

## Методологические аспекты создания геолого-технологических моделей месторождений полезных ископаемых

П. М. Мишулович<sup>1</sup>, С. В. Петров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Полиметалл Управляющая Компания»,

Российская Федерация, 198216, Санкт-Петербург, пр. Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,

Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Мишулович, П. М., Петров, С. В. (2019). Методологические аспекты создания геолого-технологических моделей месторождений полезных ископаемых. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (2), 249–266.

<https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205>

В статье рассматриваются методологические основы построения блочной геолого-технологической модели (БГТМ) месторождения полезных ископаемых. В настоящее время этот вид моделирования рассматривается как наиболее важный и надежный инструмент прогнозирования технологических и экономических показателей работы горнодобывающих предприятий. Учет показателей переработки руды в модели рудных объектов позволяет достаточно точно прогнозировать эксплуатационные расходы при добыче и обогащении руды на каждом конкретном участке месторождения. При этом создаются условия, позволяющие напрямую рассчитать рентабельность непосредственной разбраковки руды на промышленные типы (балансовые и забалансовые). В настоящее время в России развивается подход, основанный на трансформации геологической базы данных в геолого-технологическую. Моделирование выполняется на основе использования геологической и технологической баз данных путем оконтуривания однородных геолого-технологических доменов (природных типов руд), а технологические параметры в них рассчитываются по зависимостям показателей переработки от геологических факторов. За рубежом наиболее прогрессивным считается подход, при котором в геолого-технологическом моделировании используются данные количественного минералогического анализа — метода весьма трудозатратного и, кроме того, реализующегося с помощью современного и дорогостоящего оборудования. В статье рассматривается алгоритм создания БГТМ, содержащий несколько компонентов: геологоразведочный, минералого-петрографический, технологический, статистический, геостатистический и экономический. Наиболее важный момент моделирования — выявление факторов, определяющих обогатимость руды, и критериев типизации руд, что в конечном счете приводит к разработке принципов распознавания типов и сортов руды в каждой рядовой пробе. Именно таким способом геологическая база данных конвертируется в геолого-технологическую, а на основе последней создается геолого-технологическая модель.

*Ключевые слова:* моделирование в геологии, обогащение, геолого-технологическое картирование, ГТК, геометаллургия, геолого-технологические модели.

## 1. Введение

В настоящее время для разработки стратегии освоения месторождений полезных ископаемых (в том числе комплексных руд) и планирования проведения горных разведочных и добычных работ широко используются блочные модели, построенные на основе содержания главного полезного компонента руд<sup>1</sup>, а в случае месторождений комплексных руд — модели, построенные по расчетному содержанию условного полезного компонента, рассчитанного на основе содержаний отдельных элементов и переводных коэффициентов. Однако для многих месторождений планирование горных работ только по содержанию полезного компонента не приводит к устойчивой работе обогатительного предприятия, поскольку в товарной руде оказывается шихта различных сортов руд (а иногда и технологических типов) в изменяющихся соотношениях этих сортов в ней. Указанная рудная шихта имеет постоянное содержание полезных компонентов, но на разных участках рудных тел может иметь резко различные технологические качества из-за изменения свойств руд, определяющих их обогатимость. Например, если в шихту с постоянным содержанием золота попадает вместе с первичными золото-сульфидными рудами некоторое количество окисленных золотосодержащих руд (т. е. руд другого технологического типа), то степень извлечения металла может либо увеличиться (когда применяется технология «уголь в пульпе» — carbon in pulp, CIP), либо уменьшиться (когда для обогащения используются флотационные методы).

Другой важный аспект геолого-технологического изучения месторождения состоит в том, что технологическая типизация руд часто не совпадает с их типизацией по качеству сырья. Так, богатые руды не обязательно легкообогатимые, а бедные не являются синонимом труднообогатимых руд. Классический пример — первичные золотые руды, обогатимость которых определяется не столько содержанием металла, сколько формами золота, находящегося в руде. С одной стороны, руда может быть рядовой по содержанию металла, но легкообогатимой из-за присутствия крупных свободных золотин. С другой стороны, богатая руда может быть упорной из-за преобладания дисперсного невидимого золота (invisible gold) в сульфидных минералах. В данном случае к основным факторам, влияющим на обогащение руды, относится не только содержание металла, а еще и соотношение свободной и связанной форм золота.

Таким образом, инструментом, позволяющим обеспечить достижение плановых показателей работы горнодобывающего предприятия, становится создание моделей, учитывающих технологические свойства руды, среди которых наиболее информативными стали блочные геолого-технологические модели (БГТМ), (Мишулович и Петров, 2009; Lishchuk, 2016). В основном это модели, учитывающие технологическое извлечение полезного компонента из руды на обогатительной фабрике, или, кратко, — *модели извлекаемого содержания*.

---

<sup>1</sup> Все термины приводятся в соответствии с Кодексом JORC ([http://jorc.org/docs/JORC\\_code.pdf](http://jorc.org/docs/JORC_code.pdf)).

## 2. Бортовое содержание к блоку модели и БГТМ

Важность применения моделей извлекаемого содержания можно продемонстрировать на следующем примере. Если провести сопоставление распространенности кондиционных и забалансовых блоков в модели содержания с этим же параметром основанной на ней блочной геолого-технологической модели, то можно отметить, что в геолого-технологической модели по отношению к модели содержания среди балансовых руд появляются участки с «забалансовыми» значениями извлекаемого содержания, и, наоборот, в объеме забалансовых руд модели содержания можно выделить зоны с рентабельным сырьем в геолого-технологической модели, которое становится таковым при высокой степени обогатимости (Петров и др., 2010). Данный факт связан с тем, что на различных стадиях геологоразведки оценка ресурсов месторождения основывается на применении к блоку модели условия рентабельности в виде расчетного значения бортового содержания (БС, или Cut-off) (Rendu, 2008). Составная часть расчетного бортового содержания — *среднее извлечение* полезного компонента и *средние затраты на переработку*, в то время как реальные показатели переработки могут изменяться в широких пределах по сравнению со средними значениями извлечения и затрат. Причину изменения статуса ресурсов можно продемонстрировать на диаграмме разброса содержания полезного компонента в руде и степени его извлечения для месторождения в целом (рис. 1). Если перейти от использования усредненного значения степени извлечения полезного компонента из руды к реальным (или расчетным) значениям этого показателя в каждом блоке модели месторождения, то прямая БС на графике преобразуется в кривую БС постоянства содержания — извлечения, что, соответственно, изменяет классификацию областей руда — порода. С одной стороны, рудные блоки, в которых прежде содержание полезного компонента было ниже бортового, но степень его извлечения была выше среднего, становятся рентабельными к отработке (т. е. квалифицируются как руда). С другой стороны, отдельные блоки, ранее отнесенные к руде, невозможно рентабельно переработать ввиду низкой степени извлечения полезного компонента. Подобную диаграмму можно построить в осях содержания и эксплуатационных затрат.

Модель месторождения должна учитывать содержание и извлечение полезного компонента (компонентов) и затраты на добычу и переработку, чтобы в результате технико-экономического исследования и планирования разработки полезного ископаемого получить корректные и реалистичные денежные потоки. Если вышеуказанные параметры руды не учитывать, то качество добываемого сырья и результаты его переработки будут отличаться от расчетных значений, и, следовательно, нельзя достичь заложенных экономических параметров эффективности добычи.

## 3. БГТМ в рамках программы ГТК и ОТО

В России БГТМ, учитывающие технологические свойства руд, строят в рамках геолого-технологического картирования (ГТК) (Коц и др., 1980; Видь..., 1990; Petruk, 2000), проводимого в ходе геологоразведки, а при эксплуатации месторождений — на данных и в рамках опережающего технологического опробования

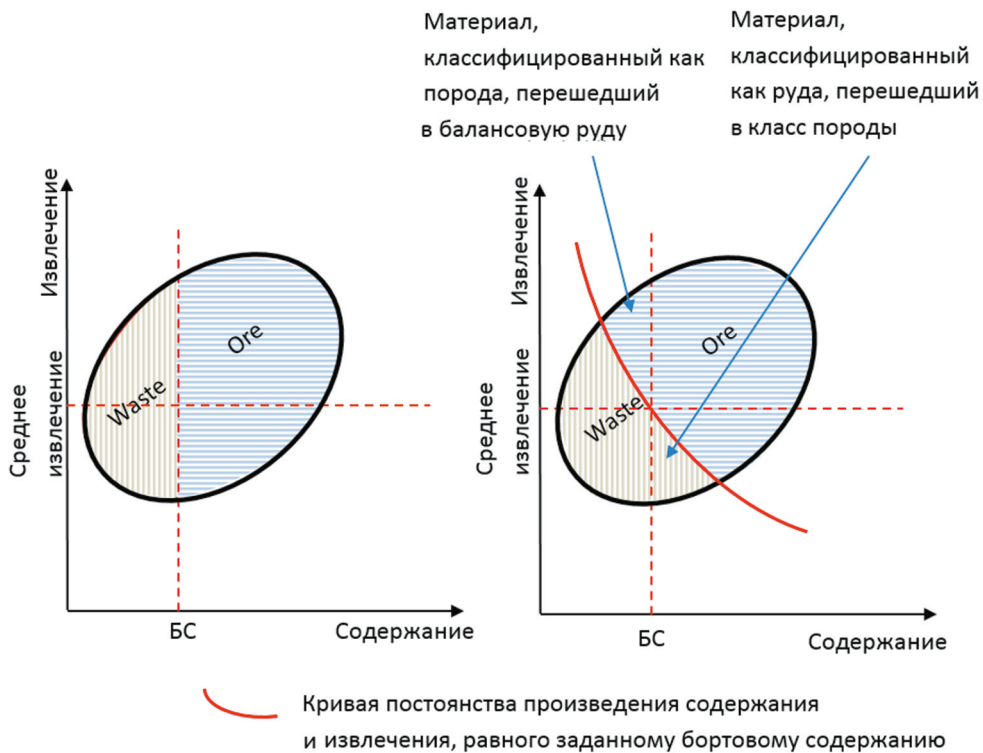


Рис. 1. Диаграмма рассеяния содержаний и извлечения:

эллипс — область распределения содержание — извлечение для месторождения; слева — разделение на руду и породу проводится при стандартном применении бортового содержания к блоку, справа — при учете извлечения в блоке модели, Waste — забалансовая руда, Ore — балансовая руда

(ОТО) (Малообъемное..., 1979). Серьезное развитие данного направления наблюдается и за рубежом (Lamberg, 2011; Doll, 2015; Lishchuk, 2016; Kingl and Macdonald, 2016), где указанный метод носит название *геометаллургия* (geometallurgy).

Говоря о методике создания моделей, следует учитывать, что на формирование каждого месторождения повлияло множество природных факторов, которые не повторяются даже у однотипных объектов. Поэтому каждое месторождение специфично и уникально по своим свойствам и характеристикам. Следовательно, при моделировании объектов можно соблюдать лишь общие принципы, а методику следует подстраивать (оптимизировать) под условия каждого конкретного месторождения, основываясь на исследованиях его особенностей. Разработку методики следует предварять тщательным исследованием вещественного состава руд с определением наиболее существенных геологических и минералогических критериев обогатимости (Вершинин и др., 1988; Пирогов, 1988; Изоитко, 1989; 1997; Сидоренко и др., 1992). Именно поэтому блочное технологическое (или геометаллургическое) моделирование лишь часть единого процесса ГТК (Малообъемное..., 1979; Doll, 2015), как и процесса ОТО во время эксплуатации месторождения. Данной тематике посвящено много статей, раскрывающих аспекты связи анализа технологических параметров, моделирования работы обогатительной фабрики и получае-

мых значений степени извлечения полезных компонентов (Мишулович и Петров, 2009; Петров и др., 2010; Lamberg, 2011; Kingl and Macdonald, 2016; и др.).

Первый шаг к построению технологической модели — разработка программы ГТК с учетом геологических особенностей месторождения и с обоснованием необходимого объема минералого-технологического опробования. Результат ГТК — составление схемы классификации руд по природным типам и их последующее объединение в технологические типы и сорта, определение зависимостей между показателями качества руд и показателями их переработки, определение классификационных параметров руд, применимых к рядовым пробам.

Общая последовательность ГТК (как и геометаллургического исследования) содержит следующие этапы:

- *геологоразведочный*, т.е. характеристику геологического пространства месторождения с нужной степенью достоверности для определения изменчивости и возможности проведения статистического исследования с целью найти и идентифицировать факторы, влияющие на обогащение руды (Куликов и Куликова, 1988);
- *минералого-петрографический*, заключающийся в исследовании минерального состава руд с упором на тщательную фиксацию изменчивости его характеристик, определяющих причины, вызывающие дисперсию показателей обогащения (Пирогов, 1988; Вершинин и др., 1988; Изоитко, 1989; Sun and McDonough, 1989; Виды..., 1990; Количественный..., 1990; Сидоренко и др., 1992; Изоитко, 1997; Petruk, 2000; Lamberg, 2011);
- *технологический*, по результатам которого сопоставляют природную и технологическую типизации руд, а также составляют схему классификации руд по природным типам, технологическим типам и сортам, разрабатывают критерии для построения геолого-технологических доменов на основе всех типизаций (Глаголев, 1941; Зеленов, 1989; Петров, 2005; Козин, 2008);
- *статистический*, который сводится к выполнению комплексного статистического исследования массива экспериментальных данных с получением классификационных диаграмм и фундаментальных зависимостей между вещественными характеристиками руд и показателями их обогащения (Deutsch, 2013);
- *геостатистический*, состоящий в определении подхода для создания блочной модели и внесения в нее технологических параметров, а также в интерпретации технологических типов, выделении геолого-технологических доменов; определении изменчивости технологических параметров и поиске корреляции с геологическими факторами внутри геолого-технологических доменов; в задании геолого-технологических доменов и технологических параметров или геологических факторов (для дальнейшего расчета технологических параметров на основе регрессионных моделей) в блочной модели (Deutsch, 2013);
- *экономический*, заключающийся в разработке календарного плана отработки месторождения с учетом прогнозного выхода полезного компонента на фабрике и изменения затрат на добычу и переработку, прогнозируемых на основе данных БТГМ (Rendu, 2008).

БГТМ следует включать в процедуру согласования (reconciliation), что позволяет заверять ее и вносить в нее корректирующие поправки. Кроме того, следует отметить важность этапа согласования, направленного на анализ расхождений между прогнозными характеристиками переработки руды, полученными по БГТМ, и фактической работой обогатительной фабрики. Необходимо учитывать, что прогноз по модели, рассчитанной на основе данных лабораторных тестов, может не совпадать с результатами работы обогатительной фабрики в силу естественных различий в технологических схемах и номенклатуре оборудования для получения концентратов в исследовательской лаборатории и на обогатительной фабрике. Только согласование позволяет внести поправки, направленные на удаление эффекта масштабирования при моделировании, что позволяет резко снизить ошибку прогнозирования.

#### 4. Технологические параметры, применяемые для создания БГТМ

Для создания БГТМ можно использовать следующие технологические параметры:

- *Показатели, определяющие эксплуатационные затраты.* К таковым относятся различные физико-механические характеристики (ФМХ) минерального сырья, которые определяются прямыми экспериментами. Это различные прочностные показатели (например, предел прочности при сжатии и пр., абразивность). В последние годы все чаще применяются комплексные показатели — индексы работы по дезинтеграции руды (например, индексы Бонда; Bond Work Index, BWI). Аналогичное тестирование выполняется для исследования характеристик гравитационного, магнитного и флотационного обогащения руды. Следует учитывать важнейшее требование к показателям — их аддитивность, поскольку она является основным условием для использования интерполяторов. Создание модели эксплуатационных затрат и применение их вместо усредненных значений для всего месторождения позволяет проводить более сложные и точные расчеты чистой текущей стоимости рудных блоков.
- *Показатели, определяющие выручку от продажи товарной продукции,* такие как извлечение полезного компонента и извлекаемое содержание. В таком случае расчеты в целях оптимизации и планирования горных работ выполняются не на основе средних параметров, а на основе извлекаемого содержания из блока модели. Как мы уже отмечали выше, при этом часть руды с содержанием ниже бортового, но высоким извлечением (выше среднего значения, заложенного в определении бортового содержания) может «перейти» в кондиционную руду.
- *Специфические технологические параметры* (например, изменчивость), которые можно связать с факторами геологической среды, такими как производительность, выход концентрата, качество концентрата, свойства хвостов, содержания вредных примесей и пр.

Исследователь самостоятельно определяет те из всех вышеперечисленных параметров, которые нужно применять для создания модели, при этом на первом плане — наличие строгой функциональной зависимости влияния этих параметров



на выход и качество полезного компонента, а также на эксплуатационные затраты, связанные с добычей и переработкой сырья. Важность параметра для моделирования определяется силой его влияния на технико-экономические показатели и амплитудой колебаний значений данного параметра. Так, например, если извлечение металла изменяется в пределах  $\pm 5\%$ , но при этом измельчаемость руды варьирует в более широких пределах, существенно влияя на эксплуатационные затраты, то следует в первую очередь анализировать и моделировать именно прочностные свойства руды.

## 5. Методологические подходы к построению БГТМ

Существует несколько подходов к построению БГТМ месторождений, основанные и на прямом, и на косвенном способах задания технологических параметров в блочной модели (Малообъемное..., 1979; Lishchuk, 2016). В рамках прямого способа<sup>2</sup> параметры блочной модели задают путем интерполяции только данных лабораторных исследований технологических проб. Косвенный способ<sup>3</sup> основан на прогнозировании показателей переработки руды по их зависимостям от геолого-минералогических факторов. В целом можно выделить три основных подхода к созданию БГТМ:

- 1) *традиционный (traditional)*, который базируется на данных непосредственного исследования технологических проб путем их прямой интерполяцией в блочную модель в пределах рудных тел с использованием кригинга, метода обратных расстояний<sup>4</sup>, радиально базисных функций;
- 2) *опосредованный (proxy)*, осуществляется путем трансформации геологической базы данных в технологическую (Апухтина, 2008; Мишулович и Петров, 2009; Петров и др., 2010). Моделирование выполняется на основе сведений из геологической и технологической баз данных, а технологические параметры рассчитываются по зависимостям показателей переработки руды от геологических факторов. На данный момент этот подход наиболее часто реализуется на практике;
- 3) *минералогический (mineralogical)*, оформляется в настоящее время и считается на сегодняшний день самым прогрессивным, поскольку основан на использовании базы данных количественного минералогического анализа рядовых проб. Это самый трудозатратный для реализации метод, поскольку требует сбора огромного массива информации (Пирогов, 1988; Вершинин и др., 1988; Изоитко, 1989; Sun and McDonough, 1989; Виды..., 1990; Количественный..., 1990; Сидоренко и др., 1992; Изоитко, 1997; Petruk, 2000; Lamberg, 2011).

В основе всех подходов лежит привязка изменчивости показателей к геологическому строению месторождения и его сегментация на однородные технологические домены по этим показателям (природные типы, технологические типы и сорта). Следует учитывать, что модели рудных тел, созданные для расчета содер-

<sup>2</sup> Способ, применимый при проведении ОТО эксплуатационных блоков месторождения.

<sup>3</sup> Применяемый в ГТК способ.

<sup>4</sup> Inverse Distance to a Power — IDP.

жаний в блочной модели, могут не подходить в качестве границ для задания технологических параметров. Так, с одной стороны, промышленные содержания полезного компонента могут быть связаны с развитием линейных или объемных поясов метасоматических изменений. С другой стороны, измельчаемость руды, влияющая на степень извлечения полезного компонента и определяющая экономические показатели переработки, может контролироваться тектоническими зонами другой ориентировки, нежели ориентация рудных тел.

Рассмотрим подходы моделирования. Первый, на данный момент достаточно распространенный, — *традиционный подход (traditional)*, при котором интерполируются из баз данных сведения об извлечении полезного компонента в пределах рудных тел с использованием кригинга или метода обратных расстояний. Исходными данными в таком случае выступают результаты прямых технологических экспериментов на материале малообъемных или лабораторных технологических проб. Пространственными ограничителями становятся каркасы рудных тел при условии, что объем данных довольно большой, а изменчивость технологических свойств низкая и рудные тела сложены рудой одного технологического типа (сорта). В иных случаях для получения надежного результата желательно использовать каркасы технологических доменов или природных типов. Недостаток данного подхода в том, что интерполируемый параметр может зависеть от факторов с разным пространственным трендом, а усредненный показатель нивелирует реальную геологическую анизотропию, влияющую на изменчивость технологических свойств. Кроме того, одна из основных проблем технологического моделирования — постоянная ограниченность объема данных, требующихся для задания показателей качества руды. В сравнении с объемами баз данных по химическому составу руд и вмещающих пород, которые могут насчитывать десятки или сотни тысяч проб, объем баз с достоверными результатами технологических исследований на два-три порядка меньше. Значительное влияние на точность расчетов оказывает неравномерное распределение точек отбора технологических проб по месторождению. Так, достаточно большой объем данных формируется для блоков, готовящихся к отработке, в то время как для остальных частей месторождения технологическое опробование ведется по очень редкой сети случайных точек. По указанной причине при непосредственном включении прямых параметров обогатимости руды в БГТМ точности оценки может не повысится в сравнении с методом, в котором применяется среднее значение извлечения полезного компонента по всему месторождению. Однако данный подход используется для краткосрочного планирования добычи и переработки отдельных рудных тел и эксплуатационных блоков.

Второй подход к созданию БГТМ — *опосредованный (proxy)*, косвенный, поскольку геологическая база данных трансформируется в технологическую (или, точнее, в геолого-технологическую) путем применения математических функций. База пространственных технологических данных всегда мала по сравнению с базой геологических данных, а этот подход позволяет вовлечь в моделирование всю геологическую базу с равномерным опробованием по рудным телам, что дает возможность воспользоваться методами геостатистики.

Приставка «гео-» в упомянутом выше термине «геометаллургия» не случайна: она означает, что технологические данные находятся в связи с пространственной геологической информацией. Технологические параметры зависят от основ-



ных показателей качества руды, например от содержания полезного компонента (Изоитко, 1987; Петров, 2015). Однако в большинстве случаев эти зависимости неустойчивы и для увеличения достоверности прогнозирования требуется учет иных параметров. Среди последних могут быть вещественные (например, химический и минеральный состав, текстурно-структурные особенности руд, состав минералов, ФМХ и пр.) и геологические (такие как состав вмещающих пород, тектонические процессы, характеристика метасоматитов, наличие зоны окисления и пр.). Отметим, что имеет место иерархия этих параметров: так, группа геологических контролирует группу вещественных. Одновременно с поиском зависимостей выделяют однородные геолого-технологические домены, так как многомерная регрессия для расчета технологических параметров без выделения этих доменов часто не позволяет получить достоверный результат, вследствие чего полученные уравнения имеют высокую ошибку прогнозирования. Понизить вариативность можно путем введения категориальных переменных (характеризующих литологию, минералогические ассоциации, тип метасоматических изменений и т. д.). С их помощью общая выборка разделяется на отдельные подвыборки, в которых зависимости технологических параметров уже можно оценивать на основе количественных данных через уравнения регрессии меньшей мерности. Таким образом, выполняется типизация руд по геологическим факторам (т. е. их разделение на природные типы), но с учетом технологических характеристик (т. е. разделение руд на технологические сорта), при которой вариативность параметров снижается в пределах каждого домена. Указанная типизация используется в качестве основы для создания геолого-технологических доменов, в пределах которых соблюдается относительное постоянство геологических факторов, влияющих на обогащение руд. По результатам анализа найденных критериев разделения выборки, а также с учетом данных прямых технологических испытаний частных проб (индикаторных проб) распознается и кодируется каждая рядовая проба руды (геологической базы) по принадлежности к тому или иному геолого-технологическому домену. Это дает основу для анализа связанности доменов и, соответственно, для выбора подхода к заданию доменов в модели. Если структура геолого-технологических доменов проста (рис. 2, а) и их связанность высока, то производится прямая каркасная геометризация технологических доменов. Если домены или сорта не имеют четких границ или имеют высокую перемежаемость (рис. 2, б), из-за чего невозможна их прямая геометризация каркасами, то вместо создания каркасов геолого-технологических доменов в блочной модели рассчитывается доля каждого технологического домена (в таком случае следует использовать термин «сорт») с помощью индикаторного кригинга или радиально базисных функций.

В пределах границ геолого-технологических доменов должна присутствовать однородность выборки задаваемого технологического параметра, что является необходимым условием применения методов геостатистики. В некоторых случаях удобнее выделить домены для каждого моделируемого технологического параметра отдельно, так как фактор, влияющий на этот параметр, может иметь свою анизотропию в геологическом пространстве.

Третий, *минералогический* подход к созданию БГТМ основывается главным образом на количественной минералогической информации, поскольку обогащение

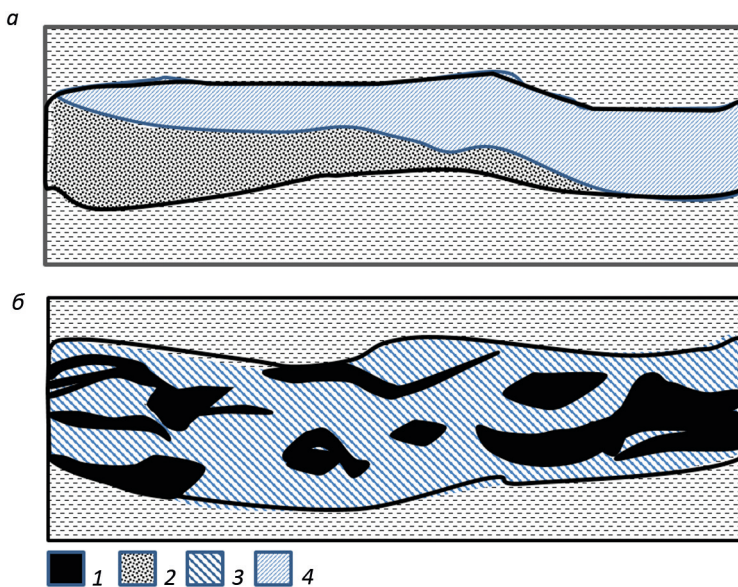


Рис. 2. Влияние увязки на используемый способ создания технологических доменов: а — простое строение рудного тела, пригодное для использования каркасных моделей, б — сложное строение, бескаркасное моделирование; 1–4 — домены. Разной штриховкой показаны различные сорта руд

руды связано прежде всего с ее минеральным составом, а не с химическими особенностями. Каждому месторождению полезных ископаемых присуща внутренняя изменчивость не столько содержания полезного компонента, сколько особенностей минерального состава. Наиболее яркий ее пример — руды золота, которые могут содержать частицы металла, различающиеся по размерам на пять порядков. Для каждой из размерных групп существует своя оптимальная технология добычи: для крупного самородного золота — гравитационное разделение, для мелкого и связанного с сульфидами — флотация, для дисперсного — гидрометаллургия. Соотношение этих гранулометрических разностей самородного золота гораздо важнее для обогащения, нежели информация об его абсолютном содержании. Часто это означает, что для всего рудного тела необходима точная информация об особенностях минерального состава и текстурно-структурных характеристиках (Lamberg, 2011). Поэтому минералогические данные должны быть количественными, а информацию следует собирать непрерывно. Минералогическая база данных может быть основана на различных источниках. Геологическая документация горных выработок позволяет создать минералогическое описание с низкими затратами, но оно будет в основном качественным с небольшим объемом количественных данных. Оптическая микроскопия предоставляет лучшее качество информации, но объем пространственных данных, как правило, сопоставим с объемом данных, полученных технологическим путем (технологических данных). В последние годы активнее стала развиваться оригинальная методика количественного минералогического анализа с применением сканирующей электронной микроскопии (Qemscan — Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning) (Goodall et al., 2005), позволяющая

изучать структуру и текстуру руд, а также выполнять надежный количественный минералогический анализ и анализ раскрываемости минеральных частиц (MLA — Mineral Liberation Analyzer).

Данные о минеральном составе используют для построения модели границ распространения значимых минеральных ассоциаций, поиска закономерностей раскрытия минеральных частиц при дезинтеграции. В свою очередь, это дает возможность применять зависимости показателей обогащения руд от прямо определяющих их факторов. Следовательно, ценность указанных зависимостей состоит в их довольно высокой точности. Математическая модель, основанная на особенностях минерального состава руд, позволяет создать симуляторы обогатительной фабрики. А данные из блочной модели, содержащей минералогическую составляющую, позволяют рассчитать технологические параметры обогащения в любой точке технологической схемы.

Основная проблема реализации минералогического подхода — сложность выявления зависимости между технологическими свойствами и минералогической информацией, а также трудоемкость и дороговизна ее получения. Пространственная увязка минеральных ассоциаций также нетривиальная задача, поскольку требует серьезного геологического понимания генезиса и строения месторождения. Сам по себе алгоритм создания модели в рамках этого подхода аналогичен алгоритму при косвенном подходе посредством геологических факторов.

## 6. Примеры построения БГТМ

В качестве примера традиционного подхода можно привести создание БГТМ месторождения железистых кварцитов. Выделенные для такого месторождения по литологическим характеристикам разновидности кварцитов (амфибол-магнетитовые, пироксеновые и т. д.) характеризуются устойчивыми статистическими характеристиками технологических параметров. В то же время литологические разности хорошо геометризуются в пространстве отдельно друг от друга с помощью каркасных моделей. После статистического анализа данные разновидности приравняются к технологическим доменам. Далее в пределах доменов показатели извлечения задаются путем кригинга на основе данных исследования минералого-технологических проб. Однако отметим простоту внутреннего строения многих месторождений железистых кварцитов. Литологические разности хорошо расчленяются на основании данных геологического описания, при этом технологические параметры для каждой разности достаточно устойчивы.

В основе выделения геолого-технологических доменов лежит положение о близком к нормальному распределению изучаемого технологического параметра в пределах домена. В некоторых случаях это приводит к тому, что геолого-технологические домены совпадают с природными типами. Хорошим примером этого может быть месторождение богатых железных руд (БЖР) (Апухтина, 2008). В результате формирования коры выветривания по железистым кварцитам и сланцам в зависимости от состава вмещающих пород формировались соответственно: железослюдковые, мартит-железослюдковые, мартит-гидрогематитовые и гидрогематитовые типы БЖР. Учитывая сложность строения данного вида месторождений, для выделения различных природных типов руд здесь можно применять индикаторы

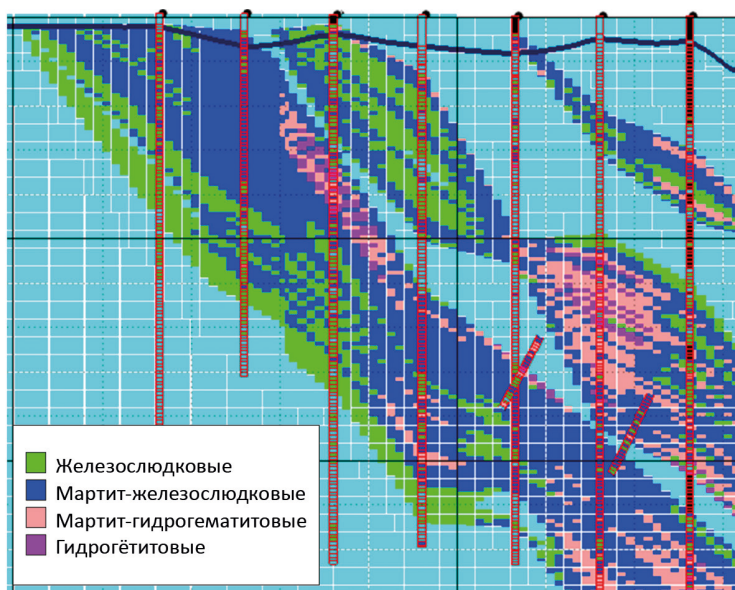


Рис. 3. Типизация руд в блочной модели (месторождение богатых железных руд) с разделением по типу руды в разрезе на основе индикаторного кригинга

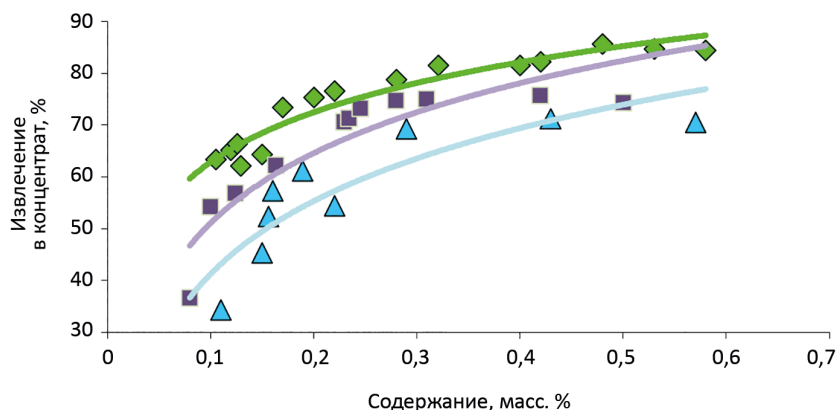


Рис. 4. Прогнозирование показателей переработки руды по природным типам руды Тырнаузского вольфрамового месторождения: ромбы — шеелитовые скарновые руды; квадраты — шеелитовые руды в пироксен-плагиоклазовых роговиках; треугольники — скарнированные мраморы

торный кригинг, который позволяет оценить вероятность наличия того или иного типа руд в каждом элементарном блоке модели. В итоге каждый блок модели относится к конкретному типу руды, имеющему максимальную вероятность (рис. 3). Каждый природный тип характеризуется не только своим диапазоном содержания, но и своими параметрами обогащения. В результате путем индикаторного кригинга можно не только картировать различные типы руд и пустых пород (например, железистых кварцитов, сланцев), но и, по сути, картировать технологические параметры.

Так, на основе накопленных данных минералого-технологических проба по природным типам получены функциональные зависимости выхода полезного компонента в зависимости от содержания полезного компонента. На рис. 4 показаны зависимости содержания — извлечения для каждого природного типа, которые позволили преобразовать блочную модель содержаний с заданными природными типами в геолого-технологическую. Исходные данные для таких моделей — результаты геолого-технологического картирования природных типов руд, литологическая база данных (природных разновидностей), лабораторные технологические исследования, блочная модель содержаний.

В более сложных случаях, когда природные типы не подлежат пространственному выделению или когда технологические параметры зависят от факторов, которые нельзя связать с одним природным типом<sup>5</sup>, следует использовать подход, через моделирование технологических типов (Мишулович и Петров, 2009; Петров и др., 2010). В нашей практике примером такого подхода является месторождение молибдена в Забайкалье. Так, был сделан комплексный анализ базы данных и выделены признаки, влияющие на обогащение руды, а на основе проведенного анализа были выделены легко-, средне- и труднообогащаемые сорта руд. Для каждого из них были найдены зависимости извлечения. Каждый сорт характеризовался своим набором признаков для распознавания его в геологической базе, после чего последняя была преобразована в технологическую через найденные связи геологических факторов с обогащением руды. На основе созданной технологической базы данных с помощью индикаторного кригинга рассчитана доля каждого сорта в блоках БГТМ, в каждом блоке рассчитано процентное соотношение технологических сортов руд. Извлечение по каждому технологическому сорту в блоке рассчитано по формулам, полученным путем регрессионного анализа на пробах опережающего технологического опробования, а общее извлечение в блоке рассчитано как средневзвешенное на долю сорта в блоке. Таким образом, удалось получить удовлетворительную сходимость прогнозного извлечения с фактическим. Схема данной методики приведена на рис. 5.

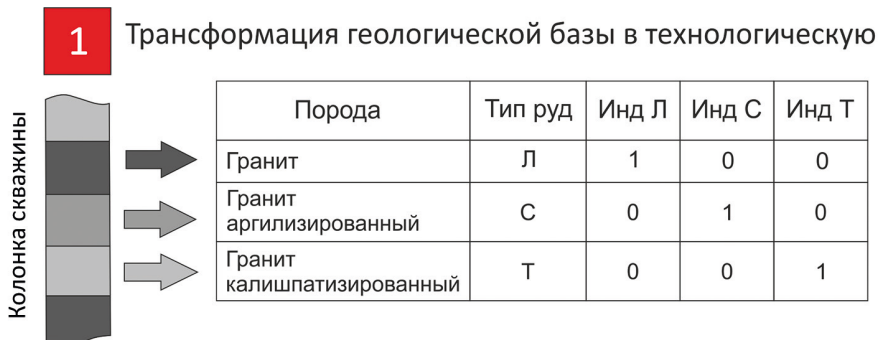
## 7. Заключение

Создание БГТМ (геометалургической модели) — комплексная междисциплинарная задача, решение которой лежит в сфере сочетания прикладной геологии, технологии обогащения руд и экономики горного производства. В рамках каждого подхода расчет модели не становится исключительной задачей и основывается на хорошо разработанных практиках моделирования. Нетривиальными задачами являются также поиск зависимостей технологических параметров от геологических факторов и выделение геолого-технологических доменов. Все вышеописанное требует проведения глубокой исследовательской работы и не может быть полностью шаблонизировано, потому что такие зависимости уникальны для каждого месторождения.

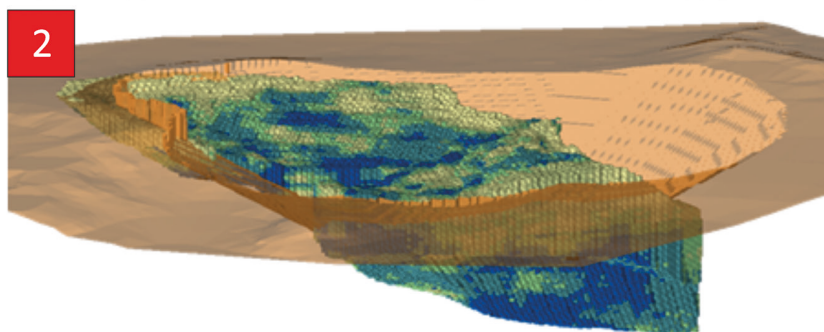
Создание БГТМ должно быть частью геолого-технологического картирования и основываться на выделении природных или технологических типов руд. А саму

<sup>5</sup> Особенно если данные факторы связаны с вещественными, структурными и другими факторами, имеющими разную ориентировку в геологическом пространстве.





Задание доли технологического сорта в модель содержаний



Расчет извлечения по каждому сорту и общего извлечения в модели

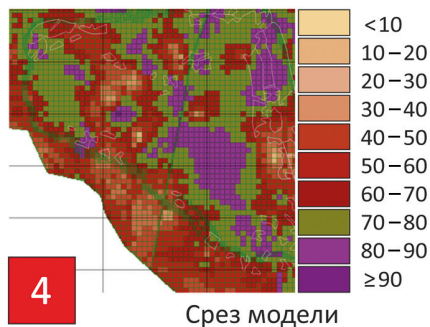
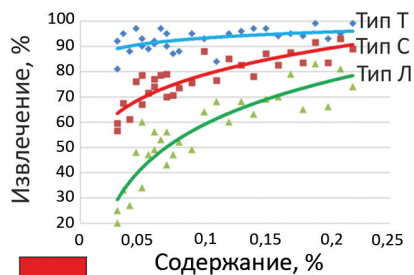


Рис. 5. Схема расчета извлечения в блочной модели:

1–4 — этапы модели; Инд Л, Инд С, Инд Т — безразмерные индикаторы соответственно легко-, средне- и труднообогатимых руд, принимающие значение 0 или 1; цветовая шкала — извлечение, %

модель следует использовать в цепочке горного планирования. Это позволит оптимизировать переработку руды путем ее усреднения не только по содержанию, но и по прогнозируемому извлечению металла или качеству минерального концентрата. С помощью такой модели возможны поблочный учет и прогнозирование эксплуатационных издержек при переработке руд.

Обратим внимание на то, что в результате расчета по БГТМ может измениться контур рудных тел, поскольку экономические показатели части некондиционных



по содержанию, но легкообогатимых по свойствам руд могут быть сопоставимыми с показателями балансовых руд.

## Литература

- Апухтина, И. В.*, 2008. Совершенствование методики оценки запасов месторождений железистых кварцитов на основе трехмерного компьютерного моделирования. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodiki-otsenki-zapasov-mestorozhdenii-zhelezistykh-kvartsitov-na-osnove> (дата обращения: 12.05.2019).
- Вершинин, А. С., Витковская, И. В., Эдельштейн, И. И., Вареня, Г. Д.*, 1988. Технологическая минералогия гипергенных никелевых руд. Наука, Ленинград.
- Глаголев, А. А.*, 1941. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. Государственное издательство геологической литературы комитета по делам геологии при СНК СССР, Москва, Ленинград.
- Зеленов, В. И.*, 1989. Методика исследования золото- и серебросодержащих руд. Недра, Москва.
- Изоитко, В. М.*, 1989. Технологическая минералогия вольфрамовых руд. Наука, Ленинград.
- Изоитко, В. М.*, 1997. Технологическая минералогия и оценка руд. Наука, Санкт-Петербург.
- Козин, В. З.*, 2008. Исследование руд на обогатимость. Изд-во УГГУ, Екатеринбург.
- Количественный минералогический анализ дробленых руд, 1990. Методические указания НСОМ-МИ МинГео СССР 19. МинГео, Москва.
- Кои, Г. А., Чернопятов, С. Ф., Шманенков, И. В.*, 1980. Технологическое опробование и картирование месторождений. Недра, Москва.
- Куликов, А. А., Куликова, А. Б.*, 1988. Технично-методические основы опробования горных пород и руд на золото. Наука, Москва.
- Малообъемное технологическое опробование и картирование рудных месторождений при разведке, 1979. ВИМС, Москва.
- Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ, 1990. Методические указания НСОММИ МинГео СССР 31. МинГео, Москва.
- Мишулович, П. М., Петров С. В.*, 2009. Создание блочной геолого-технологической модели молибденового месторождения. Труды V Всероссийской научной школы «Математические исследования в естественных науках», 157–163.
- Петров, С. В.*, 2005. Методологические и терминологические аспекты изучения форм нахождения золота в рудах. Обогащение руд 2, 27–30.
- Петров, С. В.*, 2015. О зависимости флотационного извлечения платиноидов от содержания металлов в руде. Обогащение руд 5, 14–19.
- Петров, С. В., Мишулович, П. М., Смоленский, В. В.*, 2010. Принципы создания блочной геолого-технологической модели месторождения. Обогащение руд 6, 34–38.
- Пирогов, Б. И.*, 1988. Технологическая минералогия железных руд. Наука, Ленинград.
- Сидоренко, Г. А., Александрова, И. Т., Петрова, Н. В.*, 1992. Технологическая минералогия редкометалльных руд. Наука, Санкт-Петербург.
- Deusch, C. V.*, 2013. Geostatistical Modelling of Geometallurgical Variables — Problems and Solutions. The Second AUSIMM International Geometallurgy Conference. Brisbane, 7–15.
- Doll, A.*, 2015. Geometallurgy basics for mineral processing applications. Sagsmilling, Canada.
- Goodall, W.R., Scales, P.J., Butcher, A.R.*, 2005. The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores. Minerals Engineering 18(8), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.018>
- Joint Ore Reserves Committee, 2012. The JORC Code 2012 Edition. AusImm, AIG, MCA, Carlton South, Australia.
- Kingl, G. S., Macdonald, J. L.*, 2016. The Business Case for Early-stage Implementation of Geometallurgy — an example from the Productora Cu-Mo-Au deposit, Chile. Third International Geometallurgy Conference 2016.
- Lamberg, P.*, 2011. Particles — the bridge between geology and metallurgy. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Lishchuk, V.*, 2016. Geometallurgical programs — critical evaluation of applied methods and techniques. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.

- Petruk, W., 2000. Applied mineralogy in the mining industry. Elsevier, Ottawa.
- Rendu, J.-M., 2008. An introduction to cut-off grade estimation. SME, Littleton, Colorado, USA.
- Sun, W., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications of Mantle Composition and Processes. Geological Society, London, Special Publications 42, 313–345.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.  
Статья рекомендована в печать 18 марта 2019 г.

#### Контактная информация:

Мишулович Павел Михайлович — mishulovichpm@polymetal.ru  
Петров Сергей Викторович — petrov64@gmail.com

## Geometallurgical models creation principles

P. M. Mishulovich<sup>1</sup>, S. V. Petrov<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> JSC “Polymetal Management”,  
2, ul. Narodnogo Opolchenia, St. Petersburg, 198216, Russian Federation
- <sup>2</sup> St. Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Mishulovich P. M., Petrov S. V. (2019). Geometallurgical models creation principles. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (2), 249–266. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.205> (In Russian)

The following article explores the aspects of geometallurgy model creation and its position in the general chain of geological and technological mapping. The following article describes the model creation process and principles applied in the framework of different approaches to geometallurgy model creation. Currently, this type of modeling is considered the most important and reliable tool for forecasting the technological and economic performance of mining companies. The most progressive is the approach based on the use of quantitative mineralogical analysis for geological and technological modeling, which is very labor-intensive and requires modern and expensive equipment. An approach is being developed in the Russian Federation that is based on the transformation of a geological database into a technological one. The article discusses the algorithm for creating geometallurgy models, which includes several components: exploration, mineralogical and petrographic, technological, statistical, geostatistical and economic. The most important points of modeling are studies to identify the factors that determine ore processing and criteria for ore typification, which ultimately leads to the development of principles for recognizing types of ore in each geological sample. It is in this way that the geological database is converted into a geological-technological database, and a geological-technological model is created on its basis.

**Keywords:** modeling in geology, mineral processing, geometallurgy, geometallurgy models.

## References

- Apukhtina, I. V., 2008. Sovershenstvovanie metodiki otsenki zapasov mestorozhdenii zhelezistykh kvartsitov na osnove trekhmernogo komp'uternogo modelirovaniia. URL: <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-metodiki-otsenki-zapasov-mestorozhdenii-zhelezistykh-kvartsitov-na-osnove> (access date: 12.05.2019). (In Russian)
- Deutsch, C. V., 2013. Geostatistical Modelling of Geometallurgical Variables — Problems and Solutions. The Second AUSIMM International Geometallurgy Conference. Brisbane, 7–15.
- Doll, A., 2015. Geometallurgy basics for mineral processing applications. Sagmilling, Canada.

- Glagolev A. A.*, 1941. Geometricheskie metody kolichestvennogo analiza agregatov pod mikroskopom [Geometric methods of quantitative analysis of aggregates under a microscope]. Gosudarstvennoye izdatel'stvo geologicheskoy literatury komiteta po delam geologii pri SNK SSSR Publ., Moscow, Leningrad. (In Russian)
- Goodall, W. R., Scales, P. J., Butcher, A. R.*, 2005. The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores. *Minerals Engineering* 18(8), 877–886. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.018>
- Izotko, V. M.*, 1989. Tekhnologicheskaya mineralogiya vol'framovykh rud [Technological mineralogy of tungsten ores]. Nauka Publ., Leningrad. (In Russian)
- Izotko, V. M.*, 1997. Tekhnologicheskaya mineralogiya i otsenka rud [Technological mineralogy and ore evaluation]. Nauka Publ., St. Petersburg. (In Russian)
- Joint Ore Reserves Committee, 2012. The JORC Code 2012 Edition. AusImm, AIG, MCA, Carlton South, Australia.
- Kingl, G. S., Macdonald, J. L.*, 2016. The Business Case for Early-stage Implementation of Geometallurgy — an example from the Productora Cu-Mo-Au deposit, Chile. Third International Geometallurgy Conference 2016.
- Kolichestvennyi mineralogicheskii analiz drobnykh rud. Metodicheskie ukazaniya NSOMMI MinGeo SSSR [Quantitative mineralogical analysis of crushed ores. Methodological guidelines of the NSOMMI MinGeo USSR], 1990. MinGeo Publ., Moscow. (In Russian)
- Kotz, G. A., Chernopyatov, S. F., Shmanenkov I. V.*, 1980. Tekhnologicheskoe opobovanie i kartirovanie mestorozhdenii [Technological sampling and mapping of deposits]. Nedra Publ., Moscow (In Russian)
- Kozin V. Z.*, 2008. Issledovanie rud na obogatimost' [Research of ores for mineral dressing]. UGGU Publ., Yekaterinburg. (In Russian)
- Kulikov A. A., Kulikova A. B.*, 1988. Tekhniko-metodicheskie osnovy opobovaniya gornykh porod i rud na zoloto [Technical and methodological fundamentals of testing rocks and ores for gold]. Nedra Publ., Moscow. (In Russian)
- Lamberg, P.*, 2011. Particles — the bridge between geology and metallurgy. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Lishchuk, V.*, 2016. Geometallurgical programs — critical evaluation of applied methods and techniques. Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Maloob'emnoye tekhnologicheskoe opobovanie i kartirovanie rudnykh mestorozhdenii pri razvedke. [Low-volume technological sampling and mapping of ore deposits during exploration], 1979. VIMS Publ., Moscow. (In Russian)
- Mishulovich P. M., Petrov S. V.*, 2009. Sozdanie blochnoi geologo-tekhnologicheskoi modeli molibdenovogo mestorozhdeniya. [Creation of a block geological and technological model of the molybdenum deposit. Trudy V Vserossiiskoi nauchnoi shkoly "Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh" [Proceedings of the V All-Russian scientific school "Mathematical research in the natural sciences"]. K&M Publ., Apatity, 156–163. (In Russian)
- Petrov, S. V.*, 2005. Metodologicheskie i terminologicheskie aspekty izucheniya form nakhozhdeniya zolota v rudakh [Methodological and terminological aspects of studying the forms of gold in ores]. *Obogashchenie rud [Enrichment of ores]* 2, 27–30. (In Russian)
- Petrov, S. V.*, 2015. O zavisimosti flotatsionnogo izvlecheniya platinoidov ot sodержaniya metallov v rude [Upon dependence of platinum-group metals flotation recovery on metals grade in ore]. *Obogashchenie rud [Enrichment of ores]* 5, 14–19. (In Russian)
- Petrov, S. V., Mishulovich, P. M., Smolensky, V. V.*, 2010. Printsipy sozdaniya blochnoi geologo-tekhnologicheskoi modeli mestorozhdeniya [Principles of creating a block geological and technological model of the field]. *Obogashchenie rud [Enrichment of ores]* 6, 34–38. (In Russian)
- Petruk, W.*, 2000. Applied mineralogy in the mining industry. Elsevier, Ottawa.
- Pirogov, B. I.*, 1988. Tekhnologicheskaya mineralogiya zheleznykh rud [Technological mineralogy of iron ores]. Nauka Publ., Leningrad. (In Russian)
- Rendu, J.-M.*, 2008. An introduction to cut-off grade estimation. SME, Littleton, Colorado, USA.
- Sidorenko, G. A., Aleksandrova, I. T., Petrova, N. V.*, 1992. Tekhnologicheskaya mineralogiya redkometal'nykh rud [Technological mineralogy of rare metal ores]. Nauka Publ., St. Petersburg. (In Russian)
- Sun, W., McDonough, W. F.*, 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications of Mantle Composition and Processes. Geological Society, London, Special Publications 42, 313–345.

- Vershinin, A. S., Vitkovskaya, I. V., Edel'shteyn, I. I., Varenaya, G. D.*, 1988. Tekhnologicheskaiia mineralogiia gipergennykh nikelevykh rud [Technological mineralogy of hypergenic nickel ores]. Nauka Publ., Leningrad. (In Russian)
- Vidy i posledovatel'nost' mineralogicheskikh issledovaniy dlia obespecheniia tekhnologicheskikh rabot. Metodicheskie ukazaniia NSOMMI MinGeo SSSR [Types and sequence of mineralogical studies for the provision of technological work. Methodical instructions of the NSOMMI (Scientific Council on Mineralogical Research Methods) MinGeo USSR], 1990. MinGeo Publ., Moscow. (In Russian)
- Zelenov V.I.*, 1989. Metodika issledovaniia zoloto- i serebrosoderzhashchikh rud [Methods for studying gold and silver-containing ores]. Nedra Publ., Moscow. (In Russian)

Received: April 2, 2018  
Accepted: March 18, 2019

Author's information:

*Pavel M. Mishulovich* — [mishulovichpm@polymetal.ru](mailto:mishulovichpm@polymetal.ru)  
*Sergey V. Petrov* — [petrov64@gmail.com](mailto:petrov64@gmail.com)