

ВАРИОГРАММНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА ФОСФОРА (V) НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АПАТИТОВЫЙ ЦИРК

ШАРАФЕЕВА Ю. А., СТЕПАЧЕВА А. В.

Месторождение Апатитовый цирк – одно из апатитовых месторождений Хибинского массива, разрабатываемое Расвумчоррским рудником Кировского филиала АО «Апатит» с 1954 г. подземным способом. В данный момент в АО «Апатит» активно внедряется Ventyx MineScare – это набор интегрированных модулей, используемых при организации горных работ на предприятиях, ведущих открытую (подземную) обработку пластовых (рудных) месторождений. Внедрение современных компьютерных технологий в горное производство позволяет применять геостатистические методы для решения геологических задач. С помощью компьютерных программ выполнены подготовка и анализ данных опробования скважин детальной и эксплуатационной разведки, рассчитаны экспериментальные вариограммы распределения полезного компонента, подобраны теоретические модели и проведена их перекрестная проверка. Установленные закономерности важны при прогнозировании распределения полезного ископаемого и планировании горных работ.

Ключевые слова: содержание полезного компонента; гистограмма; общая вариограмма; вариограммы по направлениям; теоретическая модель; перекрестная проверка.

Кировский филиал АО «Апатит» группы компании «ФосАгро» разрабатывает шесть Хибинских месторождений: Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк (АЦ), Плато Расвумчорр, Коашва и Ньюркапахк. Месторождение Апатитовый цирк находится между Юкспором и Плато Расвумчорр, составляя с ними и Кукисвумчорром 12-километровое рудное тело однотипного геологического строения. Протяженность АЦ по простиранию – 2,5 км.

Рациональное использование полезного ископаемого (ПИ), принятие управленческих, проектно-инженерных и экономических решений при отработке руд невозможно без надежного информационного обеспечения. В Кировском филиале АО «Апатит», крупнейшем в мире предприятии по производству высокосортного (с содержанием P_2O_5 более 35,7 %) апатитового концентрата, работу инженеров, геологов и маркшейдеров объединяет горно-геологическая информационная система Ventyx MineScare. Кроме того, в Горном институте ФИЦ КНЦ РАН создана система компьютерного моделирования объектов горной технологии MINEFRAME, предназначенная для решения широкого круга геологических и горно-технологических задач.

MineScare и MINEFRAME имеют общую цель – сбор, накопление и обработка информации, но отличаются интерфейсом и функционалом. Благодаря объедине-

Шарафеева Юлия Александровна – участковый геолог Кировского филиала АО «Апатит»; аспирантка ФИЦ КНЦ РАН. 184209, г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, 24, ФИЦ «Кольский научный центр РАН». E-mail: kuznecovalyulia@gmail.com

Степачева Анна Владимировна – программист. 184209, г. Апатиты Мурманской обл., ул. Ферсмана, 24, ФИЦ «Кольский научный центр РАН». E-mail: stepacheva@mineframe.ru

нию возможностей обеих программ математически смоделированы геологические объекты и геостатистически описано пространственное распределение ПИ.

Для исследования выбрано месторождение Апатитовый цирк, так как относительно других Хибинских месторождений оно имеет небольшие размеры, наиболее выдержанное строение, в том числе закономерно меняющуюся мощность. Опробование месторождения удовлетворяет условиям применения геостатистики – есть значимые корреляционные связи между пробами в пространстве и отсутствуют резкие изменения свойств среды.

Геологические закономерности апатитового оруденения. Промышленное апатитовое оруденение приурочено к комплексу ийолит-уртитов, слагающему коническую полукольцевую интрузию протяженностью около 75 км, мощностью от 50–500 до 1500–2000 м [1]. Пластообразные тела апатит-нефелиновых руд залегают в висячем боку комплекса ийолит-уртитов или в самом комплексе. Приуроченность апатит-нефелиновых руд к массивным уртитам – следствие их генетической связи [2, 3].

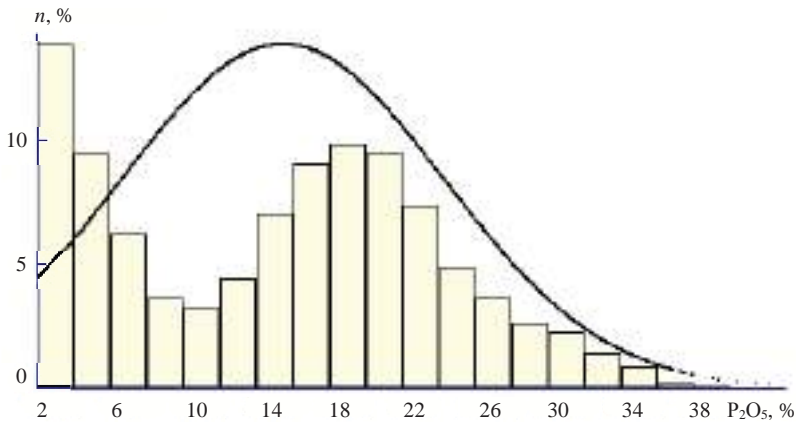


Рис. 1. Гистограмма распределения P_2O_5 в пробах, ограниченных 2-процентным каркасом АЦ

Особенностью распределения и концентрации апатита в рудном поле является отчетливое зональное строение месторождения. В висячем боку размещены обычно богатые апатитом пятнистые и пятнисто-полосчатые руды. В средней части разреза и лежащем боку размещаются блоковые, линзовидно-полосчатые, сетчатые руды, уртиты с апатитом. В зоне верхнего контакта залежи с вмещающими породами спорадически расположены сфен-apatитовые руды. Для большинства типов руд, выделяемых по составу и текстурным особенностям, установлены переходные разности, усложняющие оценку распространенности типов и средних содержаний полезных компонентов [1].

Особое положение занимают брекчированные руды, фиксирующие позднемагматический продольный конический разлом [4, 5]. Интенсивность проявления конического разлома – определяющий фактор в формировании структуры всего месторождения и отдельных рудных тел. Поэтому наряду с вертикальной раннемагматической зональностью на закономерности апатитового оруденения и вещественного состава месторождения существенно влияет наличие брекчированных руд [1].

На месторождении АЦ нарушение смещено к висячему боку залежи, где брекчирует зону богатых руд. Падение разлома – согласно рудной залежи и составляет 20–45°. С удалением от головной части отмечается несовпадение элементов

залегания. На абсолютных отметках 470–600 м угол падения брекчированных руд 40–45°, а залежь падает под углом 20–30°. Северо-западная часть сложена только брекчированными рудами. Здесь на фоне интенсивного изменения внутренней структуры встречаются участки, где сохраняется ненарушенное состояние руд. Это говорит о прерывистой кулисообразной форме разлома [1].

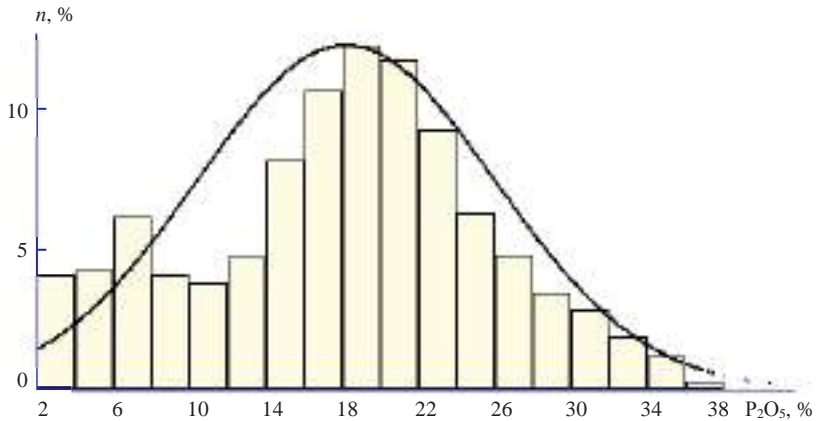


Рис. 2. Гистограмма распределения P_2O_5 в пробах, ограниченных 4-процентным каркасом АЦ

Вариограммный анализ. Геостатистика позволяет выполнять оперативный подсчет и прогноз запасов ПИ. Однако прежде чем использовать ее аппарат для решения практических задач, необходимо располагать вариограммной моделью объекта (месторождения, блока, рудопотока и т. д.), которая должна максимально соответствовать истинной структуре его изменчивости [6].

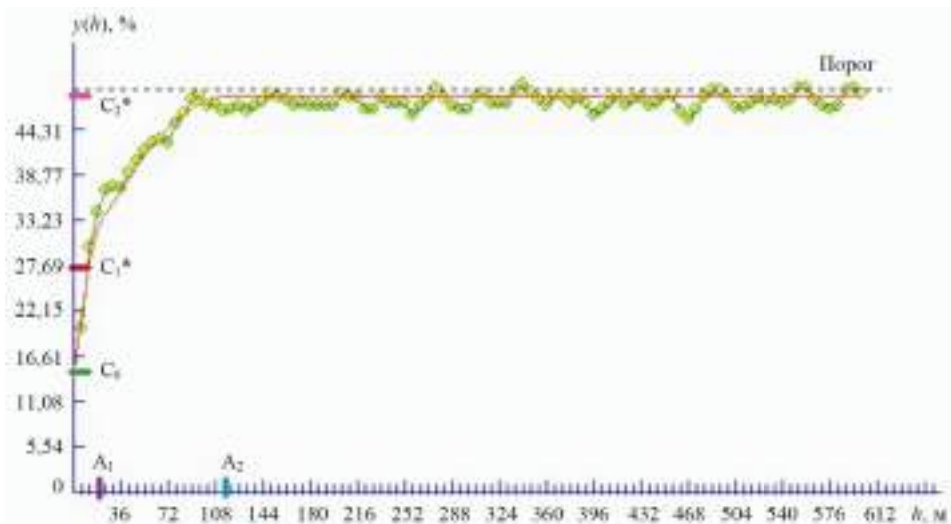


Рис. 3. Общая вариограмма распределения P_2O_5 внутри 4-процентного рудного тела АЦ: C_0 – значения эффекта самородков; C_1 и A_1 – параметры первой модели; C_2 и A_2 – параметры второй модели

Для изучения пространственного распределения полезного компонента (P_2O_5) месторождения АЦ использованы данные эксплуатационной и детальной разведки Кировского филиала АО «Апатит». Создана база данных по более чем 600 геологоразведочным скважинам, содержащая более чем 11 000 проб. Инструмента-

ми MineScape на основе геологических разрезов и планов построены 2-процентные ($P_2O_5 \geq 2\%$) и 4-процентные ($P_2O_5 \geq 4\%$) каркасные модели месторождения. Статистический анализ результатов опробования, включающий данные по содержанию P_2O_5 в пробах, входящих в 2-процентный каркас рудного тела, показал неоднородность выборки (рис. 1). На гистограмме распределения ярко выражено преобладание бедных руд.

Таблица 1

Параметры модели общей вариограммы

Эффект самородков, %	Порог, %	Зона влияния, м
13,73	15,17 19,50	18,00 105,00

Гистограмма распределения P_2O_5 в рудном теле, ограниченном 4-процентным каркасом, близка к нормальному распределению (рис. 2). Большое число «бедных» проб объяснимо наличием в рудном теле прослоев пустых и бедных пород, связанных с позднемагматическим продольным коническим разломом.

Статистический анализ с учетом геологической информации позволил использовать вариограммы для оценки изменчивости P_2O_5 в рудном теле после ряда преобразований.

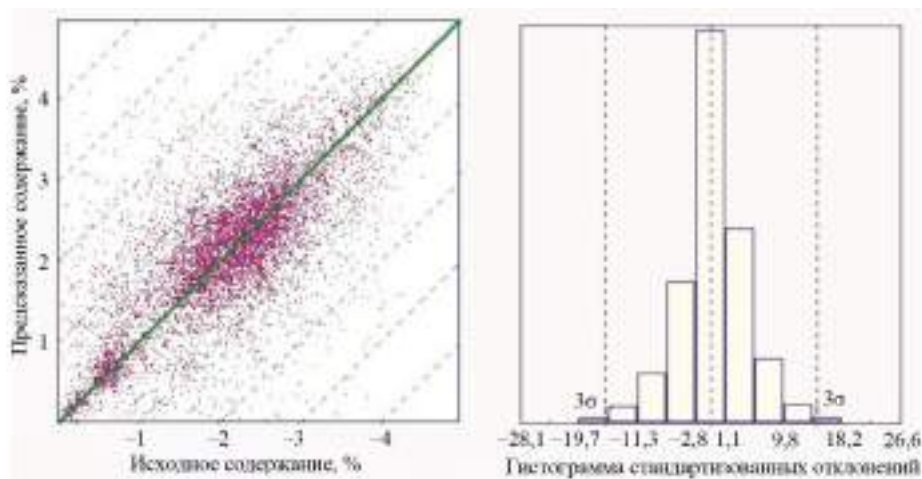


Рис. 4. Результаты перекрестной проверки модели общей вариограммы

Для моделирования вариограмм использованы пробы, входящие в 4-процентную каркасную модель. Кроме того, ради получения более достоверных данных в геостатистических расчетах выполнена композиция интервалов рядового опробования, а именно интервалы опробования приведены к одинаковой длине, т. е. одинаковому статистическому весу [7]. Принята длина 3 м как наиболее распространенная длина пробы в базе данных опробования месторождения АЦ. После анализа исходных данных и их композиции построены экспериментальные вариограммы. При этом использован пакет MINEFRAME, в котором есть блок вариограммного анализа.

Вариограммный анализ начинают с расчета общей вариограммы (omni-variogram), учитывающей не положение точек опробования относительно друг друга, а только расстояние h между ними. Эта функция используется для выявления изменчивости содержаний P_2O_5 в массиве. Общая вариограмма дает первое

представление о структуре изменчивости (тип модели; sill – порог, уровень дисперсии; range – зона влияния). Заметим, что вариограммы по направлениям (directional variogram) рассчитываются затем по значительно меньшему числу пар проб [8]. В рассматриваемом случае экспериментальная общая вариограмма (рис. 3) хорошо аппроксимируется композиционной моделью. Хорошо различимы эффект самородков, т. е. скачок от 0 до σ^2 при $h = 0$, и две сферические модели с разными углами наклона. Параметры модели даны в табл. 1.

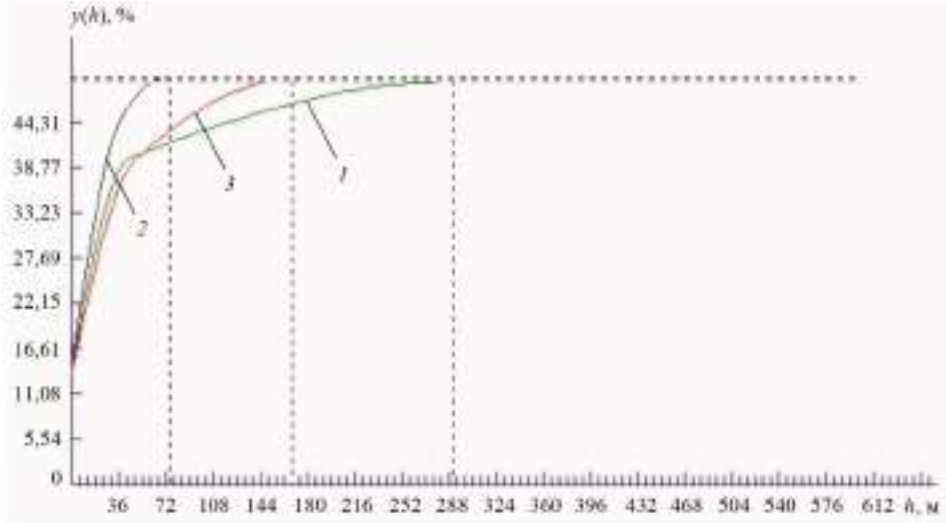


Рис. 5. Вариограммы по трем направлениям анизотропии рудного тела АЦ

Для теоретической модели существует процедура перекрестной проверки (cross-validation), т. е. сравнение действительных значений в точках опробования с теми, которые предсказываются моделью по всем остальным точкам [9]. В MINEFRAME результаты перекрестной проверки (рис. 4) даются в виде гистограммы стандартизованных отклонений и графика, отображающих распределение предсказанных значений относительно истинных. Модель можно считать хорошей, так как полученная гистограмма отклонений описывается гауссовым распределением, а случайная величина принимает значения, отклоняющиеся от математического ожидания не более чем на три среднеквадратических отклонения (3σ , правило «трех сигм»). В диапазон от -3σ до 3σ попали 98,44 % всех точек.

Таблица 2

Параметры вариограммной модели по трем главным направлениям анизотропии рудного тела АЦ

Направление	Азимут, град	Падение, град	Эффект самородков, %	Порог, %	Зона влияния, м
Первое	210	30	13,94	48,07	288,0
Второе	30	60	14,39	48,65	72,0
Третье	120	0	13,33	48,27	165,0

Далее необходимо построить вариограммы по направлениям. Это поможет выявить анизотропию взаимного влияния случайных величин друг на друга [10]. В рудном теле АЦ выявлены два главных направления анизотропии. Третье направление автоматически выбрано ортогональным первым двум. Первое – главное направление – субпараллельно простиранию рудного тела. Второе совпадает

с падением рудной залежи. Выявленная закономерность согласуется с геологической особенностью месторождения – зональным строением (вниз по падению) от богатых руд к бедным. Вариограммы по направлениям даны на рис. 5.

Вариограммы по направлениям также трехструктурные, т. е. содержат эффект самородков и две сферические модели. Параметры вариограмм даны в табл. 2. Выявленная анизотропия относится к геометрическому типу: модели отличаются зонами влияния при равенстве порогов (уровня дисперсии).

Полученные модели позволяют обосновать параметры поискового эллипсоида для интерполяции содержаний в блочную модель.

Таким образом, после проработки исходных данных определена геологическая зона для изучения – рудное тело, оконтуренное 4-процентным содержанием оксида фосфора (V).

В результате вариограммного анализа для общей вариограммы получена трехструктурная модель, что можно объяснить сложным генезисом месторождения, отраженным в его внутреннем строении и сложных контактах с вмещающими породами.

В рудном теле АЦ выявлена геометрическая анизотропия, которая также описывается трехструктурной моделью. Обнаруженная пространственная изменчивость подтверждается геологическими закономерностями, а именно зональным распределением концентраций апатита в рудном поле.

Зная вариограммную модель и параметры анизотропии, можно переходить к геостатистическому оцениванию содержаний P_2O_5 в блоках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобрышев Г. И., Хищенко В. Т. Отчет о работах по изучению вещественного состава руд апатитовых месторождений в пределах обрабатываемых и подготавливаемых к эксплуатации горизонтов рудников объединения «Апатит» // Фонды Кировского филиала АО «Апатит». 1975. Т. 1. 425 с.
2. Вировлянский Г. М. Особенности размещения апатитовых руд в Хибинских месторождениях и их значение для поисков в других массивах. М.: Наука, 1968. С. 91–102.
3. Каменев Е. А. Геология и структура Коашвинского апатитового месторождения. Л.: Недра, 1975. 128 с.
4. Вировлянский Г. М., Благодетелева Ю. Н. Послеapatитовые кольцевые разломы в Хибинском массиве // Промышленность горно-химического сырья. М.: НИИТЭХИМ, 1971. № 4. С. 5–9.
5. Иванова Т. Н. К вопросу о структуре апатит-нефелинового рудного поля Хибинского щелочного массива // Щелочные породы Кольского полуострова. Л.: Наука, 1974. С. 3–8.
6. Капутин Ю. Е. Геостатистическое исследование месторождений полезных ископаемых. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1988. 31 с.
7. Апухтина И. В. Совершенствование методики оценки запасов месторождений железистых кварцитов на основе трехмерного компьютерного моделирования: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб, 2008. 245 с.
8. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика. СПб: Недра, 2002. 424 с.
9. GEOTOOLS, GEOTECH-3D. Часть II. Инструмент геолога: справочник пользователя. Система MINEFRAME. Апатиты, 2012. 107 с.
10. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы – история развития и современное состояние. Апатиты: КНЦ РАН, 2016. 196 с.

Поступила в редакцию 13 февраля 2018 года

VARIOGRAM ANALYSIS OF PHOSPHORUS PENTOXIDE CONTENT SPATIAL VARIABILITY BY THE EXAMPLE OF THE APATITE TSYRK DEPOSIT

Sharafeeva Iu. A., Stepacheva A. V. – Kola Science Centre of RAS, Apatity, Murmansk region, the Russian Federation.
E-mail: kuznecova1yulia@gmail.com

The Apatite tsyrk deposit is one of the apatite deposits, the Khibiny massif, which has been developed by Rassvumchorsky underground mine of the Kirovsky branch of JSC Apatit since 1954. At the moment, Ventyx MineScope is being introduced in JSC Apatit – a set of integrated modules used in mining operations at enterprises that deal with open/underground development of reservoir/ore deposits. The present computer technologies are being introduced in mining operations, making it possible to apply the geostatistics methods to solve geological problems. Computer programs allowed the

sampling data from the boreholes for detailed and operational survey, the experimental variograms for the useful component distribution to be calculated and examined, the theoretical models to be cross-validated. The regularities established are important in the useful component distribution prediction and in mining operations scheduling.

Key words: mineral component; histogram; general variogram; anisotropy; variogram model; cross-validation.

REFERENCES

1. Bobryshev G. I., Khishchenko V. T. [Report on work performed on the examination of apatite deposits ores material composition within the limits of mined and developed horizons of JSC Apatit mines]. *Fondy Kirovskogo filiala AO «Apatit» – Funds of Kirovsk Branch of Apatit*, 1975, vol. 1, 425 p. (In Russ.)
2. Virovlianskii G. M. *Osobennosti razmeshcheniia apatitovykh rud v Khibinskikh mestorozhdeniakh i ikh znachenie dlia poiskov v drugikh massivakh* [Some peculiarities of apatite ores arrangement in Khibinsky deposits and their significance for other massifs prospecting]. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 91–102.
3. Kamenev E. A. *Geologiya i struktura Koashvinskogo apatitovogo mestorozhdeniia* [Geology and structure of Koashvinsky apatite deposit]. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 128 p.
4. Virovlianskii G. M., Blagodeteleva Iu. N. [Post-apatite ring faults in Khibinsky massif]. *Promyshlennost' gornokhimicheskogo syr'ia* [Industry of mining chemical feedstock]. Moscow, NIITEKHIM Publ., 1971, no. 4, pp. 5–9.
5. Ivanova T. N. [Regarding the problem of the structure of apatite-nepheline ore field of Khibinsky alkaline massif]. *Shchelochnye porody Kol'skogo poluostrova* [Alkaline rocks of the Kola Peninsula]. Leningrad, Nauka Publ., 1974, pp. 3–8.
6. Kaputin Iu. E. *Geostatisticheskoe issledovanie mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Geostatistical investigation of mineral deposits]. Petrozavodsk, KB of AS USSR Publ., 1988. 31 p.
7. Apukhtina I. V. *Sovershenstvovanie metodiki otsenki zapasov mestorozhdenii zhelezistykh kvartsitov na osnove trekhmernogo komp'yuternogo modelirovaniia: dis. ... kand. geol.-mineral. nauk* [Developing the methodology of estimating reserves of ferruginous quartzite deposits on the basis of 3D computer simulation. Cand. geol.-miner. sci. diss.]. St. Petersburg, 2008. 245 p.
8. Kaputin Iu. E. *Gornye komp'yuternye tekhnologii i geostatistika* [Mining computer technologies and geostatistics]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2002. 424 p.
9. GEOTOOLS, GEOTECH-3D. Part II. Geologist's tool. User reference. MINEFRAME system. Apatity, 2012. 107 p. (In Russ.)
10. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. *Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy – istoriya razvitiia i sovremennoe sostoianie* [Mining geological information systems – development history and modern state]. Apatity, KSC RAS Publ., 2016. 196 p.