

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 549.08:550.835.8

### ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

© 2020 г. Е. Г. Ожогина<sup>1,2,\*</sup>, О. Б. Котова<sup>3,\*\*</sup>, О. А. Якушина<sup>1,4,\*\*\*</sup>, В. Е. Жукова<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ФГБУ “ВИМС”), Старомонетный пер., 31, Москва, 119017 Россия*

<sup>2</sup> *ИПКОН РАН, Крюковский туп., 4, Москва, 111200 Россия*

<sup>3</sup> *Институт геологии им. Н.П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, Сыктывкар, 167952 Россия*

<sup>4</sup> *ГБОУ ВО МО Университет “Дубна”, ул. Университетская, 19, Дубна, 141980 Россия*

\*e-mail: vims-ozhogina@mail.ru

\*\*e-mail: kotova@geo.komisc.ru

\*\*\*e-mail: yak\_oa@mail.ru

\*\*\*\*e-mail: vera\_fram@mail.ru

Поступила в редакцию 14.10.2019 г.

После доработки 18.10.2019 г.

Принята к публикации 18.10.2019 г.

Горнопромышленный комплекс оказывает существенную экологическую нагрузку на окружающую среду. Объемы накопленных горнопромышленных отходов переработки минерального сырья ставят на повестку дня необходимость вовлечения их во вторичную переработку на основе принципиально новых технологий, комплексных, экологически дружественных и экономически целесообразных. Техногенное минеральное сырье, сформированное отходами горнопромышленных производств, имеет определенные, именно ему присущие, особенности минерального и/или фазового состава, характера распределения полезных компонентов, реальный состав и строение, которые определяют выбор направлений его вторичного использования и технологий переработки. В задачи изучения минерального вещества с позиции технологической минералогии входят определение морфоструктурных характеристик, гранулярного состава, особенностей взаимоотношения минералов; минерального состава, включая количественное определение содержания минералов (минеральных фаз), в том числе выявление и идентификация форм нахождения полезных и вредных минералов и их ассоциаций, количественная оценка реального состава и строения минералов, минеральных агрегатов; физических и физико-химических (технологических) свойств минералов. Глубокое изучение вещественного состава, формы нахождения полезных и вредных компонентов, реального химического состава и структуры конкретных минералов, учет явлений изоморфных замещений, политипии, полиморфизма имеет определяющее значение для создания рациональной, экономически целесообразной, инвестиционно привлекательной технологии переработки природного и техногенного минерального сырья.

**Ключевые слова:** *горнопромышленные отходы, вторичное использование, технологическая минералогия, материаловедение, лабораторные методы, минеральный состав*

**DOI:** 10.31857/S0869780920010166

#### ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие отечественного минерально-сырьевого комплекса неизбежно приводит к накоплению значительного количества отходов, которые негативно влияют на окружающую среду. Поэтому переработка и утилизация отходов имеет государственное значение и рассматривается в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – “рациональное природопользование”. Сегодня можно констатировать факт, что переработка отходов является самосто-

ятельной крупной задачей для нашей промышленности.

Отходы добычи и переработки руд и горных пород весьма разнообразны [1, 2, 4, 7]. Это вскрышные, вмещающие породы, отходы сухой переработки сырья, забалансовые и некондиционные руды, которые по своему составу и свойствам не только близки к природным аналогам, но обычно используются в тех же направлениях. Отходы переработки металлургических, химических, теплоэнергетических производств более многообразны. Шлаки, шламы, золошлаки,

нефтешламы, горелые породы, пиритные огарки, клинкеры, пыли в значительной степени отличаются от природных руд и горных пород.

Вопросами утилизации и вторичной переработки отходов занимаются многочисленные организации различной ведомственной принадлежности. В зависимости от решаемых задач и объектов исследования реализуются различные технологии их изучения, и соответственно принимаются решения по их использованию в народном хозяйстве [2, 5–7].

Горнопромышленные отходы, являющиеся техногенным сырьем, практически всегда отличаются от природных сырьевых объектов. Им присущи переменный гранулярный состав, нередко высокая дисперсность, наличие аморфных образований, сложные взаимоотношения минеральных и (или) техногенных фаз, незначительное количество одного или нескольких полезных минералов, полиминеральные (полифазные) агрегаты, присутствие минералов изоморфных рядов и политипных модификаций, вторичные изменения, связанные в основном с процессами гипогенеза [3].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Минералогическое изучение горнопромышленных отходов базируется на современном научном, методическом, техническом и инструментально-аппаратурном обеспечении исследований техногенного сырья, и позволяет прогнозировать возможность вовлечения его во вторичную переработку, включая ликвидацию экологических последствий промышленной переработки. Необходимая и достаточная минералогическая информация может быть получена комплексом физических методов (оптическая и электронная микроскопия, рентгенографический, рентгеномографический, микрорентгеноспектральный, термический анализ, инфракрасная и мессбауэровская спектроскопия). Для разных видов отходов используется индивидуальный комплекс методов минералогического анализа, позволяющий получать полную и достоверную информацию, включающую сведения о фазовом составе техногенных образований, в том числе форме нахождения полезных элементов, гранулярном составе, морфометрических параметрах, характере локализации конкретных фаз [3].

Минералогический анализ отходов добычи осуществляется преимущественно согласно методическим документам Научного совета по минералогическим методам исследования, разработанным для анализа природного минерального сырья. Специальных методик минералогического анализа отходов переработки полезных ископаемых не существует. Исследование таких объ-

ектов носит междисциплинарный характер, обусловленный разумным сочетанием методов анализа, заимствованных из различных областей знаний и адаптированных к решению минералого-технологических и минералого-экологических задач.

Объектами исследования являлись лежалые хвосты железорудных фабрик, исследование которых выполнено комплексом физических методов, включающим оптическую микроскопию, рентгенографический, рентгеномографический, электронно-микроскопический и микрорентгеноспектральный анализы. В соответствии с требованиями к аккредитованным лабораториям минералогические анализы проводились согласно отраслевым методическим документам Научного совета по минералогическим методам исследования (НСОММИ) на поверенном оборудовании.

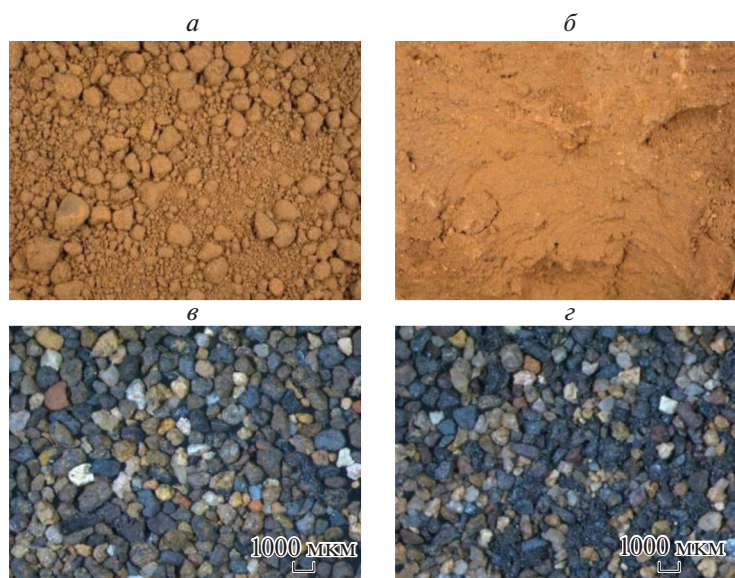
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Лежалые хвосты железорудной фабрики* представлены отложениями пляжной зоны (рыхлый песчано-глинистый материал) и пруда-отстойника (плотные илистые образования) (рис. 1 а, б).

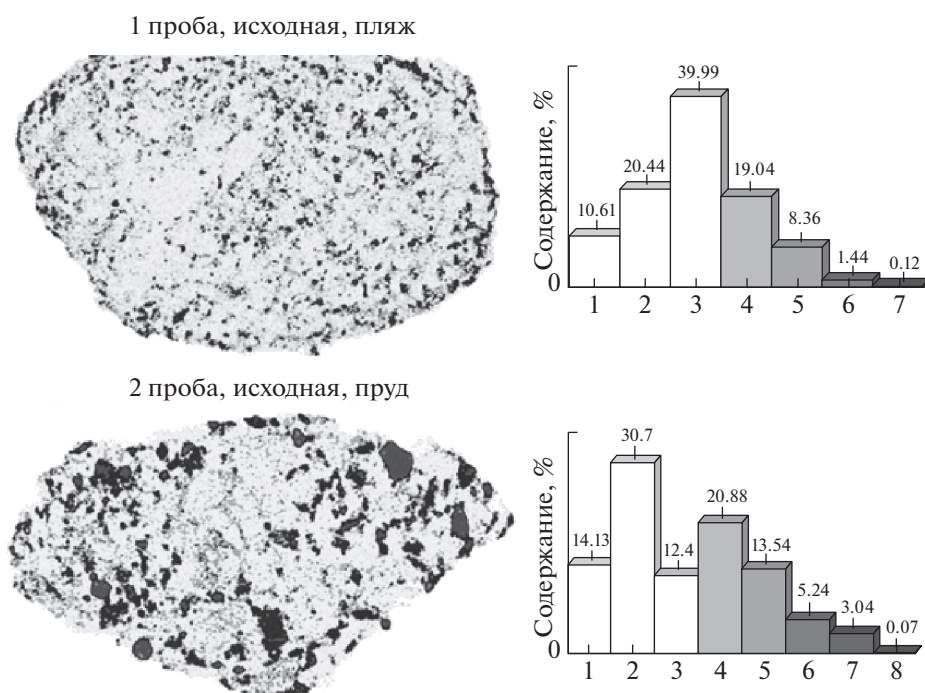
Главным полезным элементом является железо Fe (27.7–30.4%) Породообразующие компоненты представлены  $\text{SiO}_2$  (39.5–41%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5.99–9%) и  $\text{MgO}$  (0.28–0.59%). В хвостах четко выделяются рудная и количественно преобладающая нерудная составляющие. В отмытых пробах явно доминируют рудные минералы и агрегаты (рис. 1 в, г).

Взаимоотношения рудообразующих фаз в полиминеральных агрегатах четко прослеживаются на томограммах (рис. 2. 1, 2): преобладают порообразующие минералы, образуя матрицу, в которой неравномерно распределены рудные минералы, что характерно для техногенных отходов данной категории. Подобное распределение рудных и порообразующих фаз в значительной степени будет влиять как на методы рудоподготовки, так и на технологию обогащения. Главными рудными минералами являются магнетит 10–13% и гетит 8–13%, к категории вторичных минералов относится гематит 7%. Породообразующие минералы: кварц 30–32%, полевой шпат 4%, слоистые алюмосиликаты 35%. Отмечаются пирит, халькопирит, гранат, пироксен, эпидот, рутил, кальцит. Лежалые хвосты можно отнести к гематит-магнетит-гетитовому и гематит-гетит-магнетитовому минеральным типам.

*Магнетит* – главный рудный минерал, содержание которого в магнитных фракциях достигает 80%. Преимущественно зерна минерала сохраняют кристаллографическую огранку, но встречаются также фрагменты кристаллов и окатанные



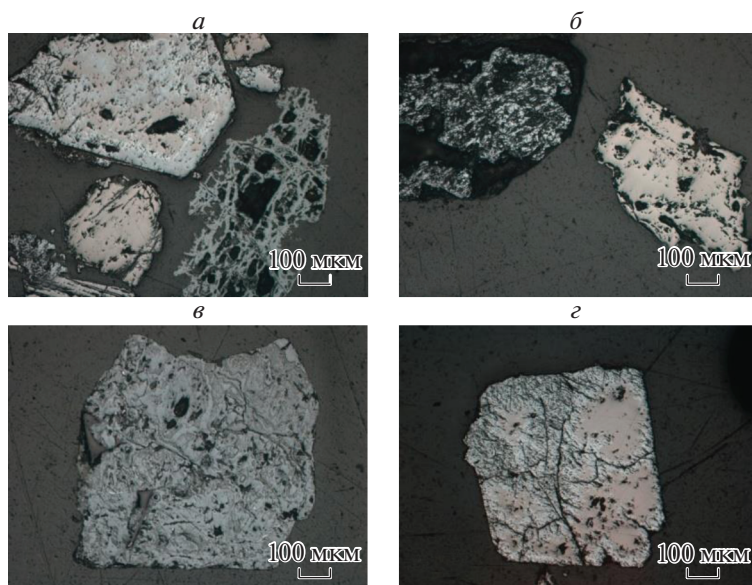
**Рис. 1.** Лежалые хвосты железорудной фабрики. Общий вид исходной пробы: *а* – зона пляжа; *б* – зона пруда. Общий вид проб после отмучивания, класс крупности –1 + 0.5 мм: *в* – пляж; *г* – пруд.



**Рис. 2.** Лежалые хвосты обогащения, исходная проба, размер обломков 1 × 1.5 см. 1 – зона пляжа, 2 – пруд,  $\mu$ РТ, слева направо: томограмма; сегментация по TomAnalysis, гистограмма выделенных фаз, в %: 1 – слоистые алюмосиликаты, 2 – кварц, 3 – полевые шпаты и карбонаты, 4 – гидроксиды железа (гетит), 5 – гематит, 6 – магнетит-2, 7, 8 – магнетит-1.

зерна. Электронно-микроскопическими исследованиями установлены срастания октаэдрических кристаллов магнетита, поверхность которых обычно отличается высокой микропористостью и микротрещиноватостью, связанными с гиперген-

ными процессами. Интенсивное воздействие природных факторов на лежалые хвосты в целом и магнетит в частности привело к образованию вторичных гроздевидных выделений, обнаруженных на кристаллах магнетита. Рентгеноспек-



**Рис. 3.** Строение зерен магнетита: *а* – стадии изменения зерен магнетита, *б* – магнетит, неизменный и почти полностью замещенный гематитом, *в* – зерно магнетита, полностью замещенное гетитом и гидрогетитом, *г* – зерно магнетита с каймами и прожилками гематита; отраженный свет, николи параллельны.

тральным микроанализом установлено, что они отличаются более высокими содержаниями марганца, титана, кремния, алюминия, фосфора.

Магнетит неравномерно гематитизирован (мартитизирован). Гематит развивается по магнетиту в виде пятен и кайм. Магнетит достаточно часто полностью замещен гематитом, гетитом и гидрогетитом с сохранением формы зерен (рис. 3, *а, б, в, г*).

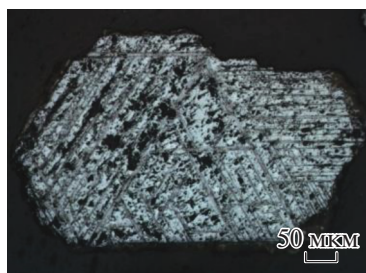
Неоднородность магнетита связана не только с мартитизацией, но и с широко развитыми в нем сетчатыми и решетчатыми структурами распада. Структуры распада свойственны магнетиту, обогащенному титаном (рис. 4, *а*).

По данным электронной-микроскопии установлено, что в магнетите блочного микростроения структуры распада нередко ориентированы субпараллельно плоскостям микроблоков (рис. 5). Неоднородное строение магнетита в целом нега-

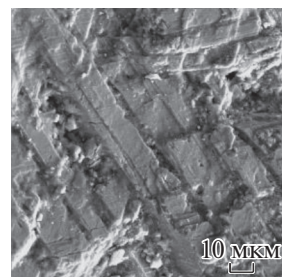
тивно влияет на его магнитные и плотностные характеристики.

**Гематит** встречается в тесной ассоциации с магнетитом, образует частичные и полные псевдоморфозы по нему. Сложный характер срастания гематита и магнетита позволяет рассматривать их в качестве единого полиминерального рудного агрегата, который невозможно селективно разделить на конкретные минеральные фазы. Уверенно можно говорить о негативном влиянии гематитизации на процессы селективного выделения магнетита. Содержание свободных зерен гематита весьма незначительно, поэтому вопрос выделения гематита в самостоятельный продукт не представляет практической значимости и не рассматривается.

**Гетит и гидрогетит** при рудоподготовке и дальнейших обогащательных операциях будут пе-



**Рис. 4.** Структуры распада в магнетите; отраженный свет; николи параллельны.



**Рис. 5.** Структуры распада, ориентированные субпараллельно плоскостям микроблоков магнетита, РЭМ.

реизмельчаться и концентрироваться в хвостах, что обусловлено их морфоструктурными характеристиками и тесной ассоциацией, с одной стороны, с главными рудными минералами, а с другой – со слоистыми алюмосиликатами.

**Кварц** – главный породообразующий минерал, в немагнитных фракциях его содержится до 80%. Более 50% кварца концентрируется в легких фракциях.

### ВЫВОДЫ

Исследование минерального состава и текстурно-структурных характеристик лежалых хвостов железорудной фабрики и установленные особенности их состава и строения позволяют сделать выводы о характерных признаках минералов, определяющих технологические свойства сырья. Гематитизация, микроблочность, микротрещиноватость и микропористость магнетита, наличие структур распада, а также присутствие изоморфных примесей в минерале приводит к снижению его плотностных и магнитных свойств. Микроблочное строение магнетита может способствовать повышению коэрцитивной силы и флуокуляции мелких зерен минерала. Основываясь на результатах изучения гранулярного состава хвостов, характера раскрытия сростков рудных минералов и их распределении по классам крупности, а также поведении лежалых хвостов в процессах дезинтеграции с последующей магнитной сепарацией, предлагается использовать для вторичной переработки лежалых хвостов методы гравитационного и магнитного обогащения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kotova O.V., Ozhogina E.G. Applied Mineralogy of Mining Industrial Wastes. // Proc. 14<sup>th</sup> Int. Congress for Applied Mineralogy. 23–27 September 2019, Belgorod, Russia / S. Glagolev (Ed.)]. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences, 2019. P. 103–106. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0>
2. Ozhogina E.G., Kotova O.V. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment // Proc. 29<sup>th</sup> Int. Mineral Processing Congress – IMPC 2018. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. P. 32–40.
3. Ожогина Е.Г., Шадрунова И.В., Чекушина Т.В. Роль минералогических исследований в решении экологических проблем горнопромышленных районов // Горный журнал. 2017. № 11. С. 105–110.
4. Целюк Д.И., Целюк О.И. Особенности развития техногенеза в намывных накопителях промышленных отходов. Красноярск: ГПКК КНИИГиМС, 2018. 358 с.
5. Чантурия В.А., Козлов А.П., Шадрунова И.В., Ожогина Е.Г. Приоритетные направления развития пассивных и прикладных научных исследований в области использования в промышленных масштабах отходов добычи и переработки полезных ископаемых // Горная промышленность. 2014. № 1. С. 54–57.
6. Чантурия В.А., Ожогина Е.Г., Шадрунова И.В. Задачи экологической минералогии при освоении недр Земли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (СО РАН) 2016. № 5. С. 193–196.
7. Экологически ориентированная переработка горнопромышленных отходов / В.А. Чантурия, И.В. Шадрунова (ред.). М.: Изд-во “Спутник+”, 2018. 200 с.

## ON THE POSSIBILITY OF SECONDARY USE OF MINING WASTES

E. G. Ozhogina<sup>a,b,#</sup>, O. V. Kotova<sup>c,##</sup>, O. A. Yakushina<sup>a,d,###</sup>, and V. E. Zhukova<sup>a,####</sup>

<sup>a</sup> Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources, Staromonetnyi per., 31, Moscow, 119017 Russia

<sup>b</sup> Institute of Integrated Subsoil Development RAS, 4, Kryukovsky St., Moscow 111200 Russia

<sup>c</sup> Yushkin Institute of Geology, Komi SC Ural RAS, Pervomaiskaya ul. 54, Syktyvkar, 167952 Russia

<sup>d</sup> Dubna University, Universititskaya ul. 19, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

<sup>#</sup>e-mail: vims-ozhogina@mail.ru

<sup>##</sup>e-mail: kotova@geo.komisc.ru

<sup>###</sup>e-mail: yak\_oa@mail.ru

<sup>####</sup>e-mail: vera\_fram@mail.ru

The mining complex has a considerably increased environmental impact on the environment. Volumes of accumulated mining waste of mineral processing put on the agenda the need to involve them in recycling on the basis of fundamentally new technologies, integrated, environmentally friendly and economically feasible. Technogenic mineral raw materials, formed by waste of mining industries, has certain inherent features of mineral and/or phase composition, the nature of distribution of useful components, the real composition and structure, which determine the choice of directions of its secondary use and processing technologies. The objectives of the study of mineral matter from a position of technological mineralogy involves the identification of the morphological characteristics, grain composition, peculiarities of relations of minerals; mineral composition, including quantitative determination of minerals (mineral phases), including detection and identification of occurrence modes of beneficial and harmful minerals and their associations, quantification of the

real composition and structure of minerals, mineral aggregates, and their physical and physico-chemical (technological) properties. A deep study of the material composition, the form of finding useful and harmful components, the real chemical composition and structure of specific minerals, taking into account isomorphic substitutions, polytypes, polymorphism is crucial to work out a rational, economically feasible, investment-attractive technology for processing natural and technogeneous mineral matter.

**Keywords:** *mine waste, recycling, applied mineralogy, materials science, testing, mineral composition*

#### REFERENCES

1. Ozhogina, E.G., Shadrunkova, I.V., Chekushina, T.V. *Rol' mineralogicheskikh issledovaniy v reshenii ekologicheskikh problem gornopromyshlennykh raionov* [Role of mineralogical studies in solving environmental problems of mining regions]. *Gornyi zhurnal*, 2017, no. 11, pp. 105–110 (in Russian)
2. Tselyuk, D.I., Tselyuk, O.I. *Osobennosti razvitiya tekhnogeneza v namyynykh nakopitelyakh promyshlennykh otkhodov* [Peculiarities of development of technogenic alluvial storage of industrial waste]. Krasnoyarsk, GPKK KNIIGiMS Publ., 2018, 358 p. (in Russian)
3. Chanturia, V.A., Kozlov, A.P., Shadrunkova, I.V., Ozhogina, E.G. *Prioritetnye napravleniya razvitiya poiskovykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy v oblasti ispol'zovaniya v promyshlennykh masshtabakh otkhodov dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh* [Priority directions of development of prospecting and applied scientific researches in the field of industrial-scale use of waste of mining and processing of minerals]. *Gornaya promyshlennost'*, 2014, no. 1, pp. 54–57 (in Russian)
4. Chanturia, V.A., Ozhogina, E.G., Shadrunkova, I.V. *Zadachi ekologicheskoi mineralogii pri osvoenii nedr Zemli* [Problems in ecological mineralogy upon the development of the Earth's bowels]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, no. 5, pp. 193–196 (in Russian)
5. *Ekologicheski orientirovannaya pererabotka gornopromyshlennykh otkhodov* [Ecologically friendly processing of mining waste]. V.A. Chanturia, I.V. Shadrunkova, Eds., Moscow, Sputnik+ Publ. house, 2018, 200 p. (in Russian)
6. Kotova, O.V., Ozhogina, E.G. Applied Mineralogy of Mining Industrial Wastes. Proc. 14th Int. Congress for Applied Mineralogy. 23–27 September 2019, Belgorod, Russia, S. Glagolev, Ed. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences, 2019, pp. 103–106. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0>
7. Ozhogina, E.G., Kotova, O.V. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment [Proc. 29th Int. Mineral Processing Congress – IMPC 2018]. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019, pp. 32–40.