ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья
УДК 553.086

Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья

А.М.ДУРЯГИНА[1]✉, **И.В.ТАЛОВИНА**[1], **Х.ЛИБЕРВИРТ**[2], **Р.К.ИЛАЛОВА**[1]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия*

Как цитировать эту статью: Дурягина А.М., Таловина И.В., Либервирт Х., Илалова Р.К. Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527-538. DOI: 10.31897/PMI.2022.76

Аннотация. Для оценки возможности селективной дезинтеграции и снижения степени переизмельчения труднообогатимых руд были проведены оптико-микроскопические и рентген-микротомографические исследования, идентифицированы количественные характеристики морфологических параметров образцов вкрапленных и богатых медистых руд норильского типа Октябрьского месторождения. Среди количественных морфологических параметров наиболее информативными оказались площадь зерен, периметр, неровность края, сферичность, вытянутость и среднее расстояние между зернами для вкрапленных медно-никелевых руд; площадь зерен, периметр, неровность края и вытянутость для богатых медистых руд. Изученные параметры характеризуются увеличением значений и дисперсности в рудных зонах, что особенно важно для тонкозернистых руд, с трудом диагностируемых оптическими методами. Методом компьютерной рентгеновской микротомографии проведено трехмерное моделирование внутреннего строения образцов с сульфидной минерализацией, благодаря которому можно наблюдать количественные параметры зерен, агрегатов, распределение в общем объеме породы и взаимоотношения друг с другом. Оценка порового пространства породы методом компьютерной микротомографии дала возможность сопоставить полученные результаты с прочностными характеристиками горных пород и руд, в том числе на различных типах дробилок. Полученные количественные характеристики структурно-текстурных параметров, анализ гранулометрического состава зерен рудных минералов позволяют оценить возможность применения селективного измельчения на различных этапах подготовки руды.

Ключевые слова: сульфидные медно-никелевые руды; технологическая минералогия; количественные структурно-текстурные параметры; Thixomet PRO; компьютерная рентгеновская микротомография; селективное измельчение

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-12002).

Поступила: ***12.05.2022*** ***Принята***: ***06.09.2022*** ***Онлайн***: ***03.11.2022*** ***Опубликована***: ***03.11.2022***

Введение. В современном мире доля тонковкрапленного труднообогатимого сырья все возрастает, что, очевидно, требует разработки новых подходов и технологий обогащения в процессе переработки руд [1, 2]. Процессы дезинтеграции, применяемые на начальной стадии обогащения, позволяют экономичнее и экологичнее извлекать ценные компоненты и тем самым увеличивать рентабельность руд и месторождений [3-5]. Сложность переработки тонковкрапленного сульфидного минерального сырья обусловлена трудностью раскрытия сростков ценных компонентов при дезинтеграции для извлечения их в товарные продукты кондиционного качества [6, 7]. Как известно, основная задача дезинтеграции труднообогатимых руд состоит в том, чтобы разрушить объект по границам раздела фаз без переизмельчения при минимизации энергозатрат [8]. Известные на данный момент методы не обеспечивают достаточного раскрытия зерен ценных компонентов, разрушение материала происходит валово [9, 10], что приводит к потерям ценных компонентов и снижает технологические показатели дальнейшего обогащения и переработки руд [11, 12].

Для реализации селективной дезинтеграции необходимо углубленное изучение взаимосвязи структурно-фазового и вещественного состава с физическими, физико-химическими и технологическими свойствами минералов [13, 14]. Обычно геологи дают описание структуры и текстуры

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527-538 DOI: 10.31897/PMI.2022.76
© А.М.Дурягина, И.В.Таловина, Х.Либервирт, Р.К.Илалова, 2022

горных пород и руд с помощью анализа шлифов или аншлифов [15-17]. Для получения морфометрических структурно-текстурных характеристик горных пород и руд оптический метод имеет ограничения, так как является двумерным и может дать только качественное описание. Для получения более детальной, в том числе количественной, информации о минеральном сырье необходимо найти зависимости между соответствующими параметрами разрушения, характеристиками продукта и присущими им технолого-минералогическими и структурно-текстурными особенностями, что является актуальной задачей при исследовании процессов селективной дезинтеграции и разработки аппаратов для их реализации [18, 19].

В настоящее время активно разрабатываются новые средства трехмерного моделирования и измерения морфометрических характеристик горных пород и руд [20, 21]. В связи с этим, основной целью данной работы было исследование возможностей применения современных средств измерения и анализа оптико-микроскопических данных, программного обеспечения Thixomet Pro (Россия) [22] и программ обработки данных компьютерной рентгеновской микротомографии [23, 24] для изучения структурно-текстурных характеристик на примере сульфидных медно-никелевых руд Норильского рудного района.

Геологическое строение Норильского рудного района. В качестве объектов исследования были выбраны типичные месторождения сульфидных медно-никелевых руд Норильского рудного района [25, 26]. Геологическое положение Норильских месторождений хорошо изучено и описано в многочисленных работах [27, 28].

Норильский рудный район расположен в Северной Сибири на стыке Сибирской платформы с Тунгусской синклиналью и Енисей-Хатангским прогибом (рис.1). В континентальные терригенные и угленосные отложения тунгусской серии возраста C_2-P_2, согласно залегающим на них траповым базальтовым свитам возраста P_2-T_1, были внедрены силлоподобные интрузии габбро-долеритов, лейкогаббро и габбро-диоритов, несущих платиноидно-медно-никелевое оруденение [29, 30]. Размещение интрузивных комплексов контролируется Норильско-Хараелахским разломом: Хараелахский и Талнахский интрузивы расположены в южной части Хараелахского прогиба и приурочены к поперечному сочленению Норильско-Хараелахского разлома с Пясинским куполовидным поднятием, в то время как Норильский интрузив располагается в северной части Норильского прогиба.

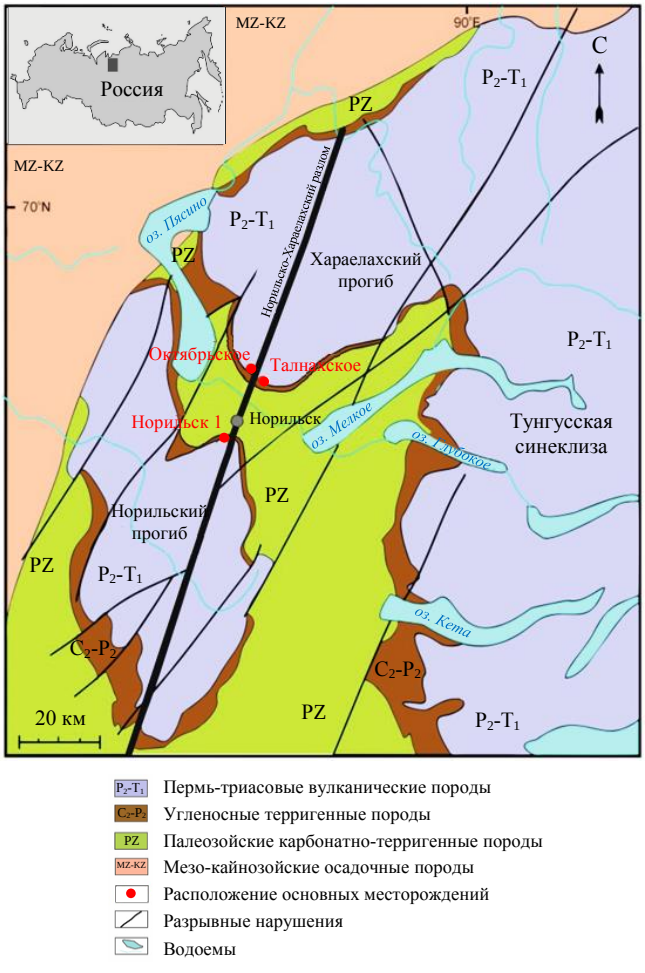


Рис.1. Геологическое строение Норильского рудного района [31, с изменениями], на вклейке показано положение Норильского рудного района на территории России

В настоящее время 96 % производимых на Норильском горно-металлургическом комбинате металлов извлекается из руд Талнахского интрузивного комплекса и лишь 4 % – из бедных руд Норильского интрузивного комплекса. На территории Норильского рудного района выделяются четыре типа рудоносных интрузий: норильский, зубовский, круглогорский и нижнеталнахский [32]. Интрузивные комплексы норильского типа полностью дифференцированных интрузий обеспечивают все промышленные месторождения меди и никеля в Норильском районе, а зубовский, круглогорский и нижнеталнахский типы сопровождают норильский, обладая меньшей степенью дифференциации и рудоносности, но большей распространенностью.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Интрузии норильского типа дифференцированы от габбро-долеритов нормального ряда до такситовых и пикритовых габбродолеритов с рудной вкрапленностью в нижней части интрузии и до лейкогаббро и габбродиоритов в верхней части. К нижней части дифференцированных интрузий норильского типа приурочены пластовые тела сплошных медно-никелевых сульфидных руд, располагающихся во вмещающих роговиках и в теле интрузива в виде линз и пластовых залежей. Также выделяются тела сложной морфологии, представленные сплошными, брекчиевидными и густовкрапленными так называемыми медистыми рудами [28, 30]. Главными сульфидными минералами рудных тел являются халькопирит, пирротин, пентландит, пирит [33, 34]. Из второстепенных минералов стоит отметить галенит, валлериит, миллерит, а также макинавит, аргентопентландит, борнит. Руды данного состава сложны и разнообразны при изучении морфометрических параметров в целях селективного извлечения, что особенно усложняется наличием в составе руд тонких зерен платиновых минералов.

В рамках настоящего исследования были проанализированы типичные образцы вкрапленных медно-никелевых и богатых медистых руд норильского типа Октябрьского месторождения Норильского рудного района (центральные и западные фланги Хараелахского интрузива соответственно).

Вкрапленные медно-никелевые руды центральных флангов Хараелахского интрузива (21 образец, 63 шлифа) дифференцированы, в основном, от пойкилоофитовых до такситовых и пикритовых габбро-долеритов со сплошной рудной вкрапленностью в нижней части интрузии. В верхних частях интрузивов наблюдается интерстициальная сульфидная вкрапленность в лейкогаббро; ниже – каплевидная, реже сидеронитовая вкрапленность в габбро-долеритах и пикритовых долеритах; в средней нижней части интрузивов – гнездовидная вкрапленность неправильной формы в такситовых габбро-долеритах; в придонных частях интрузивов – сплошная пентландит-талнахитовая руда на контакте с брекчированными роговиками.

Богатые медистые руды западных флангов Хараелахского интрузива (23 образца, 69 шлифов) дифференцированы в меньшей мере по сравнению центральными частями Хараелахского интрузива. С приближением к сплошной сульфидной руде рудные минералы образуют крупные аллотриоморфнозернистые выделения, принимающие форму интерстиций между кристаллами пироксена и лейстами плагиоклаза, отдельные выделения рудных минералов имеют каплевидную форму, начинают скапливаться и образуют гнезда. В краевых частях интрузива в описанном разрезе отсутствуют лейкократовые разности, а такситовые разности преобладают.

Методология. Образцы вкрапленных медно-никелевых и богатых медистых руд изучались с использованием оптико-микроскопических методов исследования с последующей обработкой изображений в программном обеспечении Thixomet Pro, а также методами компьютерной рентгеновской микротомографии.

Оптико-микроскопические исследования проводились с использованием оптического поляризационного микроскопа исследовательского класса Axio Imager A2m (Zeiss). Полученные изображения обрабатывались и анализировались затем с помощью программного обеспечения для анализа изображений Thixomet Pro, которое прошло метрологическое освидетельствование и аттестовано как средство измерения [35]. Для проведения исследований изготавливались ориентированные петрографические шлифы по взаимно перпендикулярным срезам по методике [13].

Далее создавались панорамы шлифов, производился автоматический захват зерен рудных минералов. Затем осуществлялся автоматизированный расчет в программе Thixomet Pro морфометрических параметров зерен, количественно отражающих структурно-текстурные особенности руд. Главные из этих параметров: площадь A, мкм^2; периметр P, мкм; диаметр (минимальный, максимальный, средний), мкм; длина L и ширина B, мкм (вычисляются при $P = 2(L + B)$, $A = LB$); фактор формы, д.ед. ($4\pi A/P^2$); сплошность, д.ед. (отношение реальной и выпуклой площади); вытянутость, д.ед. (L/B); неровность края/шероховатость, д.ед. (P/P_c, где P_c – выпуклый периметр); среднее расстояние между центрами зерен, мкм (реальная площадь/количество зерен).

Рентген-томографические исследования и визуализация внутренней трехмерной структуры ориентированных образцов проводились с использованием микротомографа SkyScan-1173 фирмы Bruker (Бельгия), оснащенного сертифицированными программами NRecon, DataViewer, CTAn

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

и CTVox. Для проведения съемки выпиливались цилиндры диаметром 2 см. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 130 кВ, сила тока 60 мА, разрешение 17 мкм, фильтр стеклянный 0,25 мм, шаг поворота 0,3 град.

Методика компьютерных рентген-томографических исследований детально описана в работах [36, 37]. Суть рентгеновского метода заключается в понижении мощности рентгеновского излучения при его прохождении сквозь конкретный объем образца за счет фотоэлектрического поглощения рентгеновских лучей. Поглощение фиксируется детектором с созданием теневых проекций – графических файлов, в которых каждый пиксель содержит информацию о величине поглощения в конкретной точке. Результатом такого сканирования является серия снимков в рентгеновском свете, которые затем преобразуются в трехмерные изображения для дальнейших визуальных исследований и морфометрического анализа [7, 32]. Значительная разность в плотности плагиоклаза (≈ 2,7 г/см^3), клинопироксена (3,1-3,5 г/см^3), рудных минералов (халькопирит ~4,2 г/см^3, пирротин 4,6-4,7 г/см^3, ильменит 4,8 г/см^3, магнетит до 5,2 г/см^3, марказит 4,85-4,9 г/см^3, титаномагнетит 4,8-5,3 г/см^3) и минералов платиновой группы (18-21 г/см^3) позволила получить реальную картину распределения наиболее плотных фаз в масштабе от нескольких сантиметров, вплоть до разрешения 15-20 мкм [16, 25].

Морфометрические параметры зерен, рассчитываемые методом компьютерной рентгеновской микротомографии: площадь объекта, мкм^2; периметр объекта, мкм; длина L, мкм (диаметр круга эквивалентной площади/максимальное расстояние между двумя точками объекта); ширина B, мкм (минимальное расстояние между двумя точками объекта); сферичность, д.ед. (отношение поверхности шара эквивалентного объема к поверхности); удельная поверхность (шероховатость), мм^2/мм^3 (отношение общей поверхности к объему); вытянутость, д.ед. (L/B); неровность края/шероховатость, д.ед. (P/P_c); закрытая пористость, % (доля области полностью замкнутого пространства); эффективная пористость, % (доля области не полностью замкнутого пространства); общая пористость, д.ед. (сумма закрытой и эффективной пористости).

Химический состав руд определен методом энергодисперсионного рентгенфлуоресцентного анализа, содержания ЭПГ (элементов платиновой группы: платины и палладия) оценивались масс-спектрометрическим методом с индуктивно связанной плазмой с помощью масс-спектрометра «ELAN DRC» фирмы «Perkin Elmer» в центральной химической лаборатории «ГМК «Норильский никель». Лабораторные испытания проводились на обогатительных установках Санкт-Петербургского горного университета и Фрайбергской горной академии, методика подробно описана в работе [38]. Все полученные данные обрабатывались в программе Statistica (STATISTICA 10.0, StatSoft, Tulsa, OK, USA).

Результаты и обсуждение. Морфометрические параметры рудных минералов в рудах норильского типа Талнахского интрузивного комплекса, рассчитанные с помощью обработки оптико-микроскопических изображений в программе Thixomet Pro и анализа данных компьютерной рентгеновской микротомографии, представлены в табл.1.

Из сравнительного анализа морфометрических данных табл.1 следует, что наиболее близко различными методами исследования определяются такие параметры как вытянутость, неровность края, в то время как результаты определения площади и периметра рудных минералов диагностированы неоднозначно. Так, для интерпретации данных в программе Thixomet Pro одним из главных ограничений является корректный захват данных, а именно сложность автоматизированного выделения отдельных зерен в составе полифазных сульфидных агрегатов, программа может выделить агрегаты и сростки зерен как единое зерно и рассчитать его общие морфометрические параметры. Аналогичная проблема может возникнуть и при обработке и интерпретации микротомографических данных, томограф максимально эффективно отличает рудные минералы с высокой рентгеновской плотностью (самородные элементы, сульфиды и оксиды металлов) от силикатной (оливины, пироксены, амфиболы, полевые шпаты, кварц и т.д.) или карбонатной матрицы, но плохо различает зерна минералов с близкой рентгеновской плотностью, например, сульфиды между собой, целиком выделяя агрегаты сульфидных зерен. Тем не менее, при сравнении результатов, полученных различными методами, можно отметить высокую сходимость и взаимодополняемость.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.76

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527-538
© А.М.Дурягина, И.В.Таловина, Х.Либервирт, Р.К.Илалова, 2022

Таблица 1

Сравнение морфометрических параметров рудных минералов

Параметр	Оптико-микроскопический метод Thixomet Pro		Компьютерная рентгеновская микротомография	
	1	2	1	2
Образцы/Измерения	21/6305	23/11100	21/21	23/23
Площадь, мм^2	0,18±0,08	0,06±0,03	0,28±0,23	0,10±0,06
Периметр, мм	3,93±0,06	0,25±0,10	7,05±0,15	0,48±0,04
Фактор формы / Сферичность, д.ед.	0,19±0,07	0,18±0,05	0,23±0,10	0,25±0,05
Сплошность, д.ед.	0,58±0,11	0,59±0,10	н.о.	н.о.
Вытянутость, д.ед.	33,2±5,7	33,7±8,1	28,2	32,1
Неровность края / Шероховатость, д.ед.	1,96±0,25	2,1±0,51	3,61±0,58	2,3±0,08
Среднее расстояние между центрами зерен, мкм	460,87	157,4	н.о.	н.о.
Закрытая пористость, %	н.о.	н.о.	0,61	0,82
Эффективная пористость, %	н.о.	н.о.	0,28	1,18
Общая пористость, %	н.о.	н.о.	0,89	2,0
Сферичность пор, д.ед.	н.о.	н.о.	0,82	0,70

Примечания. Приведены средние значения ± доверительный интервал при 95 % вероятности; 1 – вкрапленные медно-никелевые руды центральных флангов Хараелахского интрузива; 2 – богатые медистые руды западных флангов Хараелахского интрузива.

Рудные минералы вкрапленных медно-никелевых руд образуют отдельные довольно крупные гнездовидные скопления в биотитсодержащих метасоматически измененных габбро-долеритах (рис.2). Все зерна в них вытянуты в горизонтальной плоскости, имеют неправильную форму, извилистые контуры зерен границы и большое расстояние между зернами и агрегатами зерен. В мелкозернистых базальтах рудные минералы образуют вкрапленность с минимальным размером рудных зерен и максимальной вытянутостью. Зерна имеют неровные извилистые границы и расположены далеко друг от друга (табл.1).

Рудные минералы богатых медистых руд центральных флангов Хараелахского интрузива образуют тонкозернистую каплевидную сульфидную вкрапленность во вмещающих породах (рис.3). Количественные характеристики рудных минералов варьируют в меньшей мере в трех плоскостях по площади и периметру зерен (табл.1). При сравнении с вкрапленными рудами в первую очередь обращают на себя внимание гранулометрические различия рудных минералов: все зерна существенно меньше по размеру, имеют более извилистые границы, меньшее расстояние между зернами (агрегатами) и неправильную форму.

При оценке распределения морфологических параметров по типу пород было выявлено, что максимальными размерами рудных минералов в центральной части интрузива характеризуются такситовые габбро-долериты, а в краевых частях интрузива – оливиновое порфировидное такситовое габбро. Наиболее продуктивными (с повышенными содержаниями ЭПГ) в центральной

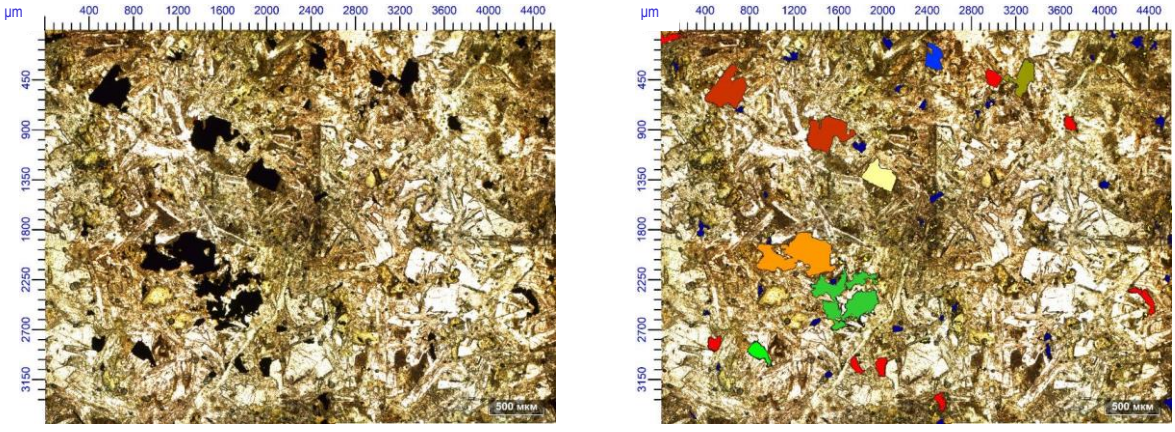


Рис.2. Вкрапленные медно-никелевые руды в габбро-долерите. Фотографии шлифа в проходящем свете, без анализатора (слева), пример автоматического захвата изображений рудных минералов в программе Thixomet Pro (справа)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.76
© А.М.Дурягина, И.В.Таловина, Х.Либервирт, Р.К.Илалова, 2022

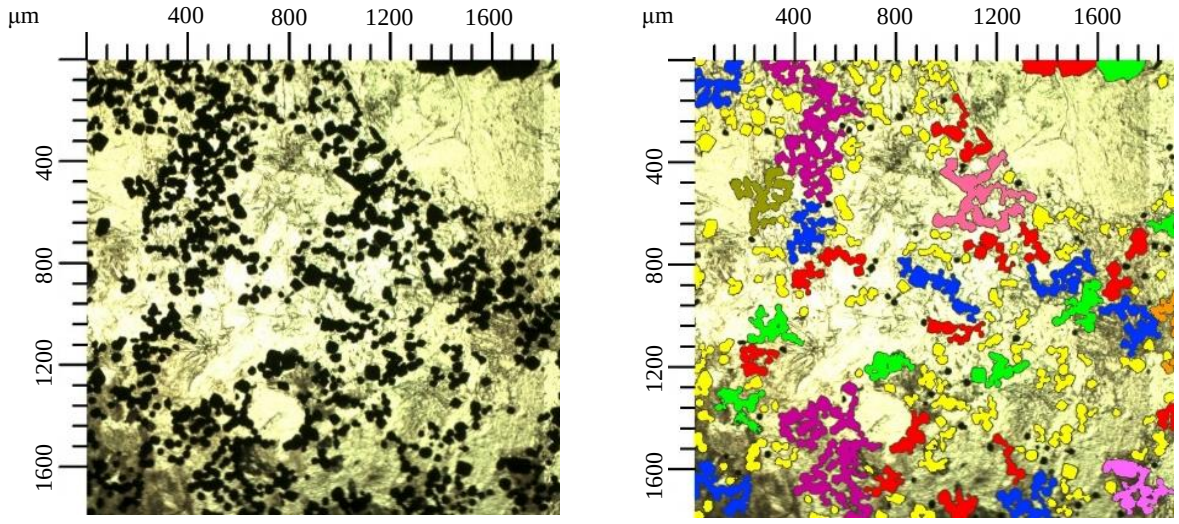


Рис.3. Богатые медистые руды в габбро-долерите. Фотографии шлифа в проходящем свете, без анализатора (слева), пример автоматического захвата изображений рудных минералов в программе Thixomet Pro (справа)

и в краевой частях интрузива являются такситовые габбро-долериты. В них отмечается повышение среднего расстояния между зернами оливина в краевых частях интрузива.

В центральной части Хараелахского интрузива на протяжении всего разреза рудные минералы вкрапленного типа руд имеют довольно изометричные формы во всех трех плоскостях, и только в одном интервале наблюдается резкий разброс параметров (площади, периметра, неровности края зерен, вытянутости) в трех плоскостях, а также увеличение площади и периметра зерен, причем преимущественно в горизонтальной плоскости (шлиф 3). Параметр сферичности в данном интервале, наоборот, уменьшается. Среди пород в данном интервале преобладают такситовые и пикритовые габбро-долериты с частыми автолитами лейкогаббро, не оруденелыми [32]. По данным проведенных химических анализов именно в этом интервале увеличиваются содержания платины и особенно палладия (рис.4).

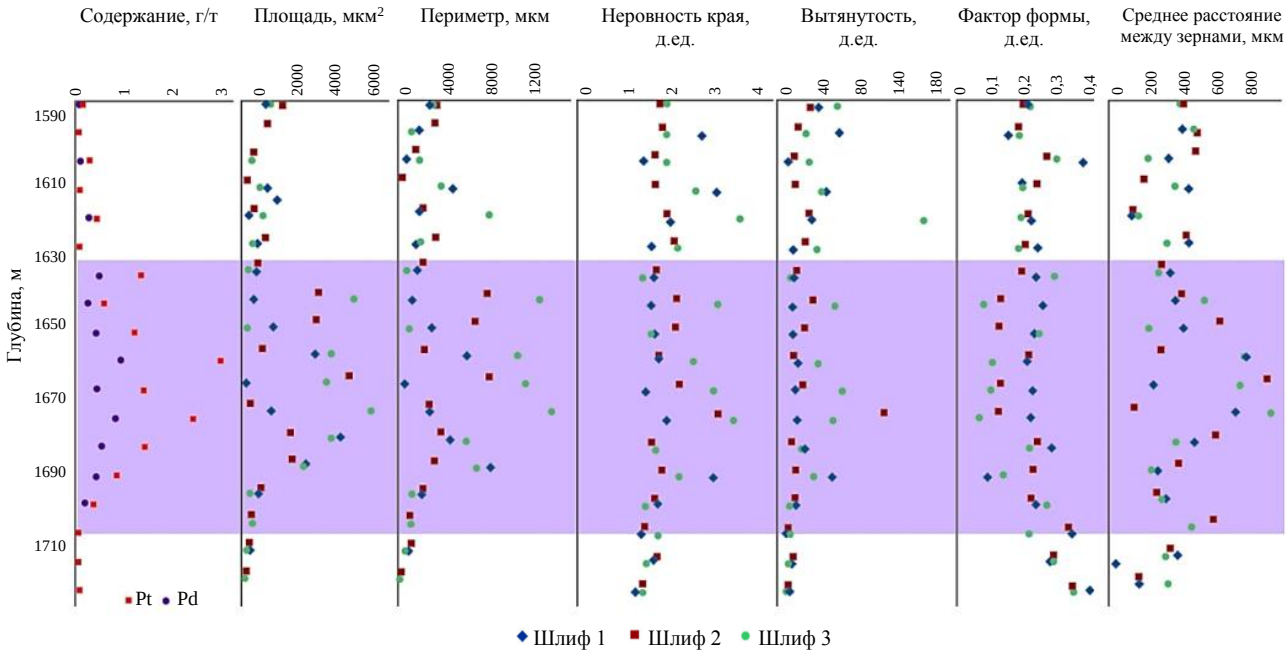


Рис.4. Распределение количественных параметров рудных минералов в трех плоскостях по глубине скважины в центральной части Хараелахского интрузива. Вкрапленные медно-никелевые руды. Цветом выделена зона с повышенными содержаниями ЭПГ

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

DOI: 10.31897/PMI.2022.76

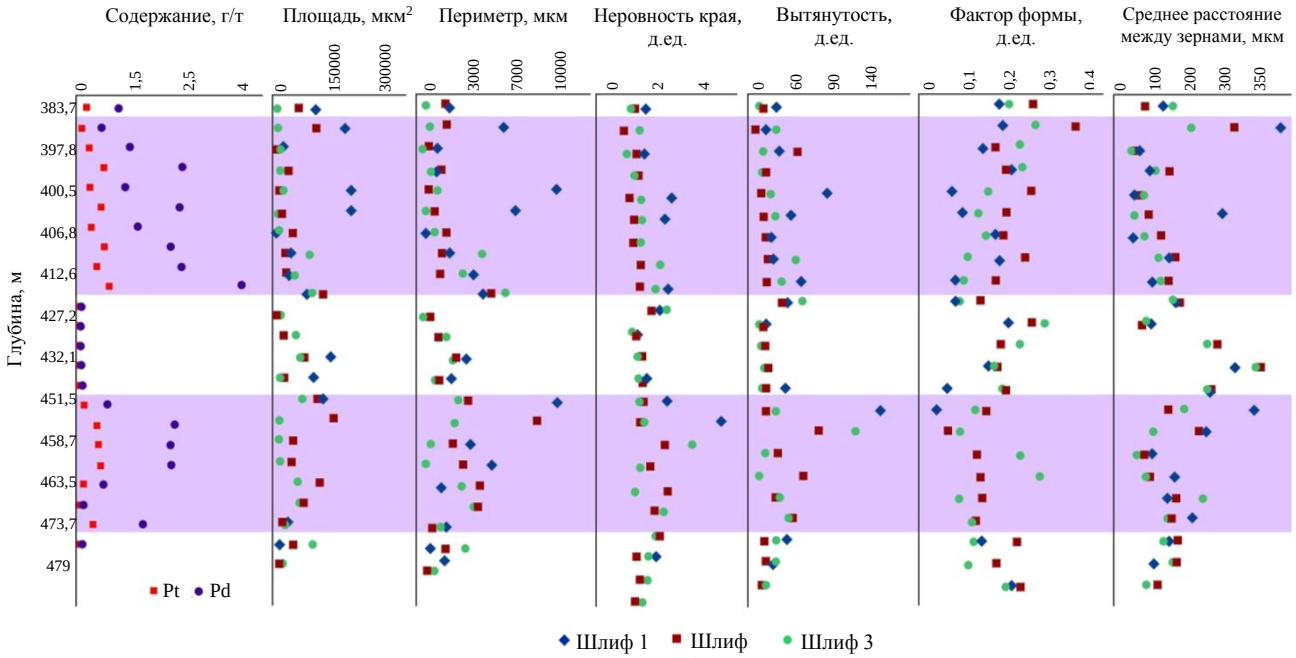


Рис.5. Распределение количественных параметров рудных минералов в трех плоскостях по глубине скважины в западных флангах Хараелахского интрузива. Богатые медистые руды. Цветом выделены зоны с повышенными содержаниями ЭПГ

Рудные минералы богатых медистых руд западных флангов Хараелахского интрузива характеризуются в целом меньшим разбросом морфометрических параметров, меньшими размерами рудных зерен и меньшим расстоянием между ними (рис.5). Однако в рудных интервалах очевиден резкий разброс практически всех параметров, за исключением среднего расстояния между центрами рудных зерен с повышенным параметром сферичности, что, вероятно, связано с наличием крупных агрегатов безрудного пирита.

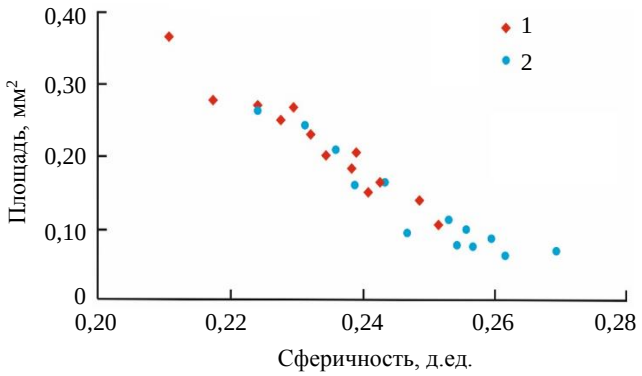


Рис.6. Зависимость сферичности рудных минералов от их площади по данным компьютерной рентгеновской микротомографии

1 – вкрапленные руды; 2 – богатые медистые руды

По данным компьютерной рентгеновской томографии и оптико-микроскопического изучения (Thixomet Pro) сферичность рудных минералов находится в обратной зависимости от их площади, что полностью соответствует результатам химических анализов и оптико-микроскопического изучения, которые показывают, что наиболее крупные агрегаты и сростки рудных минералов принадлежат ксеноморфным сложноветвящимся скелетным кристаллам пирита, не несущего, как правило, платиноидно-медно-никелевого оруденения (рис.6). Также стоит отметить, что крупные рудные зерна (или «слипшиеся» агрегаты более мелких зерен) согласно рис.6 имеют более сложную морфологию в отличие от мелких, более идиоморфных, индивидов.

В результате микротомографических исследований также были получены 3D изображения образцов, благодаря которым можно наблюдать не только размеры зерен и их агрегатов, но и распределение в общем объеме породы и взаимоотношения друг с другом, что особенно важно для изучения раскрытия сростков при дроблении и измельчении в процессе рудоподготовки (рис.7). Программное обеспечение позволяет моделировать общий объем породы, разделять силикатную матрицу от сульфидной и сульфидную от зерен благородных металлов. Так как при выделении

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527-538 DOI: 10.31897/PMI.2022.76
© А.М.Дурягина, И.В.Таловина, Х.Либервирт, Р.К.Илалова, 2022

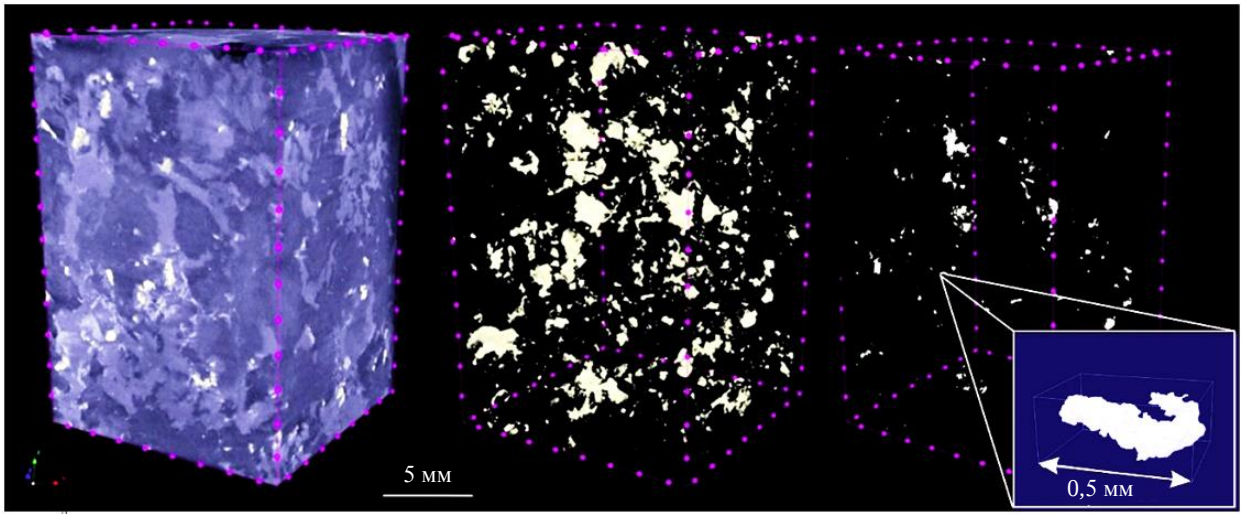


Рис.7. 3D-визуализация рентген-томографического изображения вкрапленных медно-никелевых руд (слева), распределения сульфидов в объеме породы (центр) и зерен минералов платиновой группы (справа)

рентгеноконтрастных фаз поры легко отличимы от минералов, методом рентгеновской компьютерной томографии также была определена и пористость руд, показывающая прочностные характеристики породы и влияющая на поведение пород при дезинтеграции, поскольку разрушение происходит по наиболее слабым зонам – трещинам, границам срастания отдельных минеральных фаз и т.д. [39, 40]. При анализе характеристик порового пространства образцов было выявлена достаточно низкая пористость, что свидетельствует о высокой прочности самих руд [41, 42].

Полученные результаты сопоставлялись с данными собственных лабораторных исследований физико-механических свойств руд и данными, полученными Т.Н.Александровой с соавторами [38] (табл.2, 3), которые показывают, что медно-никелевые руды относятся к типу твердых руд (как по параметру низкоэнергетического разрушения, так и по комплексному параметру высокоэнергетического разрушения *Ab*), но при этом являются мягким с точки зрения сопротивления разрушению при ударном дроблении и умеренно абразивными. Необходимо отметить, что богатые медистые руды обладают большей эффективной пористостью (см. табл.1) и при этом являются менее прочными на сжатие и разрыв как в сухих образцах, так и в водонасыщенных (табл.2), что связано, очевидно, с особенностями внутреннего строения как самих руд (размером, неровностью границ, распределением в пространстве породы), так и структурно-текстурными особенностями вмещающих пород (распространением такситовых текстур и т.д.).

Таблица 2

Физико-механические свойства исследованных вкрапленных и богатых руд

Параметр	1	2
Объемный вес, г/см^3	2,93-3,26	2,5-2,96
Прочность на сжатие, кг/см^2	990±89	450±58
Прочность на сжатие при водонасыщении, кг/см^2	750±76	215±35
Прочность на разрыв, кг/см^2	70±9	26±7
Модуль деформации по графикам статических испытаний, кг/см^3	500·10^3	430·10^3
Скорость продольных волн, м/с	6200	4600
Коэффициент Пуассона	0,27	0,23
Коэффициент анизотропии, ед.	1,0	0,9-1,1
Динамический модуль Юнга		
Для воздушно-сухих образцов, кг/см^3	н.о.	26±7
Для водонасыщенных образцов, кг/см^3	н.о.	26±7

Примечания. Модуль Юнга определен на основании измеренных значений скоростей и объемного веса; 1, 2 – см. примечания к табл.1.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 3

Физико-механические свойства сульфидных медно-никелевых руд по данным [38]

Параметр	Сульфидные медно-никелевые руды
Испытания падающим грузом JK DropWeight	
Параметр *A*	99,90±4,95
Параметр *b*	0,30±0,0015
Ab	30,00±0,64
Абразивный параметр *ta*	0,30±0,06
Параметр SCSE, кВт·ч/т	11,90±0,21
Определение индекса Бонда	
Рабочий индекс измельчения в шаровой мельнице, кВт·ч/т	11,96±0,54
Рабочий индекс дробления, кВт·ч/т	21,82±1,09
Тест на абразивный износ Allis Chalmers	
Индекс абразивности Al, г	0,1653±0,008
Насыпная плотность (с утрамбовкой), т/м^3	2,01±0,09

Полученные данные согласуются и с результатами лабораторных испытаний [38, 43]. Так, при дроблении указанных руд в различных типах дробилок (щековых, валковых и роторных) было выявлено, что основные рудные компоненты (преимущественно медь и никель) концентрируются и в мелких классах сит с одновременным увеличением содержания кремнезема и кальция в крупных ситах (табл.4). Все эти исследования позволяют обосновать возможность селективной дезинтеграции для медно-никелевых руд различных типов как с точки зрения минералогических и технических характеристик, так и с точки зрения экспериментальных исследований с использованием различных типов дробильных установок.

Таблица 4

Распределение меди, никеля, кремния и кальция в классах крупности в различных типах дробилок [38]

Класс крупности, мм	Щековая дробилка	Валковая дробилка	Роторная дробилка	Щековая дробилка	Валковая дробилка	Роторная дробилка
	Медь, %			Никель, %		
–4+3,2	43,42	25,28	31,64	59,47	24,91	34,49
–3,2+1,6	13,69	24,98	14,05	11,06	27,70	13,34
–1,6+0,8	10,57	11,75	13,11	9,62	12,06	16,02
–0,8+0,4	8,77	9,11	9,63	5,13	10,01	10,35
–0,4+0,2	6,50	8,50	11,55	4,43	7,28	9,62
–0,2+0,1	7,06	7,08	11,32	3,49	6,06	9,43
–0,1+0	8,99	13,28	8,70	6,80	11,98	6,75
	Кремний, %			Кальций, %		
–4+3,2	71,86	37,53	61,54	71,06	34,94	67,70
–3,2+1,6	11,66	33,29	13,01	12,03	35,71	10,98
–1,6+0,8	6,90	13,10	9,13	7,20	13,91	8,00
–0,8+0,4	3,35	6,09	5,36	3,33	6,30	4,34
–0,4+0,2	2,48	4,19	4,68	2,56	4,19	3,96
–0,2+0,1	1,66	3,08	3,83	1,70	3,12	3,10
–0,1+0	2,09	2,72	2,45	2,12	1,83	1,92

Выводы. В результате проведенных оптико-микроскопических и рентген-микротомографических исследований были идентифицированы количественные характеристики морфологических параметров типичных образцов вкрапленных и богатых медистых руд норильского типа в пределах Октябрьского месторождения Норильского рудного района. Среди количественных параметров, измеренных с помощью программного обеспечения Thixomet Pro, наиболее информативными для вкрапленных руд оказались площадь зерен, периметр, неровность края, сферичность, вытянутость и среднее расстояние между зернами, а для богатых медистых руд площадь зерен, периметр, неровность края и вытянутость зерен.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В результате проведенных исследований было выявлено, что интрузии норильского типа характеризуются увеличением собственно значений и дисперсности в рудных зонах таких параметров, как площадь и периметр зерен, а также среднее расстояние между ними. Данная закономерность прослеживается как для вкрапленных, так и для богатых медистых руд. Таким образом, по совокупности максимумов и сильной изменчивости морфологических параметров в трех плоскостях можно прогнозировать рудные интервалы. Однако при выделении рудных зон необходимо обращать особое внимание на появление в интервалах лейкогаббро, так как эти породы имеют крупные сульфидные обособления (преимущественно пирита), оказываются зачастую нерудоносными и могут нарушать выявленные закономерности.

Отмечено, что в рудных зонах площадь рудных минералов возрастает минимум в 2-3 раза, что особенно важно для краевых флангов Хараелахского интрузива, где рудные минералы имеют размеры на порядок меньше аналогичных дифференциатов в центральной части и диагностируются оптическими методами с трудом.

Количественный анализ рудных минералов в программе Thixomet PRO и с помощью компьютерного рентгеновского томографа осуществляется довольно быстро, в связи с чем их легко можно применять в качестве предварительных экспресс-методов изучения вещества. Также методом компьютерной рентгеновской микротомографии проведена 3D-визуализация внутреннего строения образцов с сульфидной минерализацией, благодаря которому можно наблюдать не только количественные параметры зерен и их агрегатов, но и их распределение в общем объеме породы и взаимоотношения друг с другом. Стоит отметить и несомненное преимущество метода компьютерной томографии, заключающееся в возможности получения не только количественных характеристик минеральных фаз, но и порового пространства породы, влияющего на прочностные характеристики горных пород и руд.

В заключение стоит отметить, что возможность получения статистических параметров разброса значений различных морфометрических характеристик, их пространственного распределения является несомненным преимуществом обоих использованных методов, так как на основе большого объема полученных данных с помощью математико-статистического моделирования (корреляционный, факторный анализы и т.д.) возможно в дальнейшем прогнозировать зависимости между полученными морфометрическими параметрами руд и свойствами продуктов обогащения или характеристиками системы, такими как износ или потребление энергии, что позволит вплотную подойти к решению вопросов селективной дезинтеграции норильских руд.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Litvinenko V.S.* Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. P. 1521-1541. DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

2. *Matveeva V.A., Alekseenko A.V., Karthe D., Puzanov A.V.* Manganese Pollution in Mining-Influenced Rivers and Lakes: Current State and Forecast under Climate Change in the Russian Arctic // Water. 2022. Vol. 14. Iss. 7. № 1091. DOI: 10.3390/w14071091

3. *Пронин Е.М., Васильев В.Е., Цветков В.Ю.* Факторы, определяющие устойчивое развитие предприятий минерально-сырьевого комплекса и их влияние на оценку результатов деятельности предприятий // Записки Горного института. 2011. Т. 191. С. 176-182.

4. *Makhovikov A.B., Katuntsov E.V., Kosarev O.V., Tsvetkov P.S.* Digital transformation in oil and gas extraction: Challenges and prospects. In Innovation-based development of the mineral resources sector. London: CRC Press, 2019. 614 p.

5. *Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V. et al*. Element Accumulation Patterns of Native Plant Species under the Natural Geochemical Stress // Plants. 2021. Vol. 10. Iss. 1. № 33. DOI: 10.3390/plants10010033

6. *Воронцова Н.И., Таловина И.В., Лазаренков В.Г. и др*. Изотопное соотношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в породах и рудах Сахаринского и Уфалейского гипергенных никелевых месторождений, Урал // Записки Горного института. 2013. Т. 200. С. 179-185.

7. *Ilalova R.K., Gulbin Y.L.* Thermometry of Nickel Bearing Chlorites from the Kolskii Massif (Northern Urals) // Geology Ore Deposits. 2019. Vol. 61. P. 736-746. DOI: 10.1134/S107570151908004X

8. *Hesse M., Popov O., Lieberwirth H.* Increasing efficiency by selective comminution // Minerals Engineering. 2017. Vol. 103-104. P. 112-126. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.003

9. *Арсентьев В.А., Герасимов А.М., Дмитриев С.В., Самуков А.Д.* Исследование изменения физико-механических свойств каменного угля в процессе термического модифицирования // Обогащение руд. 2016. № 3. С. 3-8. DOI: 10.17580/or.2016.03.01

10. *Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е.* Изменение структуры горных пород при цикличном замораживании и оттаивании // Обогащение руд. 2015. № 2. С. 28-31. DOI: 10.17580/or.2015.02.06

11. *Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Литвинова Н.М.* К вопросу оптимизации процесса измельчения руд // Обогащение руд. 2006. № 4. С. 5-7.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

12. *Benndorf J., Buxton M.* A Special Issue on Geomathematics for Real-Time Mining // Mathematical Geoscience. 2019. Vol. 51. P. 845-847. DOI: 10.1007/s11004-019-09828-2

13. *Popov O., Lieberwirth H., Folgner T.* Quantitative Charakterisierung der Festgesteine zur Prognostizierung des Gesteinseinflusses auf relevante Produkteigenschaften und Systemkenngrößen. Teil 1: Anwendung der quantitativen Gefügeanalyse // AT Mineral Processing. 2014. Vol. 55. P. 76-88.

14. *Popov O., Lieberwirth H., Folgner T.* Quantitative Charakterisierung der Festgesteine zur Prognostizierung des Gesteinseinflusses auf relevante Produkteigenschaften und Systemkenngrößen. Teil 2: Ausgewählte Beispiele // AT Mineral Processing. 2014. Vol. 55. P. 54-63.

15. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СПб: Наука, 1997. 532 с.

16. *Raaz V.* Charakterisierung der Gesteinsfestigkeit mit Hilfe eines modifizierten Punktlastversuches // Zeitschrift für Geologische Wissenschaften. 2002. Vol. 30. № 3. P. 213-226.

17. *Melnik A.E., Skublov S.G., Rubatto D. et al.* Garnet and zircon geochronology of the Paleoproterozoic Kuru-Vaara eclogites, northern Belomorian Province, Fennoscandian Shield // Precambrian Research. 2021. Vol. 353. № 106014. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.106014

18. *Klichowicz M., Frühwirt T., Lieberwirth H.* New experimental setup for the validation of DEM simulation of brittle crack propagation at grain size level // Minerals Engineering. 2018. Vol. 128. P. 312-323. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.033

19. *Александрова Т.Н., Николаева Н.В., Львов В.В., Ромашев А.О.* Повышение эффективности переработки руд благородных металлов на основе моделирования технологических процессов // Обогащение руд. 2019. № 2. С. 8-13. DOI: 10.17580/or.2019.02.02

20. *Вайсберг Л.А., Каменева Е.Е., Пименов Ю.Г., Соколов Д.И.* Исследование структуры порового пространства гранитогнейса методом рентгеновской томографии // Обогащение руд. 2013. № 3. С. 37-40.

21. *Popov O., Talovina I., Lieberwirth H., Duryagina A.* Quantitative microstructural analysis and x-ray computed tomography of ores and rocks – Comparison of results // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 2. № 129. DOI: 10.3390/min10020129

22. *Duryagina A., Heide G., Talovina I., Bravo A.* Mineralogical and morphometric aspects of the rock analysis as the basis for choosing a scheme for ore preparation // VIII International Scientific Conference «Problems of Complex Development of Georesources», 8-10 September 2020, Khabarovsk, Russian Federation. E3S Web of Conferences, 2020. Vol. 192. № 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/202019202023

23. *Duryagina A.M., Talovina I., Shtyrlyaeva A., Popov O.* Application of Computer X-Ray Microtomography for Study of Technological Properties of Rocks // Key Engineering Materials. 2018. Vol. 769. P. 220-226. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.220

24. *Штырляева А.А., Журавлев А.В., Герасимова А.И.* Перспективы и проблемы использования компьютерной микротомографии для изучения образцов керна // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2016. Т. 11. № 1. 12 с. DOI: 10.17353/2070-5379/8_2016

25. *Генкин А.Д., Дистлер В.В., Гладышев Г.Д.* Сульфидные медно-никелевые руды Норильских месторождений. М.: Наука, 1981. 234 с.

26. *Дистлер В.В.* Платиновая минерализация Норильских месторождений // Геология и генезис месторождений платиновых металлов. М.: Наука, 1994. С. 7-35.

27. *Eckstrand O.R., Hulbert L.J.* Magmatic Nickel-copper-platinum Group Elements Deposits // Mineral deposits of canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods: geological association of Canada, mineral deposits division, Special Publication. Ottawa, Ontario: Geological Survey of Canada, 2007. Vol. 5. P. 205-222.

28. *Naldrett A.J.* Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration. Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2013. 728 p. DOI: 10.1007/978-3-662-08444-1

29. *Sittner J., Brovchenko V., Siddique A. et al.* Three-Dimensional Distribution of Platinum Group Minerals in Natural MSS-ISS Ores From the Norilsk One Deposit, Russia // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. № 860751. DOI: 10.3389/feart.2022.860751

30. *Tolstykh N., Krivolutskaya N., Safonova I. et al.* Unique Cu-rich sulphide ores of the Southern-2 orebody in the Talnakh Intrusion, Noril'sk area (Russia): Geochemistry, mineralogy and conditions of crystallization // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 122. № 103525. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103525

31. *Chayka I., Zhitova L., Antsiferova T. et al.* In-Situ Crystallization and Continuous Modification of Chromian Spinel in the «Sulfide-Poor Platinum-Group Metal Ores» of the Norilsk-1 Intrusion (Northern Siberia, Russia) // Minerals. 2020. Vol. 10. № 498. DOI: 10.3390/min10060498

32. *Радько В.А.* Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с.

33. *Barnes S.J., Le Vaillant M., Godel B., Lesher C.M.* Droplets and Bubbles: Solidification of Sulphide-rich Vapour-saturated Orthocumulates in the Norilsk-Talnakh Ni–Cu–PGE Ore-bearing Intrusions // Journal of Petrology. 2019. Vol. 60. Iss. 2. P. 269-300. DOI: 10.1093/petrology/egy114

34. *Barnes S.J., Mungall J.E., Le Vaillant M. et al.* Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Disseminated and net-textured ores // American Mineralogist. 2017. Vol. 102. № 3. P. 473-506. DOI: 10.2138/am-2017-5754

35. *Kazakov A.A., Kiselev D.* Industrial Application of Thixomet Image Analyzer for Quantitative Description of Steel and Alloys // Metallography, Microstructure, and Analisis. 2016. Vol. 5. Iss. 4. P. 294-301. DOI: 10.1007/s13632-016-0289-6

36. *Evans C.L.* Quantifying mineral grain size distributions for process modelling using X-ray micro-tomography // Minerals Engineering. 2015. Vol. 82. P. 78-83. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.026

37. *Willson C.W., Lu N., Likos W.J.* Quantification of grain, pore and fluid microstructure of unsaturated sand from X-Ray CT images // Geotechnical Testing Journal. 2012. Vol. 35. № 6. № PA 19428-2959. DOI: 10.1520/GTJ20120075

38. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. № 851. DOI: 10.3390/min11080851

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

39. *Александрова Т.Н., О'Коннор С.* Переработка платинометалльных руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462-473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9

40. *Gupta A., Yan D.S.* Mineral Processing Design and Operations: An Introduction. Amsterdam: Elsevier, 2016. 882 p. DOI: 10.1016/C2014-0-01236-1

41. *Золотухина Л.В., Носова О.В., Нарбекова Т.Н.* Поведение благородных металлов при обогащении норильских руд // Научный вестник Норильского индустриального института. 2014. Т. 14. С. 42-52.

42. *Литвинова Н.М., Мельникова Т.Н., Ятлукова Н.Г., Данилов Е.И.* Интенсификация процесса измельчения труднообогатимой золотосодержащей руды Албазинского месторождения // Горный журнал. 2006. № 11. С. 63-64.

43. *Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А.* Исследование влияния ионов жесткости воды на флотируемость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-1. С. 263278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263

***Авторы*: А.М.Дурягина,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, duryagina_am@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-9417-7549* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **И.В.Таловина,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, https://orcid.org/0000-0003-4132-7010* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **Х.Либервирт,** *д-р наук, директор Института обогащения, https://orcid.org/0000-0002-5207-4138* (*Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия*), **Р.К.Илалова,** *канд. геол.-минерал. наук, доцент, https://orcid.org/0000-0003-2241-3239* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0