



ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ГЕОМЕТРИЗАЦИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФОСФАТНЫХ РУД ПРИ ИХ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ (НА ПРИМЕРЕ КОВДОРСКОГО АПАТИТ-ШТАФФЕЛИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

Е.Б. ЯНИЦКИЙ

ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт по осушению месторождений полезных ископаемых, защите инженерных сооружений от обводнения, специальным горным работам, геомеханике, геофизике, гидротехнике, геологии и маркшейдерскому делу» (ОАО «ВНПОГЕМ»)
86, пр. Б. Хмельницкого, г. Белгород 308007, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Статья посвящена рассмотрению существующих методов определения геометрии и плотности разведочной сети для целей оперативного планирования, а также подходов к определению допустимых погрешностей оценки геологических показателей. В качестве базового объекта исследований выбрано Ковдорское апатит-штаффелитовое месторождение.

Цель. Определить рациональные параметры сети эксплуатационного опробования для целей оперативного планирования добычи фосфатной руды.

Материалы и методы. Исследования проводились в рамках работ по разработке методики эксплуатационного опробования апатит-штаффелитовых руд. Обработка и анализ количественных данных выполнялись с применением методов математической статистики, картографии.

Результаты. На основе метода геометрической автокорреляции, оценки анизотропии изменчивости содержания компонентов, регламентирующих качество минерального сырья, определены рациональные параметры сети эксплуатационного опробования при добыче фосфатного сырья Ковдорского месторождения апатит-штаффелитовых руд.

Заключение. В ходе исследования установлено отсутствие явно выраженной анизотропии содержания P_2O_5 и CO_2 в апатит-штаффелитовых рудах, что предполагает применение равномерной сети эксплуатационного опробования. Определены параметры сети эксплуатационного опробования, которые показывают необходимость опробования шлейфа отложения шлама каждой скважины.

Ключевые слова: карьер, оперативное планирование, опробование руд, фосфатное сырье, геометризация качественных показателей, шлейф шлама

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследования проведены в рамках соответствующего контракта с недиропользователем, эксплуатирующим месторождение.

Для цитирования: Яницкий Е.Б. Повышение достоверности геометризации качественных показателей фосфатных руд при их открытой разработке (на примере Ковдорского апатит-штаффелитового месторождения). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(5):64—72. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-5-64-72>

Статья поступила в редакцию 28.11.2022

Принята к публикации 12.12.2022

Опубликована 19.12.2022

IMPROVING THE GEOMETRIZATION RELIABILITY OF QUALITATIVE INDICATORS OF PHOSPHATE ORES DURING THEIR OPEN MINING ON THE EXAMPLE OF THE KOVDORSKOYE APATITE AND STAFFELITE ORE FIELD

EVGENIY B. YANITSKIY

OJSC "VIOGEM"

86, B. Hmel' nitskogo ave., Belgorod 308007, Russia

ABSTRACT

Background. In this paper, available methods for determining the geometry and density of exploration networks used in operational planning are discussed, along with approaches to determining the permissible error limits in the assessment of geological indicators. The Kovdorskoye apatite and staffelite ore field was selected as a research object.

Aim. To determine the rational parameters of an in-mine sampling network for use in operational planning of phosphate ore mining.

Materials and methods. The research was carried out as part of a project on the development of a methodology for operational in-mine sampling of apatite and staffelite ores. Quantitative data were processed and analyzed using the methods of mathematical statistics and cartography.

Results. The conducted geometric autocorrelation and assessment of the anisotropy of variability in the content of components, which determine the quality of mineral raw materials, allowed the author to establish the rational parameters of an operational in-mine sampling network during the extraction of phosphate raw materials from the Kovdorskoye apatite and staffelite ore field.

Conclusion. The absence of a pronounced anisotropy in the content of P_2O_5 and CO_2 in apatite and staffelite ores was established, which implies the feasibility of using a uniform in-mine sampling network. The parameters of such a network were determined, which confirm the need to sample the rock cuttings in each borehole.

Keywords: quarry, open pit, ore sampling, phosphate raw materials, geometrization of quality indicators, rock cuttings

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

Financing: studies were carried out under the relevant contract with the subsoil user operating the field.

For citation: Yanitskiy E.B. Improving the geometrization reliability of qualitative indicators of phosphate ores during their open mining on the example of the Kovdorskoye apatite and staffelite ore field. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(5):64—72. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-5-64-72>

Manuscript received 28 November 2022

Accepted 12 December 2022

Published 19 December 2022

Ковдорское апатит-штаффелитовое месторождение расположено вблизи западного контакта Ковдорского массива ультраосновных и щелочных пород девонского возраста, который прорывает толщу метаморфических пород, преимущественно гнейсов, верхнего архея. В экзоконтакте массива по гнейсам сформировался ореол фенитов. С этим массивом генетически связан рудно-карбонатитовый узел, представленный Ковдорским апатит-магнетитовым месторождением

и спиралевидной в плане зоной карбонатитов, кюжному кольцевому фрагменту которой и приурочено апатит-штаффелитовое месторождение, разведанное в 1973—1977 годах и доразведанное в 2009—2013 годах, залегающее в мел-палеогеновой коре выветривания карбонатитов и вмещающих их фенитов, фенитизированных гнейсов. С 2015 года АО «Ковдорский ГОК» эксплуатирует месторождение открытым способом с предварительным рыхлением крепких пород взрывом.

Оперативное планирование добычи фосфатной руды в режиме усреднения при открытой разработке минерального сырья основывается, как правило, на определении числовой характеристики содержания пятиоксида фосфора, получаемой на основе опробования шлама взрывных скважин. Достоверность получаемых данных достигается, главным образом, за счет обоснования оптимальной геометрии и плотности сети эксплуатационного опробования, которое должно быть вписано в существующую сеть буровзрывных скважин, поскольку ее параметры определяются показателями сопротивления взрывному разрушению горных пород и не связаны с процессом планирования качественных и количественных показателей руды, подаваемой на фабрику. При этом определяющим является тот факт, что оптимальность планирования горных работ может быть достигнута только за счет достоверной геометрии руд и пород, определяемых таким важным классификационным признаком, как содержание полезного компонента в точке опробования, которой в условиях фосфатного оруденения является шлам взрывной скважины, а значение содержания в этой точке представляет собой усредненную на высоту эксплуатационного уступа характеристику.

Разработке методики опробования шлейфа отложения шлама единичной скважины посвящены предыдущие работы автора [7, 28]. В данной статье рассмотрены подходы к повышению достоверности геометрии руд и пород с целью определения оптимальных параметров сети эксплуатационного опробования.

Условно методы определения геометрии и плотности разведочной сети можно разделить на две группы: эмпирические (практические) и аналитические [24]. Каждый из методов основывается на определенном геолого-математическом обосновании, имеет свои недостатки, ограничения и преимущества. Остановимся на краткой характеристике основных методов подробнее.

Метод разрежения разведочной сети состоит в сравнении подсчетных параметров (мощность, площадь, среднее содержание, запасы руды) по сеткам различной густоты. Основными недостатками метода являются, с одной стороны, необходимость иметь хорошо разведанный участок месторождения, с другой — многообразие вариантов разрежения, что требует обоснования критерия выбора того или варианта. Кроме того, доказано [13], что данный метод может быть применен только для определения количества проб, но не расстояний между ними.

Метод сравнения результатов разведки и разработки является наиболее надежным. Однако опыт применения этого метода сопряжен с определенными трудностями, которые заключаются в том, что данные эксплуатации и разведки часто несопоставимы вследствие различия подсчетных контуров, достоверности определения потерь и разубоживания полезного компонента, особенностей учета добытых руд на обогатительной фабрике [9, 11, 13].

Методы определения параметров разведочной сети с применением положений теории вероятности и аппарата математической статистики предусматривают определение количественных характеристик изменчивости геологических показателей и построение соответствующей геолого-математической модели месторождения (участка).

Следует отметить, что формальное применение методов математической статистики для решения геологоразведочных задач имеет ряд ограничений. Например, значения содержаний в соседних пробах имеют определенную связь между собой, поэтому ряд последовательно отобранных проб в разведочной скважине не может рассматриваться как ряд независимых переменных. Кроме того, нередко случаи применения математического аппарата, разработанного для нормального распределения, к показателям, не подчиняющимся этому закону. Эмпирическое распределение пытались аппроксимировать логнормальным, биномиальными законами, распределением Пуассона или функцией Вейбулла, рядами Фурье [13, 25].

Аппарат математической статистики может быть применен только при соблюдении следующих условий теории случайных величин [13, 17]:

- концентрация компонентов в залежах должна быть действительно случайной величиной;
- должна быть хотя бы теоретическая возможность бесконечного повторения испытаний, в результате которого случайная величина могла бы принимать численные значения;
- результат каждого последующего испытания должен быть независим от результатов предыдущих испытаний.

Очевидно, что ни одно из условий не выполняется, поэтому для задачи определения параметров сети опробования аппарат статистики случайных величин мало применим.

Вместе с тем случайный характер пространственной изменчивости и дискретный способ его изучения, переменный знак погрешности сопоставляемых показателей оруденения (например, по данным разведки и разработки) определяют

случайный характер геологоразведочных данных, а соответственно геометризация и подсчет запасов могут быть выполнены только стохастически, т.е. оценка точности имеет вероятностный характер с указанием величины случайной погрешности и заданной доверительной вероятности [1].

Одним из первых учесть указанные противоречия попытался П.Л. Каллистов [12], предложивший разделить изменчивость геологических показателей на случайную составляющую и закономерную, которая подвержена некоторой периодичности.

В качестве замечаний к методу Каллистова отмечены математическая нестрогость способа сглаживания исходных данных, применяемого для выявления закономерной составляющей [5, 21], и зависимость от начала отсчета (положения первой пробы) [13].

В.В. Богацкий характеризует изменчивость через амплитуду колебаний геологического параметра от его среднего значения, а мера изменчивости описывается показателем неравномерности [2]. Однако размах значений содержания не может быть использован для определения плотности сети опробования. Кроме того, предложенная В.В. Богацким формула определения густоты не содержит таких количественных параметров, как расстояние, площадь или объем.

Суть *метода энтропии* [6, 18] состоит в оценке близости вариационных кривых распределения компонентов, построенных по выборкам различного объема. Выборка считается представительной, если построенная на ее основе вариационная кривая аналогична генеральной. Понятно, что с увеличением объема выборки ее энтропия будет стремиться к энтропии генеральной совокупности. В результате произойдет так называемая стабилизация энтропии, по моменту наступления которой определяют оптимальное расстояние между пробами. Известная неопределенность возникает при визуальной оценке начала стабилизации энтропии. Избежать указанного недостатка можно путем определения стабилизации среднего значения (или дисперсии, коэффициента вариации, асимметрии и эксцесса) изучаемого компонента, рассчитанного в области оптимального расстояния между пробами. При этом, как отмечается в [13], основным недостатком метода энтропии является то, что неслучайные данные опробования выдаются за случайные. Следовательно, методы, не учитывающие пространственную изменчивость (частотную по [13]), достоверно могут определить только количество проб, но не геометрию их отбора.

Позднее были предложены более сложные методы, которые количественно описывают не только две составляющие изменчивости геологических параметров, но и корреляционные отношения внутри них, характеризующиеся степенью связи между значениями признака (например, среднего содержания) при различном расстоянии между точками наблюдений [13—15, 20, 22, 25], т.е. определении радиуса автокорреляции.

Общим недостатком методов, основанных на установлении радиуса автокорреляции, является чувствительность автокорреляционной функции к эргодичности пространственных переменных, и то, что радиус автокорреляции не может быть меньше расстояния между разведочными пересечениями [8]. Кроме того, общим условием для всех описанных методов является необходимость иметь эталонный участок.

Существуют работы по обоснованию плотности разведочной сети на основе методов имитационного моделирования [8, 23], использовании ошибок геометризации [4]. При этом следует подчеркнуть, что параметры разведочной сети наибольшее влияние оказывают на погрешность оконтуривания (геометризации), т.е. эта погрешность более чувствительна к изменению параметров сети, чем погрешность любого другого показателя оруденения [1].

Таким образом, на сегодня не существует окончательного решения проблемы оптимизации геометрии и плотности разведочной сети. Кроме того, для установления оптимальных параметров разведочной сети опробования необходимо решить еще одну важную задачу — обосновать величину допустимой погрешности оценки геологических показателей (особенно на стадии эксплуатации), на которую, с одной стороны, влияют изменчивость природных свойств (сложность строения и изменчивость оруденения), с другой — методика разведки месторождения.

Вопрос о допустимых погрешностях оценки геологических показателей на стадии эксплуатации месторождений исследован слабо. Основная трудность при решении этого вопроса связана с выбором критерия оптимизации. Так, в работе [19] оптимизация достигается на основе критерия минимизации суммы затрат на опробование и риска экономических потерь при последующей разработке. Подобный подход предложен и в работе [16], где оптимальные объемы геолого-разведочных работ определяются как совместная функция риска экономических потерь от неполноты геологической изученности. Подход к определению параметров разведочной

сети на основе определения экономического баланса между затратами на геолого-разведочные работы и потенциальными нерациональными расходами при строительстве и эксплуатации горного предприятия в случае недоизученности месторождения впервые был предложен С.П. Васильевым [3] и получил название метода экономической эквивалентности. Очевидно, что экономический принцип определения допустимых погрешностей может быть фактически использован только на эксплуатируемых месторождениях, на его детально разведанных участках. Другим недостатком предложенного метода является тот факт, что оптимизация производится только для густоты разведочной сети, т.е. не учитывается ее геометрия, оптимальность которой устанавливается оценкой анизотропии изменчивости геологических параметров.

Как уже отмечалось выше, основным геологическим показателем, определяющим эффективность планирования горных работ, является содержание полезного компонента, достоверная геометризация которого позволяет выполнять оперативное управление качеством минерального сырья, подаваемого на фабрику. Кроме того, опыт показывает, что изменение содержания полезного компонента на месторождениях не подчиняется линейному характеру, поэтому, чтобы применять при геометризации метод линейной интерполяции, прибегают к линейному или площадному сглаживанию единичных значений содержаний. Повысить достоверность геометризации можно за счет применения коэффициента нелинейности [26, 27]. В связи с этим актуальной является задача разработки методики геометризации качественных показателей с учетом нелинейности содержания полезного компонента. Решение данной задачи должно рассматриваться отдельно для опережающей и сопровождающей эксплуатационной разведки. При этом определение параметров сети эксплуатационного опробования (сопровождающая разведка) может быть основано на аппарате математической статистики и теории вероятности, поскольку в силу нарушения пространственных закономерностей в шлейфе отложения шлама взрывных скважин результаты его опробования следует рассматривать как конкретную реализацию случайной функции [10]. Обоснование параметров сети опережающей эксплуатационной разведки должно базироваться на ином математическом обосновании с учетом представлений об анизотропии изменчивости геологических параметров месторождения и, следовательно, анизотропии самой сети.

В рамках настоящей статьи разработана методика определения оптимальных параметров сети эксплуатационного опробования, которая заключается в следующем. На первом этапе в горно-геологической системе ГИС ГЕОМИКС сформирована пространственно-координированная база данных опробования разведочных скважин, в результате статистического анализа которой были определены наиболее изменчивые показатели, связанные с требованиями обогатительной фабрики к подаче сырой руды (P_2O_5 и CO_2).

Оценка анизотропии изменчивости содержания P_2O_5 и CO_2 выполнена палеточным способом (размер ячейки 6×6 м) для опытного участка по следующей методике. В ГИС ГЕОМИКС на основе данных опробования шлама взрывных скважин, пробуренных на опытном участке Западного фланга, выполнялось построение изолиний содержаний P_2O_5 и CO_2 , рассчитываемых как средневзвешенное значение на высоту эксплуатационного уступа (рис. 1). Расчет средней изменчивости (I) и показателя анизотропии (A) выполнялся по формулам:

$$I = \frac{\sum n}{\sum I}; A = \frac{I_{max}}{I_{min}},$$

где n — количество в контуре залежи контактов между различными типами руд и пород, пересекаемых одной линией; I — длина одной линии; I_{max} , I_{min} — направления наибольшей и наименьшей изменчивости соответственно.

В целом анизотропии изменчивости содержания P_2O_5 и CO_2 в апатит-штаффелитовых рудах не установлено, показатель анизотропии составляет 1,20 и 1,04 соответственно.

Плотность исходных данных шламового опробования экспериментального участка, возможность применения аппарата математической статистики и теории вероятности [17] позволяют для расчета оптимального шага опробования буровзрывных скважин применить метод геометрической автокорреляции [15] с определением радиуса автокорреляции, значение которого и будет соответствовать оптимальному шагу опробования.

Рассчитанные средневзвешенные значения радиуса геометрической автокорреляции на опытном участке составляют для P_2O_5 и CO_2 8,2 и 8,8 м вкрест простирания, 8,0 и 8,4 м вдоль простирания соответственно. Таким образом, с учетом существующей сети бурения (6,4×5,4 м) должна быть опробована каждая буровзрывная скважина.

Для проверки расчетных параметров сети эксплуатационного опробования построены качественные планы буровзрывных блоков по исходной

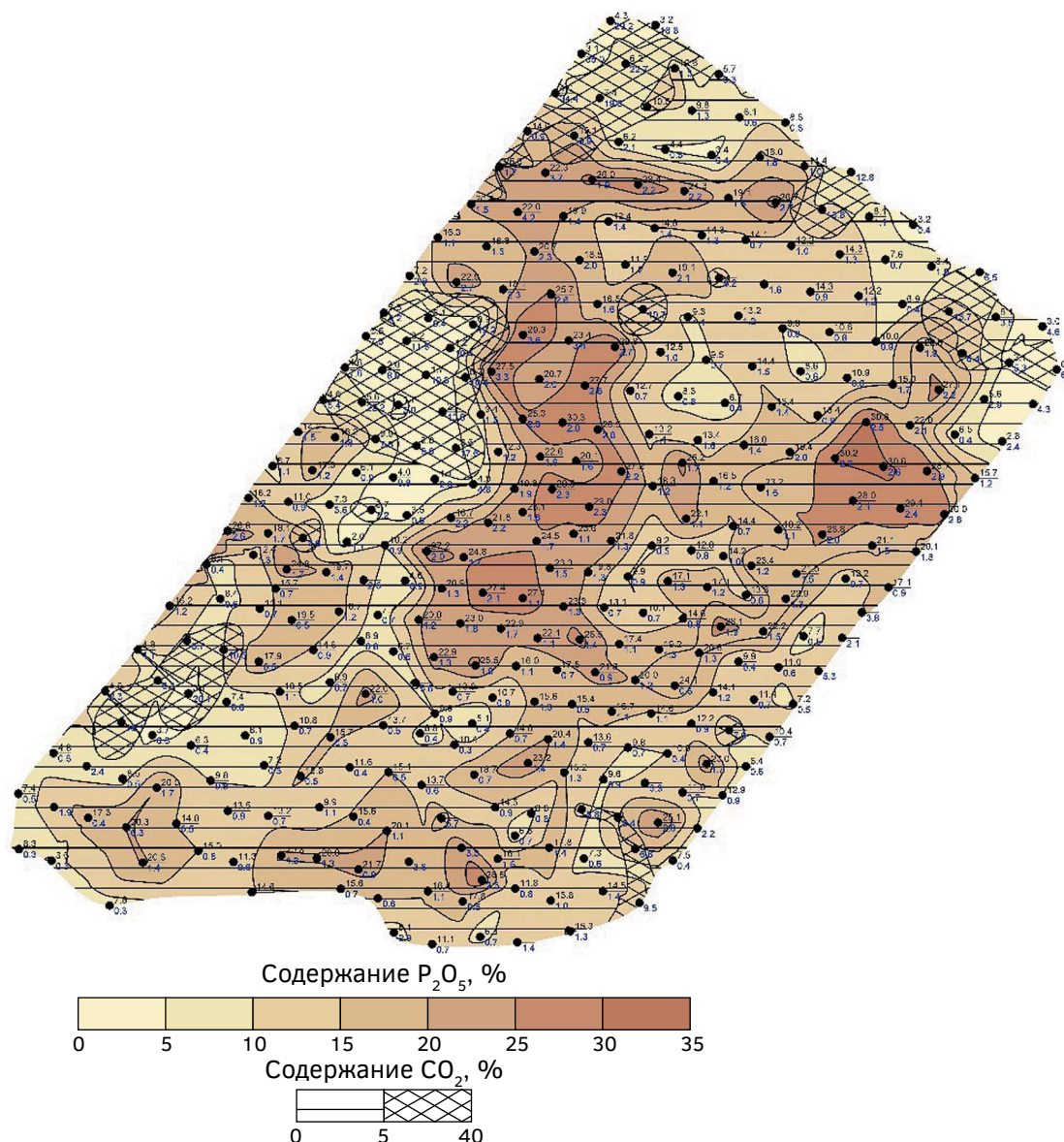


Рис. 1. Изолинии содержания P_2O_5 и CO_2 в пределах экспериментального блока Западного фланга Ковдорского апатит-штаффелитового месторождения

Fig. 1. P_2O_5 and CO_2 content contours within the experimental block of the Western flank of the Kovdor apatite-staffelite field

и разреженной сети, по которым методом эксплуатационных блоков, реализованном в ГИС ГЕОМИКС, выполнен подсчет среднего содержания полезных компонентов и запасов руд. В случае если в пределах исходной сети имелись скважины без опробования, то расчет средних содержаний для таких скважин выполнялся по блочной модели буровзрывного блока с параметрами ячейки $3 \times 3 \times 12$ м. Поскольку анизотропия изменчивости содержания компонентов не установлена, разрежение проводилось через ряд и через скважину.

Результаты сопоставлений полученных расхождений в запасах и содержании в исходных и разреженных контурах подтвердили необходимость опробования шлама каждой скважины.

Выводы

1. Повышение достоверности геометризации качественных показателей руд для целей оперативного планирования остается одной из актуальных задач при открытой разработке месторождений твердых полезных ископаемых.

2. Отсутствие явно выраженной анизотропии содержания P_2O_5 и CO_2 в апатит-штаффелитовых рудах предполагает применение равномерной сети эксплуатационного опробования, параметры которой обуславливаются неоднородностью вещественного состава и структурно-текстурных особенностей руд, изменчивостью их

физико-механических и технологических свойств на различных участках месторождения.

3. На основе расчета радиуса геометрической автокорреляции определены оптимальные параметры сети опробования буровзрывного блока. Опробованию подлежит шлейф отложения шлама каждой скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Н.Ф.* Проблема геолого-промышленной оценки рудных месторождений // Известия вузов. Геология и разведка. 1988. № 6. С. 53—59.
2. *Богацкий В.В.* Математический анализ разведочной сети. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 212 с.
3. *Васильев С.П.* Метод экономической эквивалентности в определении частоты буровых скважин при детальной разведке на уголь в Подмосковном бассейне // Разведка и охрана недр. 1950. № 1. С. 29—34.
4. *Викентьев В.А., Воронков В.А., Кушнарев П.И., Ясковский П.П.* О свойствах ошибок геометризации // Известия вузов. Геология и разведка. 1979. № 2. С. 122—128.
5. *Гуськов О.И., Шумилин М.В.* О применении статистических методов для анализа плотности разведочной сети // Известия вузов. Геология и разведка. 1968. № 6. С. 69—77.
6. *Дементьев Л.Ф., Хитров Е.А., Шурубор Ю.В.* Применение информационных мер в нефтепромышленной геологии // Труды. Пермский государственный научно-исследовательский и проектный институт нефтяной промышленности «Пермнипинефть». 1974. Вып. 10. 155 с.
7. *Дунаев В.А., Яницкий Е.Б.* Методика опробования шлама буровзрывных скважин при открытой разработке Ковдорского апатит-штаффелитового месторождения // Известия вузов. Геология и разведка. 2014. № 1. С. 30—36.
8. *Загibalов А.В.* Применение методов имитационного моделирования разведки россыпных месторождений золота для исследования погрешностей оконтуривания и подсчета запасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 3. С. 166—176.
9. *Зенков Д.А.* Методы определения плотности разведочной сети // Советская геология. 1957. № 61. С. 130—143.
10. *Каждан А.Б.* О математическом описании изменчивости геологоразведочных параметров рудных залежей // Математические методы в геологии. М.: Недра, 1968. С. 92—99.
11. *Каждан А.Б.* Разведка месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1974. 327 с.
12. *Каллистов П.Л.* Изменчивость оруденения и плотность наблюдений при разведке и опробовании // Советская геология. 1956. № 53. С. 118—131.
13. *Лебедев Г.В.* Методы определения параметров систем опробования // Вестник Пермского университета. Геология. 2007. № 4(9). С. 76—90.
14. *Лебедев Г.В.* О методах определения параметров систем опробования // Геометризация и анализ геологических полей месторождений полезных ископаемых. Пермь, 1981. Вып. 1. С. 14—40.
15. *Лебедев Г.В., Набиулин В.И.* Методика определения оптимальной сети наблюдений в условиях скрытой периодичности геологических полей // Вестник Пермского университета. Геология. 2008. № 10(26). С. 83—90.
16. *Мамбуэни П.* Применение геолого-экономического анализа для обоснования оптимальной сети разведки рудных месторождений (на примере жильных месторождений олова): автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2004. 23 с.
17. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 408 с.
18. *Миллер Р.Л.* Статистический анализ в геологических науках. М.: Мир, 1965. 480 с.
19. *Мининг С.С.* Определение оптимальных параметров сети опробования буровзрывных скважин выемочных участков Михайловского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 2. С. 191—195.
20. *Мягков В.Ф., Лебедев Г.В.* Автокорреляционный метод определения расстояний между пробами // Геология месторождений полезных ископаемых Урала и новые методы их изучения: тез. доклада науч. совещ. Свердловск, 1974. С. 203—204.
21. *Низгурецкий З.Д.* Некоторые особенности использования метода скользящих средних при геометризации // Сборник трудов по вопросам исследования горного давления и сдвига горных пород. Л.: Недра, 1961. С. 83—91.
22. *Редькин Г.М.* Нестационарное анизотропное математическое моделирование неоднородностей систем минерального сырья. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. 500 с.
23. *Рупосов В.Л.* Исследование плотности разведочной сети при разведке железорудных месторождений Ангара-Илимского типа на основе имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 2002. 22 с.
24. *Смирнов В.И.* О плотности разведочной сети // Советская геология. 1957. № 58. С. 150—162.

25. Снетков В.И. Критерий оптимальной аппроксимации геологических показателей с помощью рядов Фурье // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2005. № 5. С. 11—15.
26. Снетков В.И. Обоснование методов квалитметрической оценки запасов твердых полезных ископаемых: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 40 с.
27. Столчнев В.Г. Геометризация месторождений с позиций «неевклидовой» геометрии // Маркшейдерия и недропользование. 2004. № 3. С. 43—62.
28. Яницкий Е.Б., Дунаев В.А. Обоснование методики эксплуатационного опробования апатит-штаффелитовых руд Ковдорского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 3. С. 87—97.

REFERENCES

1. Alekseev N.F. The problem of geological and industrial assessment of ore deposits // Izvestiya VUZov. Geology and exploration. 1988. No. 6. P. 53—59.
2. Bogatsky V.V. Mathematical analysis of the exploration network. Moscow: Gosgeoltekhnizdat, 1963. 212 p.
3. Vasiliev S.P. The method of economic equivalence in determining the frequency of boreholes during detailed exploration for coal in the Moscow Basin // Exploration and protection of mineral resources. 1950. No. 1. P. 29—34.
4. Vikentiev V.A., Voronkov V.A., Kushnarev P.I., Yaskovskiy P.P. On properties of geometrization errors // Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 1979. No. 2. P. 122—128.
5. Guskov O.I., Shumilin M.V. On the application of statistical methods to analyze the density of the exploration network. News of higher educational institutions // Geology and exploration. 1968. No. 6. P. 69—77.
6. Dementiev L.F., Khitrov E.A., Shurubor Yu.V. Application of information measures in oilfield geology // Proceedings. Perm State Research and Design Institute of the Oil Industry "Permnapineft". 1974. Iss. 10. 155 p.
7. Dunaev V.A., Yanitskiy E.B. Technique for sampling drilling blast hole cuttings during open pit mining of the Kovdorskoye apatite-shtaffelite deposit // Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 2014. No. 1. P. 30—36.
8. Zagibalov A.V. Application of simulation modeling methods for exploration of alluvial gold deposits for the study of errors in delineation and calculation of reserves // Mining Information and Analytical Bulletin. 2010. No. 3. P. 166—176.
9. Zenkov D.A. Methods for determining the density of the exploration network // Soviet Geology. 1957. No. 61. P. 130—143.
10. Kazhdan A.B. On the mathematical description of the variability of geological exploration parameters of ore deposits // Mathematical methods in geology. Moscow: Nedra, 1968. P. 92—99.
11. Kazhdan A.B. Exploration of mineral deposits. Moscow: Nedra, 1974. 327 p.
12. Kallistov P.L. Variability of mineralization and density of observations during exploration and sampling // Soviet Geology. 1956. No. 53. P. 118—131.
13. Lebedev G.V. Methods for determining the parameters of sampling systems // Bulletin of the Perm University. Geology. 2007. No. 4(9). P. 76—90.
14. Lebedev G.V. On methods for determining the parameters of sampling systems // Geometrization and analysis of geological fields of mineral deposits. Perm, 1981. Iss. 1. P. 14—40.
15. Lebedev G.V., Nabiulin V.I. Technique for determining the optimal observation network under conditions of hidden periodicity of geological fields // Bulletin of the Perm University. Geology. 2008. No. 10(26). P. 83—90.
16. Mambueni P. Application of geological and economic analysis to substantiate the optimal network of exploration of ore deposits (on the example of vein deposits of tin): abstract. dis. ... cand. geol-miner. sciences. Moscow, 2004. 23 p.
17. Matern Zh. Fundamentals of applied geostatistics. Moscow: Mir, 1968. 408 p.
18. Miller R.L. Statistical analysis in geological sciences. Moscow: Mir, 1965. 480 p.
19. Mining S.S. Determination of the optimal parameters of the sampling network for drilling and blasting wells in the extraction areas of the Mikhailovskoye field // Mining Information and Analytical Bulletin. 2004. No. 2. P. 191—195.
20. Myagkov V.F., Lebedev G.V. Autocorrelation method for determining distances between samples // Geology of mineral deposits of the Urals and new methods of their study: Proceedings. scientific report. meeting Sverdlovsk, 1974. P. 203—204.
21. Nizguretsky Z.D. Some features of the use of the method of moving averages in geometrization // Collection of works on the study of rock pressure and displacement of rocks. Leningrad: Nedra, 1961. P. 83—91.
22. Redkin G.M. non-stationary anisotropic mathematical modeling of inhomogeneities of systems of mineral raw materials. Moscow: Publishing house of the Association of construction universities, 2007. 500 p.
23. Ruposov V.L. The study of the density of the exploration network in the exploration of iron ore deposits of the Angaro-Ilim type based on simulation: abstract. dis. ... cand. geol-miner. sciences. Irkutsk, 2002. 22 p.
24. Smirnov V.I. On the density of the exploration network // Soviet Geology. 1957. No. 58. P. 150—162.

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

25. Snetkov V.I. Criterion for optimal approximation of geological indicators using Fourier series // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2005. No. 5. P. 11—15.
26. Snetkov V.I. Substantiation of methods for qualimetric evaluation of reserves of solid minerals: abstract. dis. ... doct. tech. sciences. Moscow, 2005. 40 p.
27. Stolchnev V.G. Geometrization of deposits from the standpoint of “non-Euclidean” geometry // Mine surveying and subsoil use. 2004. No. 3. P. 43—62.
28. Yanitskiy E.B. Dunaev V.A. Substantiation of the method of operational testing of apatite-staffelite ores of the Kovdor deposit // Mining Information and Analytical Bulletin. 2015. No. 3. P. 87—97.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Яницкий Е.Б. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Evgeniy B. Yanitskiy — collected material, developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Яницкий Евгений Брониславович — кандидат географических наук, заместитель генерального директора по научной работе и развитию, заведующий лабораторией горнопромышленной геологии ОАО «ВИОГЕМ».

86, пр. Б. Хмельницкого, г. Белгород, 308007, Россия

тел.: +7 (4722) 73-25-15

e-mail: yanez@geomix.ru

SPIN-код: 9400-0730

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-3182>

Evgeniy B. Yanitskiy — Cand. of Sci. (Geography), Deputy General Director for Research and Development, Head of the Laboratory of Mining Geology of OJSC VIOGEM.

86, B. Hmel`nitskogo ave., Belgorod 308007, Russia

tel.: +7 (4722) 73-25-15

e-mail: yanez@geomix.ru

SPIN-code: 9400-0730

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0738-3182>