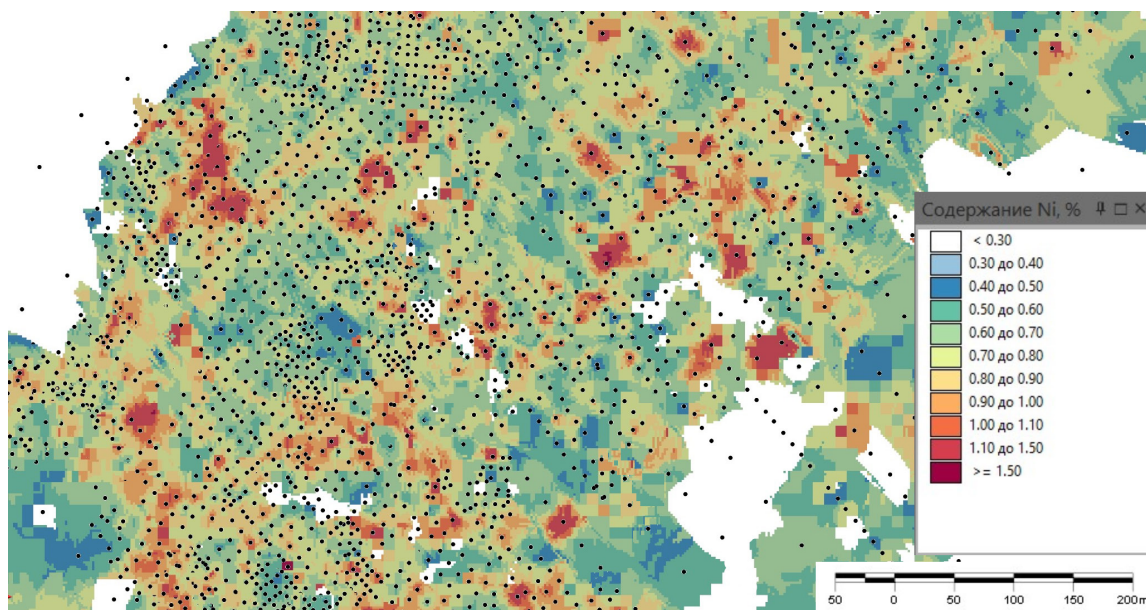


Рис. 3. Блочная модель Буруктальского месторождения, вид в плане

(sill). Далее по нормированным значениям вариограмм оцениваются расстояния между разведочными пересечениями, при которых ресурсы могут квалифицироваться по той или иной категории. Однозначно принципы оценки этих расстояний не определены и несколько расходятся в разных отчетах и публикациях [4].

Например, Г. Паркер [7] предлагает считать, что расстояния между пересечениями, соответствующие нормированным значениям вариограммы менее 0.6, позволяют оценивать ресурсы по категории measured. Предельному расстоянию, достаточному для квалификации ресурсов по категории indicated, соответствует нормированное значение вариограммы 0.8. Для оценки ресурсов категории inferred может использоваться шаг сети, не превышающий предел корреляции или увеличенные относительно него на 10-20 %.

Для III участка Буруктальского месторождения оценку параметров разведочной сети для достоверной оценки ресурсов по категориям JORC можно определить аналогичным образом по нормированным вариограммам, построен-

ным по направлениям падения и вкрест простирания рудных залежей.

По направлению вкрест простирания нормированному значению вариограммы 0.6 соответствует расстояние 70 м, позволяющее оценивать ресурсы по категории measured (рис. 6). Для оценки ресурсов по категории indicated предельный размер сети составляет 280 м, для категории ресурсов inferred – 550 м.

Предельные размеры сети для оценки ресурсов по категориям JORC по направлению вкрест простирания рудных тел несколько отличаются: категории measured соответствует расстояние в 140 м, категории indicated – 240 м, категории inferred – 340 м (рис. 7).

Допустимые размеры разведочной сети для оценки ресурсов по категории measured составили 70×140 м. При сравнении с аналогичной категорией запасов В по классификации ГКЗ эта сеть разряжена в 1.5-2 раза (45×65 м – по данным аналитического расчета).

Для оценки ресурсов категории indicated предельный размер сети, определенный по анализу

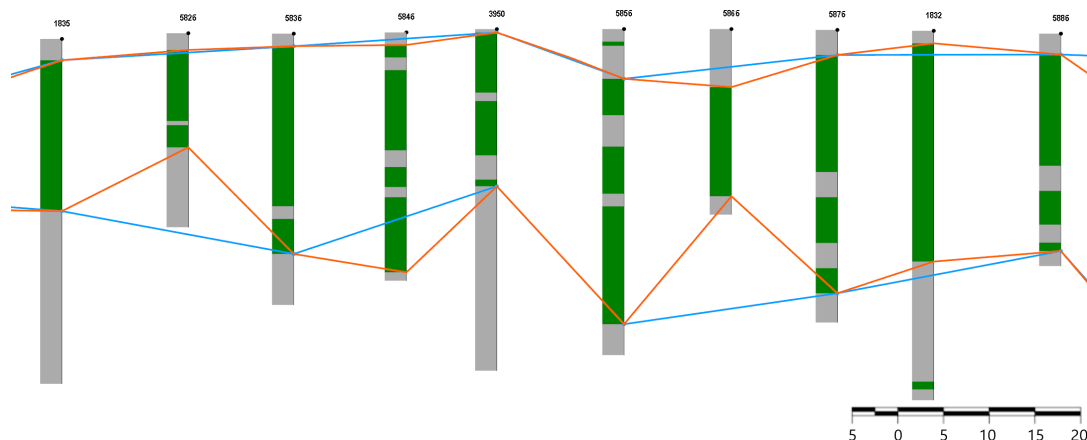


Рис. 4. Профиль +XX, оконтуривание рудной залежи по разведочной сети 50×50 м (синий) и 25×25 м (оранжевый)

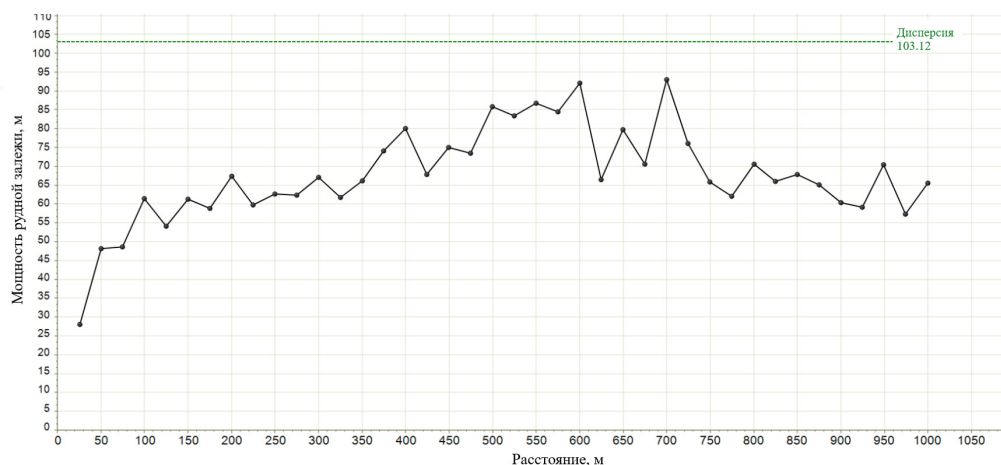


Рис. 5. Полувариограмма мощности рудных залежей по направлению простирания

полувариограмм, составил 240×280 м. Для аналогичных запасов классификации ГКЗ по категории С1 требования к густоте разведочной сети также оказались выше в два раза (100×140 м по данным количественного анализа)

Для оценки ресурсов по категории inferred допустимые размеры сети составили 340×550 м.

### Выводы

Разведочная сеть III участка Буруктальского месторождения была изучена на основании количественных методов. Аналитическим путем определены величины критериев разведанности, обосновывающие параметры разведочной сети.

С позиций анализа погрешности оценки средних содержаний никеля, параметры разведочной сети удовлетворяют требованиям к запасам по всем категориям. По количественным показателям, в зависимости от вариации содержаний никеля в пробах и допустимой предельной погрешности оценки среднего, рассчитаны оптимальные параметры густоты разведочной сети:

- для категории В – 45×65 м;
- для категории С1 – 100×140 м;
- для категории С2 – 200×280 м.

Параметры оптимальной густоты разведочной сети, определенные на основании количественных показателей, находятся в допустимых пределах размеров ячейки сети, приведенных в Методических рекомендациях ГКЗ [5] по всем категориям запасов.

По критерию величины ошибок геометризации проведены расчеты по различным показателям. Ошибки при оконтуривании рудных

залежей различаются в зависимости от анализируемой плоскости: для III участка Буруктальского месторождения наиболее сложная морфология характерна для плоскости разреза, в первую очередь, для подошвы рудной залежи, в то время как в плане залежь имеет более простые очертания. Эти особенности выражаются в величинах ошибок геометризации, которые оказались выше в расчетах, основанных на изменчивости мощности залежей. Согласно проведенным расчетам, по критерию ошибок геометризации существующая разведочная сеть удовлетворяет требованиям допустимых пределов для всех категорий запасов.

На основании геостатистического анализа проведено обоснование разведочной сети по зарубежной классификации запасов на основании Австралийского кодекса JORC. Параметры разведочной сети для категорий ресурсов определены по вариограммам в зависимости от предела корреляции. Предельные размеры сети составили:

- для ресурсов категории measured – 70×140 м;
- для ресурсов категории indicated – 240×280 м;
- для ресурсов категории inferred – 340×500 м.

Параметры разведочной сети, определенные по количественным показателям для категории запасов В, оказались в 1.5 – 2.5 раза более разряжены, чем параметры сети для аналогичных ресурсов measured. При сравнении рассчитанных параметров сети для классификации запасов по категории С1 и соответствующим им ресурсам indicated эта зависимость сохраняется. XXI

### Литература

1. Викентьев В.А., Карпенко И.А., Шумилин М.В. Экспертиза подсчетов запасов рудных месторождений. Москва: Недра, 1988 – 201 с.
2. Каждан А.Б. Методологические основы разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. Москва: Недра, 1974. – 272 с.
3. Коткин В.А. Количественная оценка точности и достоверности разведанных запасов месторождений твердых полезных ископаемых / В.А. Коткин, А.В. Мельникова, А.Н. Лазарев, Н.Н. Лагонский // Недропользование XXI век. – 2009. – №1. – С. 29-33.
4. Кушнарев П.И. Научно-методические основы количественной оценки разведанности золоторудных месторождений, Диссертация на соискание степени учёной степени доктора геолого-минералогических наук. ФГБУ «ВИМС», 2022 г. – 193 с.
5. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. ФБУ «ГКЗ», М., 2007
6. Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves (The JORC Code). Prepared by the Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of Geoscientists and Minerals Council of Australia (JORC). Comparison JORC (2004) to JORC (2012) Draft Code. – 2012. – 98 p.
7. Parker H. Quantitative Criteria for mineral resource Classification / H. Parker – Joint State Commission on Mineral Resources of the Russian Federation (GKZ) and CRIRSCO Seminar «Russia and International Mineral Reserves/Resources Standards». – Moscow, Russian Federation. – 27 September 2010.

UDC: 553.042

**A.A. Borisov**, FGBU «VIMS», deputy head of resource evaluation department, Post-graduate student of the Department of geology, geochemistry and economics of ore deposit, Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, borisov@vims-geo.ru  
**M.A. Boguslavskiy**, Candidate of Science (Geol.-Mineral.), Docent of the Department of geology, geochemistry and economics of ore deposit, Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, mboguslavskiy@yandex.ru

## BURUKTAL DEPOSIT DRILL HOLE SPACING ANALYSIS BASED ON QUANTITATIVE INDICATORS

**Abstract:** Methods of drill hole spacing analysis, based on the analytical calculation of quantitative criteria for the exploration of the section III of the Buruktal field were considered. Estimation error and geometrization error were valued using quantitative equations. The parameters of the optimal exploration network for all categories of reserves were calculated: in accordance with the classifications of the GKZ and the JORC code.

**Keywords:** drill hole spacing, estimation error, delineation error, resource classification, Buruktal deposit.