

УДК 622.73

Яковлев Виктор Леонтьевич

член корр. РАН,
главный научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: yakovlevt@igduran.ru

Кантемиров Валерий Данилович

кандидат технических наук,
заведующий сектором
Управления качеством минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukr@igduran.ru

Яковлев Андрей Михайлович

старший научный сотрудник,
сектор Управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: quality@igduran.ru

Титов Роман Сергеевич

старший научный сотрудник,
сектор Управления качеством
минерального сырья,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: ukrigd15@mail.ru

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
МЕТОДОВ РУДОПОДГОТОВКИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ****Аннотация:*

Дается оценка существующих методов управления качеством минерального сырья при добыче и возможные способы повышения их эффективности. Приведены критерии оценки рудного массива в зависимости от минерального и химического состава, структурных и других особенностей. Представлены результаты разработки методики районирования в карьерном пространстве технологических типов руд с учетом комплексной оценки качественных характеристик полезного ископаемого на основе современных геоинформационных технологий (ГИС). Для интерпретации данных в ГИС предлагается 2 основных метода: экспресс- и детальный методы, которые требуют предварительного создания геологической базы данных и позволяют достоверно производить оценку и районирование в карьере руд по качественным признакам. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого. Усовершенствование

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.095

Yakovlev Viktor L.

Corresponding Member of RAS,
Chief Researcher, Adviser of RAS,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075, Ekaterinburg,
58, Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: yakovlev@igduran.ru

Kantemirov Valery D.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Sector of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukr@igduran.ru

Yakovlev Andrey M.

Senior Researcher,
Sector of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
e-mail: quality@igduran.ru

Titov Roman S.

Ssenior Researcher,
Sector of quality management
of mineral raw materials,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: ukrigd15@mail.ru

**MAIN DIRECTIONS FOR IMPROVING
THE METHODS OF ORE PREPARATION
OF MINERAL RAW MATERIALS***Abstract:*

The article assesses the existing methods of quality management of mineral raw materials in mining as well as possible ways to improve their efficiency. It gives the criteria for assessing the ore mass depending on the mineral and chemical composition, structural and other features. The article presents the results of the development of the technique of zoning in the quarry space after technological types of ores, taking into account the complex assessment of the qualitative characteristics of the mineral based on modern geoinformation technologies (GIS). For the interpretation of data in GIS, two main methods are proposed: express method and detailed method, which require the preliminary creation of a geological database and allow reliable assessment and zoning in the ore quarry on qualitative characteristics. The methods differ in the complexity of implementation, detail and the ability to adjust the developed models depending on the established or changed requirements for the quality of the mineral. The improved mining and geological information system allows to zone technological types and grades of ores with high reliability in the quarry space, which contributes to the selection of the most

* Статья подготовлена по материалам НИР, выполняемой по программе фундаментальных научных исследований, тема №0405-2019-0005

иенствованная горно-геологическая информационная система позволяет с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд, что способствует на этапе планирования горных работ выбору наиболее эффективного способа рудоподготовки в режиме управления качеством руды для конкретных горно-геологических условий. Приведены примеры районирования технологических типов руд в карьерном пространстве и методологические подходы к выбору эффективных способов управления качеством минерального сырья в условиях ухудшающихся горно-геологических условий отработки месторождений и повышения требований к качеству продукции.

Ключевые слова: полезное ископаемое, горно-геологические условия разработки, качество руд, технологические типы руд, управление качеством, рудоподготовка, минералогический состав, блочное моделирование, ГИС, горно-геологическая информационная система

effective method of ore preparation in the ore quality management mode for specific mining and geological conditions at the stage of mining planning. Examples of zoning of technological types of ores in the quarry space and methodological approaches to the choice of effective ways to control the quality of mineral raw materials in the conditions of degrading mining and geological conditions of mining, and increasing requirements for product quality are given.

Key words: mineral, mining and geological conditions of development, ore quality, technological types of ores, quality management, ore preparation, mineralogical composition, block modeling, GIS, mining and geological information system

Снижение кондиций добываемого полезного ископаемого, ухудшение горно-геологических условий его разработки при одновременном росте требований к качеству минерального сырья, поступающего на обогатительный передел, является одной из современных тенденций совершенствования горнорудного производства [1, 2]. В этих условиях повышается значение инновационных методов управления качеством добываемого минерального сырья и научно обоснованного периодического перехода на новые эффективные технологии рудоподготовки с учетом изменяющихся геологических параметров и требований к качеству продукции.

Выбор технологий управления качеством минерального сырья производится по результатам оценки качественных характеристик полезного ископаемого (ПИ), выделения в рудном массиве на основе геологической информации природных типов руд, обоснования характеристик технологических типов руд и их районирования в карьерном пространстве с помощью геоинформационного моделирования.

Пространственное распределение типов руд и их количественное соотношение формируют стратегию отработки месторождения в режиме управления качеством минерального сырья [2, 3].

Природный (геологический) тип руды – руда, обладающая относительно устойчивыми минеральным составом, текстурой и структурой, специфическими физическими свойствами, имеющая достаточно четкую пространственную обособленность. Название природного типа руды дается на основе главных рудообразующих минералов.

Природная разновидность руды – руда, выделяемая на основе более мелких признаков: присутствия второстепенных и редких минералов, минералов – носителей полезных и вредных примесей, текстурно-структурных особенностей и др.

Технологический тип руды – руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа – возможность его раздельной добычи и переработки. Технологический тип подразделяется на сорта.

Технологический сорт руды – руда, имеющая общую для данного технологического типа схему переработки, но отличающаяся технологическими показателями переработки (например, извлечение, содержание металла в концентрате).

В настоящее время на ряде крупных месторождений руд черных металлов выделяется до 5 – 6 технологических сортов руды (АО «ЕВРАЗ КГОК»). Технологические

сорта одного и того же типа, как правило, перерабатываются совместно в определенных соотношениях. Технологический сорт может соответствовать природной разновидности руд в составе природного типа руды, отличающейся качеством.

Большинство технологических типов руд подвергается многостадийному обогащению перед подачей их на металлургическое производство, при этом ставится задача по максимальному извлечению ценного компонента в концентрат, которая более полно реализуется при раздельной добыче и обогащении типов и сортов руд [4, 5].



Рис. 1 – Схема выбора методов управления качеством руды

Методы управления качеством минерального сырья (рис. 1) для конкретных горно-геологических условий разработки месторождения подбираются на основе технико-экономической оценки следующих основных технологических операций:

- усреднение по нормируемым качественным параметрам добываемой руды с организацией в карьере усреднительных перегрузочных (аккумулирующих) складов или посредством организации управления рудопотоками в карьерном пространстве;
- разделение грузопотоков полезного ископаемого в карьере на отдельные потоки, отличающиеся по технологическим свойствам;
- при необходимости усреднение качественных показателей рудных потоков внутри технологических типов руд в целях формирования отдельных партий кондиционной руды для обогатительной фабрики;
- раздельная или селективная выемка и переработка руды, с организацией в карьере или на поверхности многокомпонентных перегрузочных складов (по технологическим типам добываемой руды), раздельная добыча с использованием циклично-поточной технологии (ЦПТ);
- предобогащение руды в карьере, на борту карьера или на отвале с отделением включений пустой породы или некондиционной руды (посредством грохочения, сухой магнитной сепарации и др.).

Выбор способа управления качеством рудного сырья производится при условии:

- если дисперсия показателей качества незначительна и представлена высокочастотной составляющей спектра (коэффициент вариации $v < 30\%$), то рассматривается возможность усреднения ПИ на усреднительных складах;

- если дисперсия показателей характеризуется коэффициентом вариации $v > 30\%$, то целесообразно оценить варианты раздельной добычи руды с отличительными качественными признаками.

Эффективность освоения запасов минерального сырья существенно зависит от достоверности геологической информации о параметрах залегания и природной изменчивости месторождений полезных ископаемых.

Большинство рудных месторождений залегают в сложной геологической обстановке в виде линз, жил и пластов переменной мощности. Тела ПИ во многих случаях имеют включения пустых пород или некондиционных руд разных размеров и формы, мощность и элементы залегания рудных тел меняются в широких пределах. В еще большей степени изменяется качественный состав ПИ. Имеет место закономерная или случайная зональность общего баланса минералов, высокая неравномерность их содержания и гранулометрического состава от сплошных до тонковкрапленных руд, которые связаны между собой сложными взаимопереходами.

В процессе разработки месторождения условия добычи и рудоподготовки постоянно меняются. На современном этапе механизации горных работ, больших скоростях перемещения фронта работ, трудоемкости процессов переработки минерального сырья изменчивость геологической среды оказывает решающее влияние на полноту и комплексность использования запасов, а также эффективность всех процессов добычи и последующих процессов переработки минерального сырья.

В связи с этим совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья, особенно при разработке глубокозалегающих сложноструктурных месторождений карьерами горно-обогатительных комбинатов, является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение [1].

Одним из направлений повышения эффективности рудоподготовки минерального сырья является широкое внедрение в практику планирования горных работ горно-геологических информационных систем (ГГИС), с помощью которых можно с высокой достоверностью районировать в карьерном пространстве технологические типы и сорта руд [6 – 8].

Для разработки методологических подходов по обоснованию систем управления качеством минерального сырья и отработке технологий и критериев районирования типов рудного сырья в карьерах сектором УКР ИГД УрО РАН проведены исследования на основе геологической базы данных Гусевогорского месторождения титаномагнетитов (ОАО «ЕВРАЗ КГОК»).

На рис. 2 представлены результаты районирования технологических типов руд в пределах гор. +160 м Северного карьера по разным методикам: по комплексному показателю обогатимости (содержанию железа в магнитной фракции проб и размеру вкрапленности); по показателю контрастности; по коэффициенту вариации качественных характеристик.

Сравнительный анализ прогноза распределения в карьере различных типов руд, выполненного по представленным методикам оценки, свидетельствует о достаточно схожих результатах районирования.

Комплексные исследования руд Гусевогорского месторождения показали, что малотитанистая их разновидность по сравнению с нормальнотитанистой имеет более высокую обогатимость и измельчаемость и меньшую магнитную жесткость. Учитывая большие отличия в обогатимости и измельчаемости малотитанистой и нормальнотитанистой разновидностей этих руд, целесообразно их выделить в разные технологические типы [9]. Таким образом, выделение технологических типов руд по содержанию TiO_2

имеет существенное значение при переработке этих руд. На рис. 3 представлена схема распределения в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2 .

Районирование титаномагнетитовых руд на Северном карьере ОАО «ЕВРАЗ КГОК» по:

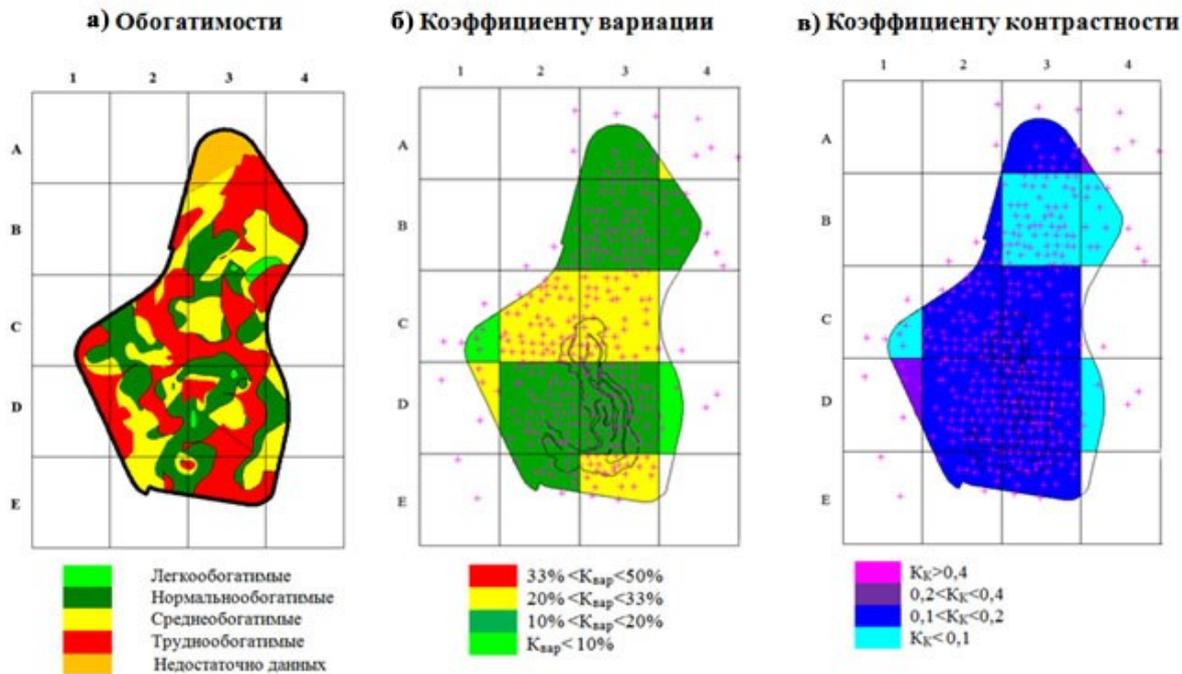
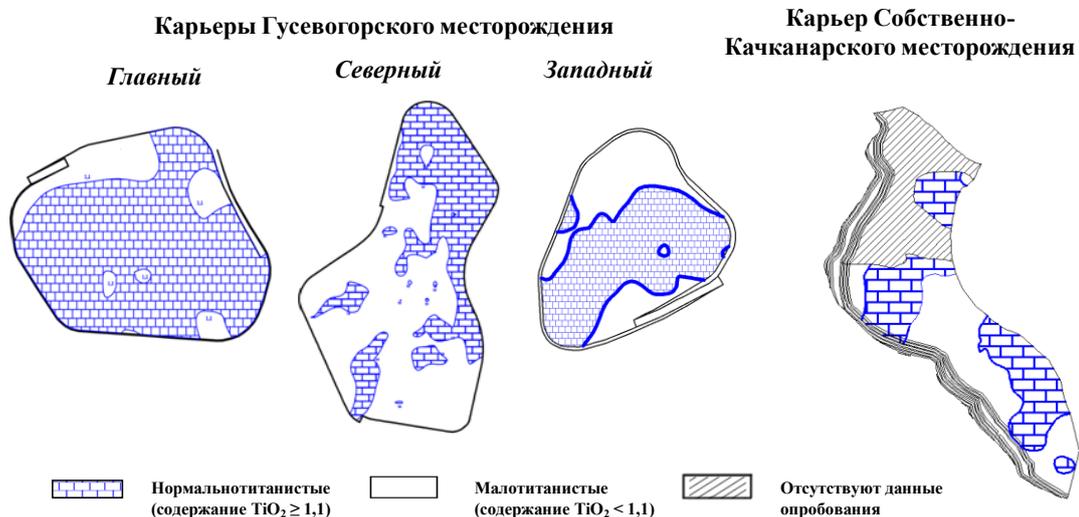


Рис. 2 – Районирование титаномагнетитовых руд на гор. +160 м Северного карьера ОАО «ЕВРАЗ КГОК» по разным критериям



Тип руды	Распределение типов руды по содержанию TiO_2 в карьерах ОАО "ЕВРАЗ КГОК"				
	Действующие карьеры				Проектный карьер
	Главный	Северный	Западный	Итого по действующим карьерам:	
Нормальнотитанистая (%)	83	30	62	54	52
Малотитанистая (%)	17	70	38	45	48
Добыча сырой руды (млн. т)	18,9	27,2	13,2	59,3	31

Рис. 3 – Распределение в карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» технологических типов руд по содержанию TiO_2

Руды Собственно-Качканарского месторождения имеют аналогичное распределение типов руды относительно содержания ценных компонентов.

Выбор системы управления качеством минерального сырья для конкретных горно-геологических условий открытой разработки ПИ состоит из последовательного решения взаимосвязанного блока задач с использованием разработанных методик оценки:

- выявления и районирования (геометризации) в карьерном пространстве технологических типов и сортов руд;
- выбора способа (комплекса способов в составе технологии) рудоподготовки в режиме управления качеством минерального сырья для установленного распределения в карьере типов и сортов руд;
- технико-экономической оценки предварительно принятой технологии (способа) управления качеством минерального сырья и корректировки принятых решений после оценки горно-геологических, технико-технологических, экологических и экономических факторов (получение эколого-экономического эффекта).

На рис. 4 представлена блок-схема методики геометризации в карьерном пространстве качественных характеристик руд.

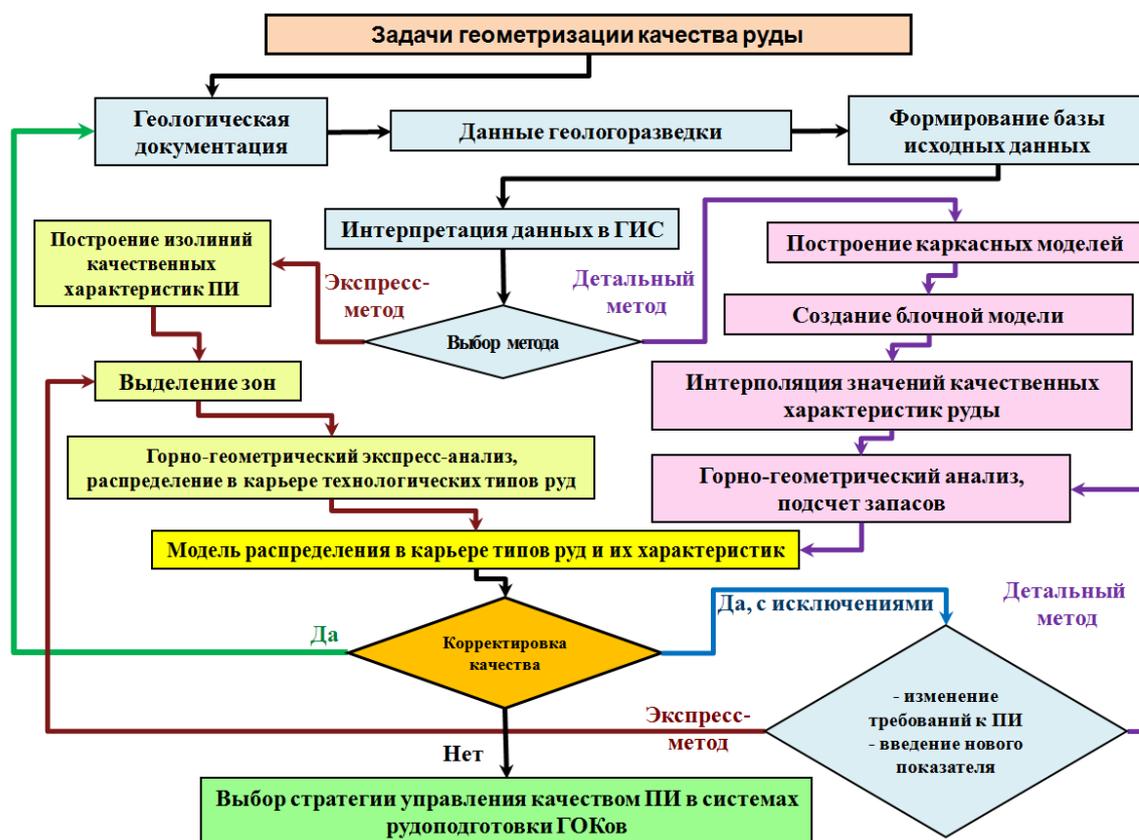


Рис. 4 – Блок-схема геоинформационной модели геометризации качественных характеристик руд

Краткое описание методики геометризации качественных характеристик руд:

1. Геометризация качественных характеристик руд производится с использованием программных продуктов ГГИС (GEOVIA Surpac, Mineframe, Datamine и др.) на основе сформированной базы исходных данных. База исходных данных для создания блочной модели в ГГИС формируется из данных детальной и эксплуатационной разведки месторождения (участков), геофизического исследования массива, результатов дополнительных минералогических и других исследований кернов горных пород.

2. Формирование базы исходных данных производится в форматах файлов программ Excel или Access. Производится оценка объема полученных данных и выбор метода их интерпретации в ГГИС для блочного моделирования.

3. Для интерпретации данных в ГГИС предлагается 2 основных метода: экспресс- и детальный методы. Оба метода требуют предварительного создания геологической базы данных и позволяют достоверно производить оценку и районирование в карьере руд по качественным признакам. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого.

На рис. 5 представлена блок-схема выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

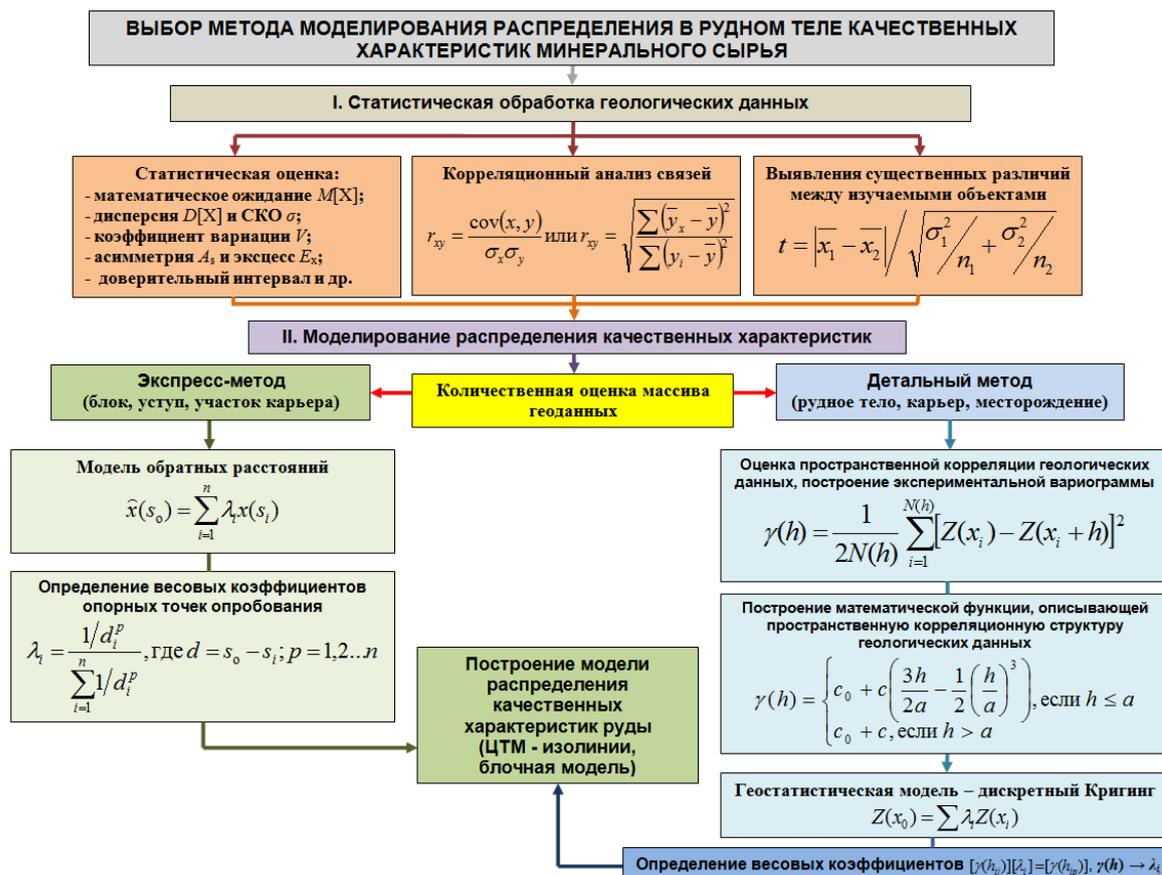


Рис. 5 – Блок-схема выбора метода геоинформационного моделирования качественных характеристик руд

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков их выполнения. Рекомендуется при сравнительно небольшом объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ), при большом объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригинга с линейной вариограммой).

Достоинства методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод позволяет оперативно в кратчайшие сроки (в полуавтоматическом режиме при непосредственном контроле оператора) получать представления об основных закономерностях пространственного размещения компонентов полезного ископаемого при минимальном количестве вычислительных операций;
- детальный метод позволяет в автоматическом режиме производить подсчет запасов на ПК ЭВМ, выделять технологические типы и сорта руд, минимизировать затраты

времени на представление результатов, производить моделирование параметров системы разработки, оценить календарный план и т. п.

Недостатки методов геоинформационного моделирования:

- экспресс-метод при изменениях исходных данных и требований к кондициям руд или критериям принадлежности руды к определенному технологическому сорту (содержание полезных и вредных компонентов и др.) предполагает трудоемкую ручную обработку изменившихся границ (параметров) зон районирования, а комплексный показатель качества потребует дополнительных расчетов на стадии корректировки геологической базы;

- детальный метод более трудоемкий, т. к. при его применении необходимо производить большой объем дополнительных исследований и вычислений (геостатистика, создание каркасных моделей, интерполяция в блочную модель и т.п.), а первоначальные затраты времени выше по сравнению с экспресс-методом в 5 – 10 раз.

4. Результатом моделирования обоими методами является модель распределения в карьерном пространстве качественных показателей технологических типов руд. Следовательно, оба метода имеют свои области применения в зависимости от постановки задачи и сроков ее выполнения, и при необходимости могут дополнять друг друга.

Полученная в результате геометризации информация является основой для выбора методов управления качеством минерального сырья с учетом требований к качеству сырья, подаваемого на обогатительную фабрику (ОФ). На рис. 6 представлена блок-схема выбора способа управления качеством руды.

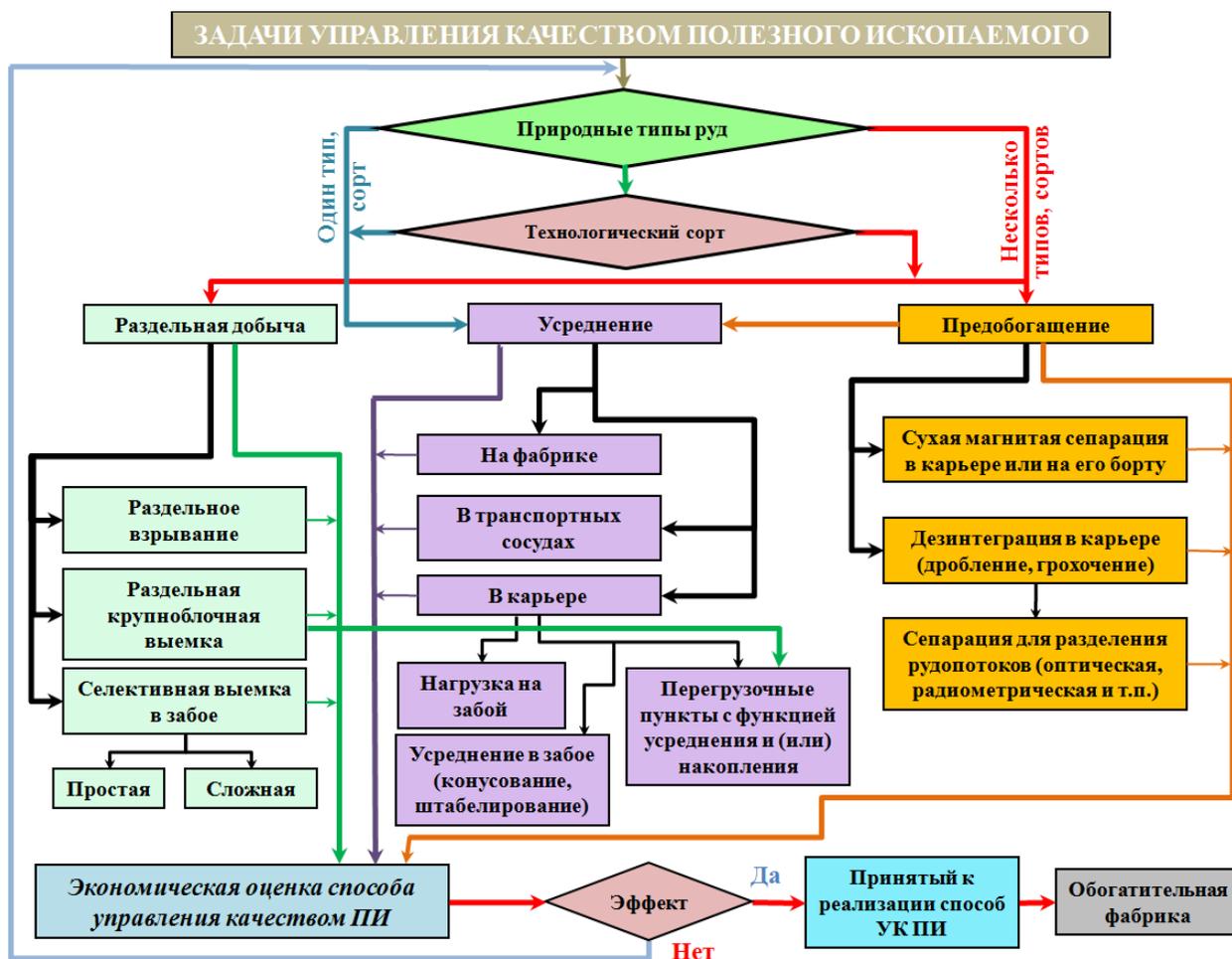


Рис. 6 – Блок-схема методики выбора способа управления качеством руды

Краткое описание методики

1. С учетом выделенных технологических типов (сортов) руд и требований ОФ выбираются способы и технические решения по управлению качеством при рудоподготовке в карьере.

Основные способы управления качеством минерального сырья: раздельная добыча технологических сортов ПИ, усреднение качественных характеристик, предобогащение.

2. Выбор способа и технических решений по управлению качеством рудного сырья производится с учетом ряда факторов, при этом определяющим является установленное количество технологических типов и сортов руды. На рис. 7 представлена схема с оценкой основных факторов, влияющих на выбор способа управления качеством минерального сырья.



Рис. 7 – Основные факторы, определяющие выбор способа управления качеством сырья

Экономическая оценка мероприятий по управлению качеством минерального сырья является необходимым элементом выбора технологий рудоподготовки.

На рис. 8 представлена схема основных факторов, определяющих эффективность внедрения на предприятии системы рудоподготовки с управлением качества минерального сырья.

Приведенные факторы оказывают разнонаправленное влияние на общий эффект от внедрения инновационного проекта по управлению качеством продукции.

Положительный результат оказывает увеличение выхода полезных компонентов и повышение качества продуктов обогащения (концентратов), оптимизацию режимов работы обогатительного оборудования, сокращение отходов производства, экологической нагрузки и платежей за счет комплексного использования сырья и выпуска дополнительной продукции.

Однако внедрение мероприятий по управлению качеством сырья одновременно связано с существенным усложнением организации горных работ по сравнению с валовой добычей, снижением производительности горного оборудования и увеличением выемочно-погрузочных и транспортных работ, возможное приобретение дополнительного дорогостоящего оборудования (сепараторы, GPS-навигация и т.п.) с организацией рабочих мест, рост эксплуатационных затрат, что должно учитываться при выборе технологии управления качеством при рудоподготовке перед обогащением.

Полный учет всех возможных плюсов и минусов от внедрения технологий управления качеством для условий конкретного предприятия производится в результате технико-экономических расчетов на основе положений методики оценки инвестиционных проектов [10, 11]. В соответствии с общемировой практикой допустимый дисконтированный коэффициент рентабельности инвестиций должен составлять не менее 10 – 15 %.

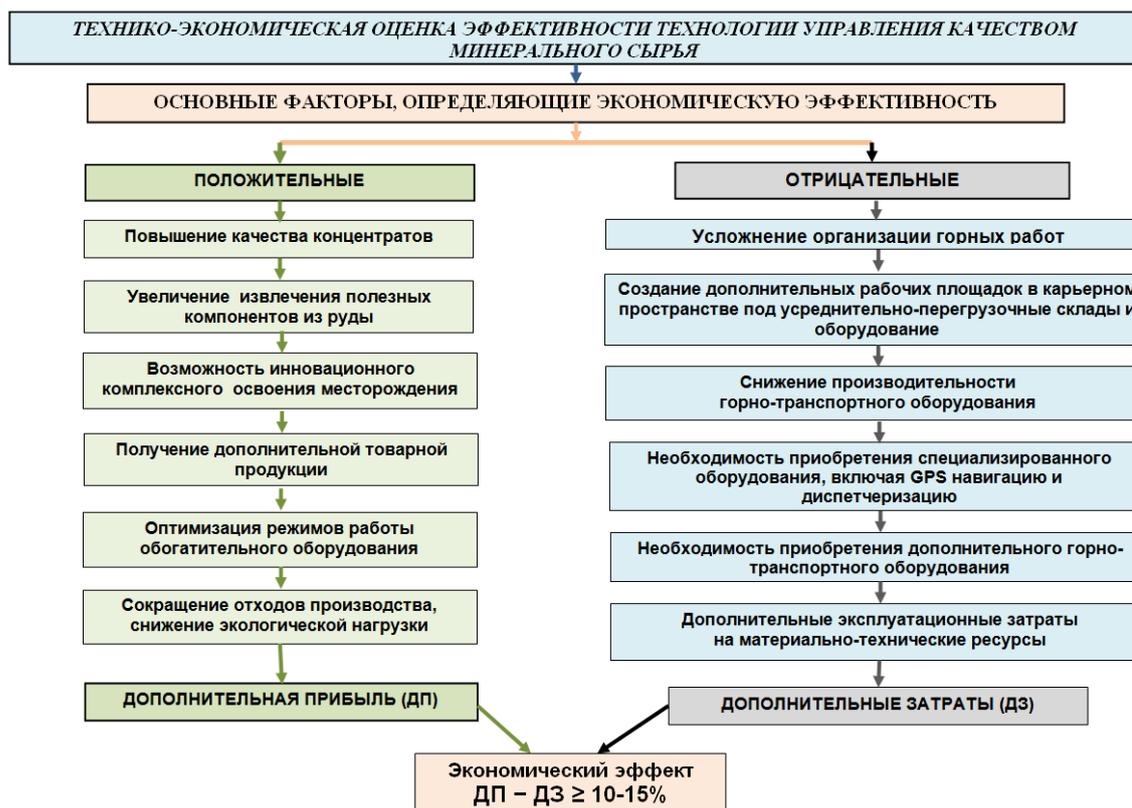


Рис. 8 – Схема основных факторов, определяющих экономическую эффективность от внедрения управления качеством минерального сырья

При невозможности обеспечить приемлемый экономический результат для данных условий и исходных данных необходимо повторно рассмотреть все возможные варианты при выборе способа управления качеством минерального сырья, начиная с формирования базы исходных данных и далее в соответствии с положениями, изложенными выше.

Выводы

1. Первым этапом разработки систем управления качеством минерального сырья является всестороннее изучение качественных характеристик ПИ, в том числе по данным геологоразведки, лабораторных исследований, результатов опытно-промышленных экспериментов и промышленной эксплуатации месторождений.

2. Следующим этапом является моделирование качественных характеристик полезного ископаемого с помощью ГИС технологий (программных комплексов типа GEOVIA Surpac и др.), включая блочное моделирование и геометризацию параметров объектов (рудных тел, распределения в рудном теле рудообразующих минералов, показателя обогатимости, контрастности, засоренности, содержания ценных компонентов и др.).

Основной целью этого этапа является выделение природных и технологических типов и сортов руд и их районирование в карьерном пространстве. При этом на этапе планирования горных работ закладываются основные стратегические решения по обработке месторождения в режиме управления качеством продукции.

3. Основные способы управления качеством минерального сырья: раздельная добыча технологических сортов ПИ, усреднение качественных характеристик, предобогащение в карьерном пространстве.

Для конкретных горно-геологических условий месторождения технологии рудо-подготовки включают следующие технологические операции:

- разделение грузопотоков полезного ископаемого в карьере на отдельные потоки, отличающиеся по технологическим свойствам; при необходимости усреднение качественных показателей рудных потоков внутри технологических типов руд в целях формирования отдельных партий кондиционной руды для поставки на ОФ;

- раздельная или селективная выемка и переработка руды, с организацией в карьере или на поверхности многокомпонентных перегрузочных складов (по технологическим типам руд);

- раздельная добыча с использованием ЦПТ;

- усреднение по нормируемым качественным параметрам руды (содержанию ценных компонентов, количеству вредных примесей и др.) с организацией в карьере усреднительных перегрузочных (аккумулирующих) складов или посредством организации управления рудопотоками в карьерном пространстве;

- предобогащение руды в карьере, на борту карьера или на отвале с отделением включений пустой породы или некондиций (посредством грохочения, сухой магнитной сепарации и др.).

- комплексная технико-эколого-экономическая оценка эффективности мероприятий по управлению качеством минерального сырья на ГОКе.

4. Систему управления качеством минерального сырья необходимо предусматривать от забоя до обогатительной фабрики. При этом эффективное управление качеством рудоподготовки может быть основано на следующих принципах:

- постоянное уточнение данных о качественных характеристиках ПИ по результатам эксплуатационной разведки, магнитного каротажа буровых скважин, химического анализа сырья на всех стадиях его переработки и др., внедрение инновационных методов для уточнения и расширения сведений о качественных характеристиках ПИ;

- использование ГИС при планировании горных работ (годовом, месячном, недельно-суточном, сменном), непрерывное пополнение ГИС уточненными данными о ПИ;

- управление порядком взрывания обуренных блоков ПИ; GPS-позиционировании экскавации (траекторией ковша и положением экскаватора в забое) и навигации транспортирования (с учетом качества сырья в транспортных сосудах);

- внедрение систем АСУ для автоматизированного управления грузопотоками в карьере с учетом качества сырья (управление качеством рудопотоков).

Разработка современных инновационных технологий управления качеством минерального сырья позволит решать задачи моделирования отрабатываемых рудных тел и выемочных единиц, планирования горных работ и стабилизации качественных показателей руды перед подачей ее на обогащение.

Предусмотренные проектом параметры способов управления качеством поставляемой на обогатительную фабрику рудной массы при нарастании (изменении) информации о закономерностях распределения в карьерном пространстве участков залежей с различными геологическими и технологическими характеристиками подлежат периодическому уточнению, корректировке, т. е. переходу к новым параметрам технологических процессов добычи, рудоподготовки и обогащения с учетом более полного извлечения основных и попутных компонентов полезных ископаемых конкретного месторождения.

Литература

1. Яковлев В.Л. Закономерности развития горного дела / В.Л. Яковлев, С.А. Батугин. - Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. - 114 с.

2. Яковлев В.Л. Особенности методологического подхода к обоснованию стратегии освоения сложноструктурных месторождений на основе исследования переходных процессов / В.Л. Яковлев // Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр Севера: ГИАБ. - Специальный выпуск. - № 30. - М.: Горная книга, 2015. - С. 22 - 35.

3. Бастан П.П. Смешивание и сортировка руд / П.П. Бастан, Н.К. Костина. – М.: Недра, 1990. – 168 с.
4. Козин В.З. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов: учебник / В.З. Козин, О.Н. Тихонов. — М.: Недра, 1990. — 344 с.
5. Гальянов А.В. Рудоподготовка на карьерах (Вопросы теории и практики) / А.В. Гальянов, Ю.В. Лаптев. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 426 с.
6. Яковлев В.Л. Инновационный базис стратегии комплексного освоения ресурсов минерального сырья / Под ред. член-корр. РАН В.Л. Яковлева; В.Л. Яковлев, С.В. Корнилков, И.В. Соколов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2018. – 360 с.
7. Корнилков С.В. Выделение технологических типов руд Гусевогорского месторождения титаномагнетитов методами геоинформационного моделирования и предварительной оценки их обогатимости / С.В. Корнилков, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Проблемы комплексного освоения георесурсов 25 - 27 сент. 2018 г.: Материалы VII международ. научн. конф. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2018. [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://www.e3s-confeences.org/articles/e3sconf/abs/2018/31/e3sconf_pcdg2018_03014/e3sconf_pcdg2018_03014.html, DOI: 10.1051/e3sconf/20185603014.
8. Кантемиров В.Д. Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья / В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Проблемы недропользования. - 2016. - № 4. – С. 170 – 176. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.170
9. Раздельная переработка руд Гусевогорского месторождения / С.В. Корнилков, А.Н. Дмитриев, А.Е. Пелевин, А.М. Яковлев // Горный журнал. – 2016. – № 5. – С. 89 - 90. DOI: 10.17580/gzh.2016.05.12
10. Корнилков С.В. Железородные месторождения Приполярного Урала как перспективная сырьевая база уральской металлургии / С.В. Корнилков, В.Д. Кантемиров // Изв. вузов. Горный журнал. – 2015. - № 8. – С. 22 - 28.
11. Кантемиров В.Д. Оценка влияния минерального состава титаномагнетитовой руды на результаты магнитного обогащения / В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, А.М. Яковлев // Обогащение руд. - 2017. – № 4. – С. 36 - 40.