

На правах рукописи



Яковлев Андрей Михайлович

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ГОРНЫХ РАБОТ В
РЕЖИМЕ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ СЫРЬЯ**

Специальность:

25.00.35 – «Геоинформатика»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

Научный руководитель:

Корнилков Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Лапин Сергей Эдуардович, доктор технических наук, доцент кафедры Информатики и компьютерных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Уральский государственный горный университет"

Бурмин Леонид Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Цифровых технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кемеровский государственный университет"

Ведущая организация:

Горный институт – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (**ГоИ КНЦ РАН**), г. Апатиты

Защита состоится **10:00 30 сентября 2022** года на заседании объединенного диссертационного совета Д **004.010.02** на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620075, г. Екатеринбург, тел/факс: **8(343)350-50-51**; e-mail: [**direct@igduran.ru**](mailto:direct@igduran.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИГД УрО РАН ([**http://diss.igduran.ru**](http://diss.igduran.ru)).

Просьба направлять отзывы почтой в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по указанному выше адресу и на электронный адрес: [**panzhin@igduran.ru**](mailto:panzhin@igduran.ru)

Автореферат диссертации разослан **"29" августа 2022** г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат технических наук



А.А. Панжин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Управление качеством минерального сырья является важным этапом современных процессов горного производства, особенно это важно для освоения новых сложноструктурных месторождений и действующих горных предприятий при изменении горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых в динамике развития горных работ, ужесточении требований к полноте извлечения полезных компонентов, качеству получаемой из минерального сырья продукции. Все это требует современных подходов к ведению горного дела с применением новейших методик геоинформационного моделирования и автоматизированного планирования при минимальных финансовых и временных затратах.

Для обеспечения полноты извлечения и стабилизации качества извлекаемого минерального сырья с доведением его до уровня товарной продукции на действующих предприятиях используются методики компьютерного моделирования горно-геологических объектов и автоматизированной оценки запасов месторождений на основе зарубежных и частично отечественных горно-геологических информационных систем (ГГИС).

Вместе с тем при планировании горных работ в недостаточной мере учитывается изменчивость качественных показателей. Поэтому учет изменчивости свойств рудного массива при планировании горных работ является важной и актуальной задачей. В работе предложены методики построения и адаптации моделей месторождения, которые служат основой для решения задач: подсчета запасов, проектирования предприятия, планирования горных работ, обоснования кондиций, нормирования потерь, расстановки технологического оборудования в режиме управления качеством.

Целью работы является разработка методик районирования карьерного пространства и геоинформационного обеспечения при планировании горных работ с формированием заданных объемов минерального сырья требуемого качества на базе блочного моделирования.

Идея работы заключается в создании унифицированных геоинформационных моделей для выбора оптимальной системы управления качеством на основе учета изменчивости качественных показателей минерального сырья сложноструктурных месторождений при проектировании и планировании горных работ.

Объектом исследования является геопространственное размещение качества полезного ископаемого в недрах как база для обоснования технологий рудоподготовки при планировании горных работ.

Предметом исследования являются методики геоинформационного моделирования и накопления геологических баз данных, а также формирования компьютерных моделей размещения качества минерального сырья, основанных на выявленных закономерностях изменчивости горных руд и пород месторождений применительно к календарному планированию открытых горных работ.

Задачи исследований:

1. Произвести анализ и оценку применяемых систем управления качеством на крупных железорудных ГОКах, изучить вопрос состояния теоретических исследований и практических разработок по управлению качеством на разных стадиях планирования горных работ.
2. Систематизировать способы управления качеством в зависимости от горно-геологических условий месторождения.
3. Адаптировать структуру базы данных детальной и эксплуатационной разведки месторождения, как основу для компьютерного моделирования и предварительной автоматизированной оценки.
4. Разработать экспресс-методику районирования технологических типов руд в карьерах с учетом комплексной оценки качественных характеристик полезного ископаемого.
5. Разработать методику оценки пространственной изменчивости качественных характеристик минерального сырья в динамике развития горных работ.
6. Разработать методику геоинформационного обеспечения перспективного и текущего планирования открытых горных работ в режиме управления качеством.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Обоснование способа управления качеством на различных этапах прогноза развития горных работ осуществляется на основании геопространственной оценки изменчивости коэффициентов вариации содержания полезных и вредных компонентов минерального сырья по глубине и площади рудного тела, при этом, селективная выемка природных типов и сортов руд выбирается по пороговому значению коэффициента вариации, превышающему 0,3.
2. Обоснование подходов к управлению рудопотоками на участках карьера в режиме управления качеством достигается изменением высоты выемочного слоя и шага подвигания горных работ, способа выемки, усреднения или предобогащения, осуществляемых на основании анализа изменчивости качества по предложенной методике районирования природных и технологических типов руд.
3. Информационное обеспечение планирования горных работ обеспечивается созданием совокупности блочных, каркасных и матричных динамических моделей, учитывающих неоднородность распределения показателей качества минерального сырья и обеспечивающих достижение заданных показателей по объемам и содержанию оцениваемых компонентов в геопространстве и времени.

Научная новизна исследования заключается в:

- целенаправленном системном геоинформационном моделировании различных горно-геологических условий, как базы для оценки и рационального комплексного использованию запасов месторождений;
- выборе способа управления качеством минерального сырья на основе

экспресс-оценки и автоматизированного поиска перспективных для управления качеством участков рабочей зоны карьера;

– разработке методики геоинформационного обеспечения процессов планирования горных работ, основанной на вероятностно-статистическом анализе изменчивости качественных характеристик, обеспечивающей гибкое поэтапное принятие технологических решений.

Практическая значимость исследования состоит в разработке комплекса методик, адаптирующих геологические базы данных к решению задач управления качеством минерального сырья, используемых различными программными системами, в т.ч. авторской. Выработан алгоритм анализа распределения качества руд в недрах, как основа технологических подходов к его стабилизации, разработаны основные блоки методики планирования открытых горных работ в режиме формирования рудопотоков заданного качества.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью постановки задач и применяемых методов исследования, достаточным объемом проанализированной информации и изученных статистических данных, аргументированной обоснованностью теоретических выводов и практических рекомендаций, сходимостью результатов моделирования и фактического распределения качественных характеристик в массиве горных пород.

Реализация результатов исследования. Разработанные модели, алгоритмы и методики: по геоинформационному моделированию месторождений или его участков; планированию горных работ; системам рудоподготовки; обработки данных - применяются при проведении фундаментальных исследованиях, выполняемых в рамках ГОСЗАДАНИЯ ИГД УрО РАН, а также прикладных НИР по Качканарскому, Костомукшскому, Качарскому и др. месторождениям.

Личный вклад автора состоит в постановке задач и поиске методов решения, сборе, обработке, анализе и интерпретации данных, разработке алгоритмов, элементов программного обеспечения и методик геоинформационного моделирования разнородных данных для выбора рационального способа управления качеством, в создании методики накопления геологических баз данных, построении компьютерных моделей, разработке усовершенствованной методики компьютерного планирования горных работ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: XIV-XVI Уральской горнопромышленной декаде (Екатеринбург, 2016-19), V-VII Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии» (Екатеринбург, 2016-22), X-XVI научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Екатеринбург, 2009-22), V Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем» (Казань, 2016), ученом совете ИГД УрО РАН.

Методы исследований: анализ и обобщение литературных источников,

методы математической статистики и корреляционного анализа, расчетно-аналитическое и горно-геометрическое компьютерное моделирование с применением горно-геологических информационных систем, дедукция, абстрагирование, программирование, компьютерная визуализация, вычислительный эксперимент.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 19 работах, в том числе 9 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и приложения, изложенных на 152 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунка, 28 таблиц, список литературы из 88 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе показана тенденция к снижению содержаний полезных компонентов и запасов минерального сырья месторождений, возрастанию доли труднообогатимых руд и ухудшению горно-геологических условий их добычи. Для повышения полноты и комплексности добычи запасов полезных ископаемых предыдущими исследованиями был разработан комплекс алгоритмов, методик и методов для прогноза распределения качественных характеристик в недрах, геометризации месторождений, способам управлению качеством и автоматизированному планированию. Вопросы усреднения и рудоподготовки руд решались в трудах проф., д.т.н. П.П. Бастана, П.Э. Зуркова, М.В. Васильева, Е.И. Азбеля, В.Н. Зарайского, Г.Г. Ломоносова, В.И. Ревнивцев, Я.М. Адигамов, А.А. Гармаш, А.Д. Школьников, А.А. Ещенко, В.В. Осмоловский, С.С. Резниченко, Л.П. Соколов, Г.В.Секисов, Ю.В. Лаптев и другие. Основоположниками геометризации месторождений и обоснования плотности геологоразведочной сети являются: проф., д.т.н. В.А.Букринский, Г.И.Вилесов, В.М.Гудков, В.В.Ершов, В.И.Кузьмин, А.М.Осецкий, П.А.Рыжов, Е.П.Тимофеев, И.Н.Ушаков, И.В.Францкий, Е.Ф.Фролов, Б.И.Беляев, В.М.Калинченко, Ю.В.Коробченко, Л.И. Четвериков, А.В. Гальянов и др. Вопросами развития теории проектирования карьеров, установлением оптимальных параметров режима горных работ, геоинформационного обеспечения проектирования и планирования карьеров занимались и занимаются ведущие ученые: акад. В.В. Ржевский, Н.В. Мельников, К.Н. Трубецкой, М.И. Агошков, проф., д.т.н. А.И. Арсентьев, Е.Ф. Шешко, В.С. Хохряков, М.Г. Новожилов, Б.П. Юматов, И.Б. Табакман, С.С. Резниченко, С.Д. Коробов, В.Г. Близнюков, В.Л. Яковлев, В.М. Аленичев, В.И. Суханов, В.М. Шек, С.С. Кубрин, С.В. Шаклеин, С.В. Корнилов, Ю.Е. Капутин, О.В. Наговицын, Pildes R., David M., Rendu J.M. и другие.

Анализ и систематизация технологических процессов на ведущих железорудных ГОКах России позволили установить современные подходы и основные тенденции совершенствования процессов моделирования и рудоподготовки (рис. 1). Установлено, что на всех рассмотренных предприятиях функционируют схожие системы управления качеством и применяются горно-

геологические информационные системы (ГГИС), в которых решаются задачи моделирования рудных тел и выемочных единиц, диспетчеризации, планирования горных работ и стабилизации качественных показателей, при этом в ГГИС используется комплекс однотипных моделей: каркасных и блочных.

Установлены основные направления совершенствования методик моделирования полезных ископаемых: повышение их достоверности, интеграция и автоматизация процесса пополнения данных в модели по результатам опробования, совершенствование алгоритмов геостатистических и геологических представлений о горном массиве. Отмечено, что при планировании в ГГИС в недостаточной мере учитывается изменчивость качественных показателей. В то же время анализ литературных источников свидетельствует, что изменчивость качества и однородность формируемых при планировании рудопотоков определяется способом его стабилизации.

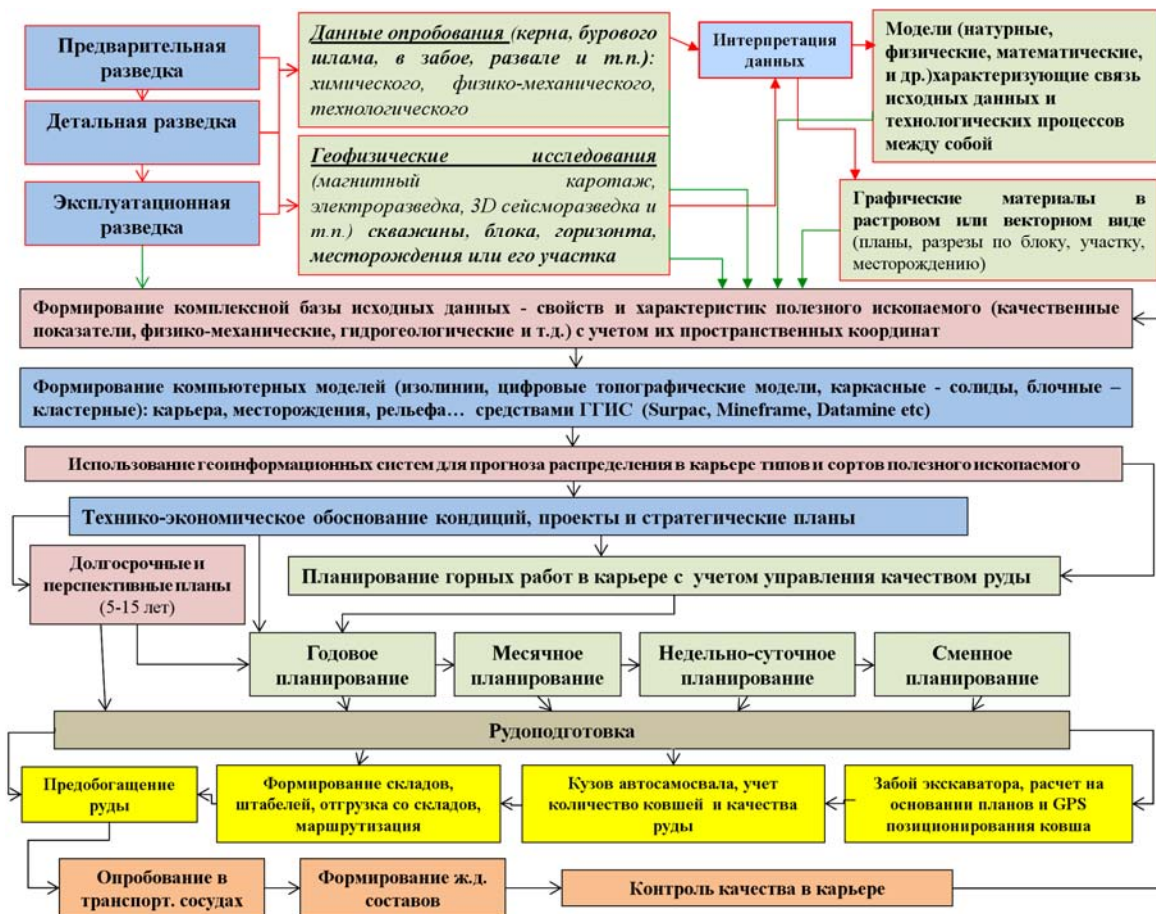


Рисунок 1 – Принципиальная схема взаимосвязи данных разведки, моделирования, планирования и технологий управления качеством в железорудных карьерах

Во второй главе обоснованы подходы к выбору способа управления качеством руд на различных этапах развития горных работ. Установлено, что выбор способа рудоподготовки в режиме управления качеством минерального сырья для установленного распределения в карьере типов и сортов полезного ископаемого производится по результатам геометризации. Основные способы управления качеством минерального сырья в систематизированном виде

приведены на рисунке 2.

Принятая оценка и выбор способа управления качеством в зависимости от значения коэффициента вариации основаны на результатах исследований проф. П.П.Бастана, а формы вероятностного распределения качественных показателей в исследуемом объеме, а также средневзвешенные значения содержаний полезных и вредных компонентов ложатся в основу методики оценки изменчивости при создании геоинформационного обеспечения планирования горных работ.

Обоснование способа управления качеством определяется оценкой его колеблемости. Усреднение руды на складах и в рудопотоке рекомендуется, если дисперсия показателей качества незначительна и коэффициент вариации $v < 30\%$. Раздельная добыча руды с выделением природных типов и технологических сортов рациональна при значении коэффициента вариации $v > 30\%$.



Рисунок 2 – Блок-схема применения способов управления качеством руды в зависимости от количества природных (технологических) типов и сортов

Реализованная в разработанном программном продукте компьютерная оценка формы вероятностного распределения качественного показателя в изучаемом объеме также влияет на выбор подхода к управлению качеством. При наличии двух пиков (бимодального), формы типа – «плато» или «распределения с изолированным пиком» требуется применение селективной выемки, либо выделение сортов, раздельной добычу или взрывания.

При адаптации геологической базы данных для предварительной оценки изменчивости качества минерального сырья предложены подходы к районированию технологических типов руд. Районирование руд в зависимости

от масштаба оцениваемого объекта предлагается осуществлять, используя представленные на рисунке 3 методические подходы: экспресс-метод (блок, уступ) с построением изолиний качества и выделением зон, характеризующих различные технологические типы и сорта руд, а при детальном моделировании (рудное тело, карьер, месторождение) с созданием блочной модели для разветвленных автоматизированных горно-геометрических расчетов. Оба метода при необходимости могут дополнять друг друга.

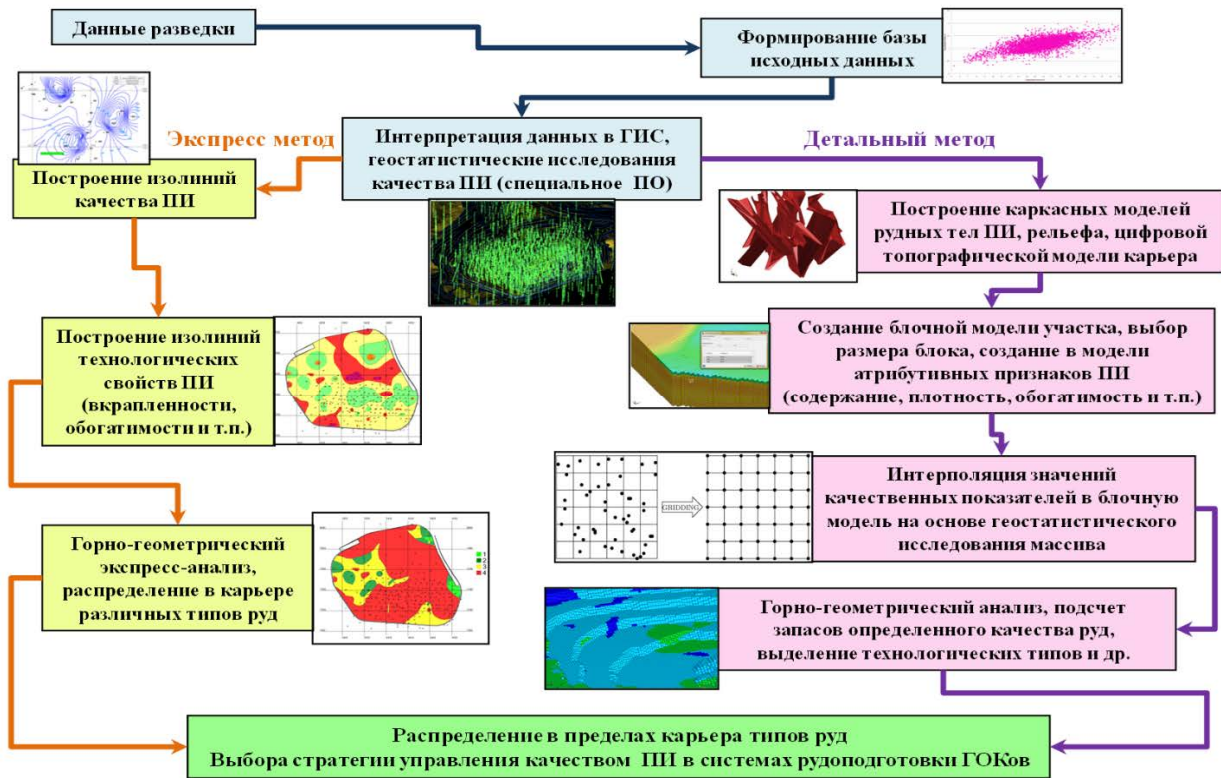


Рисунок 3 – Блок-схема методики геометризации качественных характеристик

При оценке влияния порядка отработки на изменчивость качественных показателей исходными данными являются блочная модель месторождения, производительность карьера и требования фабрики к исходному сырью. Расчеты осуществляются по разработанному программному обеспечению, позволяющему прогнозировать изменчивость качества по периодам планирования. Оценке подлежат прогнозируемые положения горных работ в соответствии с вычисленной скоростью подвигания, описываются замкнутыми полилиниями или полигонами. Моделирование осуществляется погоризонтно или подуступами. Координаты промежуточных положений горных работ для каждого этапа отработки хранятся в соответствующих слоях файла формата .dxf. Подсчет объемов и качества между смежными положениями горных работ для каждого этапа отработки является основанием для выбора способа управления качеством на основе ранее обоснованных критериев колеблемости.

В результате таких оценок осуществляется выбор оптимальной стратегии освоения месторождения, обеспечивающей не только достижение минимального

коэффициента вскрыши, но и стабилизацию изменчивости качественных показателей при заданном средневзвешенном содержании.

На основании изложенного сформулировано первое научное положение, суть которого заключается в том, **что обоснование способа управления качеством на различных этапах прогноза развития горных работ осуществляется на основании геопространственной оценки изменчивости коэффициентов вариации содержания полезных и вредных компонентов минерального сырья по глубине и площади рудного тела, при этом, селективная выемка природных типов и сортов руд выбирается по пороговому значению коэффициента вариации, превышающему 0,3.**

Установлено, что геологическая база данных, где хранятся пространственные и атрибутивные данные скважинного опробования, является первым этапом формирования модели месторождения, в то же время она позволяет производить первичную оценку для выработки стратегии ведения горных работ с учетом изменчивости качественных показателей. На рисунке 4 показано функционально и технологическое назначение геологической базы данных при создании геоинформационного обеспечения планирования горных работ.



Рисунок 4 – Геологическая база данных как первичное звено при моделировании месторождений и источник первичных оценок

Желтым цветом выделены блоки, характеризующие назначение разработанных микропрограмм на языке Python по анализу данных геологической базы и её адаптации, которые позволяют:

- определить приоритетные участки для заложения первоначальных капитальных и разрезных траншей с целью скорейшего окончания периода горно-капитальных работ и обеспечения при этом требуемых показателей качества руды;

- произвести прогнозную оценку изменчивости качества при различных вариантах подвигания фронта, что позволяет выбрать стратегию освоения месторождения и оптимальный режим горных работ на его участках;
- произвести расчет изменчивости качества для различных вариантов высоты выемочного слоя при переходе на отработку подступами,
- обосновать необходимость селективной отработки по сортам или типам, принять решение о применяемом способе рудоподготовки и уточнении качественных показателей в случае существенного увеличения вариабельности данных.

Моделирование при экспресс-оценке и поиске перспективных для управления качеством участков производится на основании совокупной оценки качества, изменчивости, а также степени разведанности месторождения. Исходными данными для экспресс-оценки являются: интервальная таблица с данными качества, а также таблица координатной привязки устьев разведочных скважин.

На примере Собственно-Качканарского месторождения установлено, что значения содержания титана и ванадия будут иметь повышенные значения, если отработку месторождения вести с запада на восток, но более рациональной с точки зрения значений минимальных коэффициентов вариации является отработка с севера на юг - вкрест разведочным профилям. Анализ показал, что коэффициенты вариации качественных показателей в этом случае менее 30%, поэтому для стабилизации качества руды рекомендуется использовать внутрикарьерные перегрузочные склады с функцией усреднения.

Для условий Серовского месторождения, на основании использованной экспресс-методики моделирования и анализа качественных показателей руд, выделено и районировано 2 природных и 3 технологических типа. С позиций снижения вариабельности качества добываемых руд обоснованы первоочередные места заложения вскрывающих выработок и общий порядок отработки.

Аналогичные по составу работ расчеты выполнены для Собственно-Качканарского месторождения. Геоинформационный анализ показывает, что распределение коэффициентов вариации ванадия в площади месторождения зависит от шага подвигания (годовой скорости) 100, 300 и 500 м/год (рисунок 5).

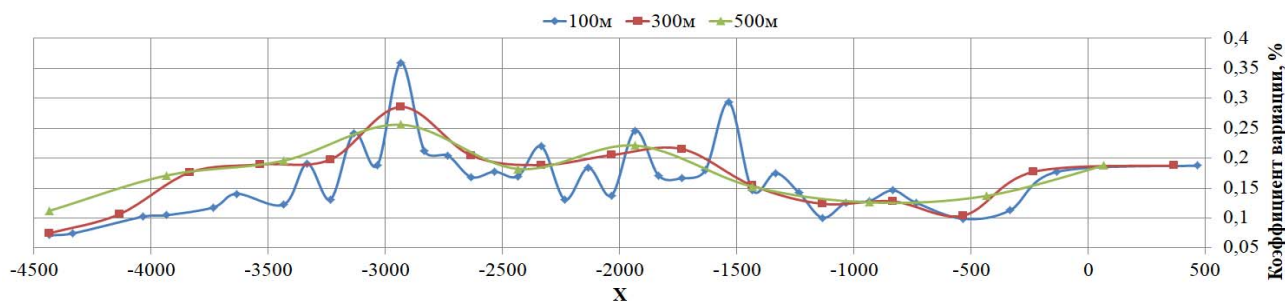


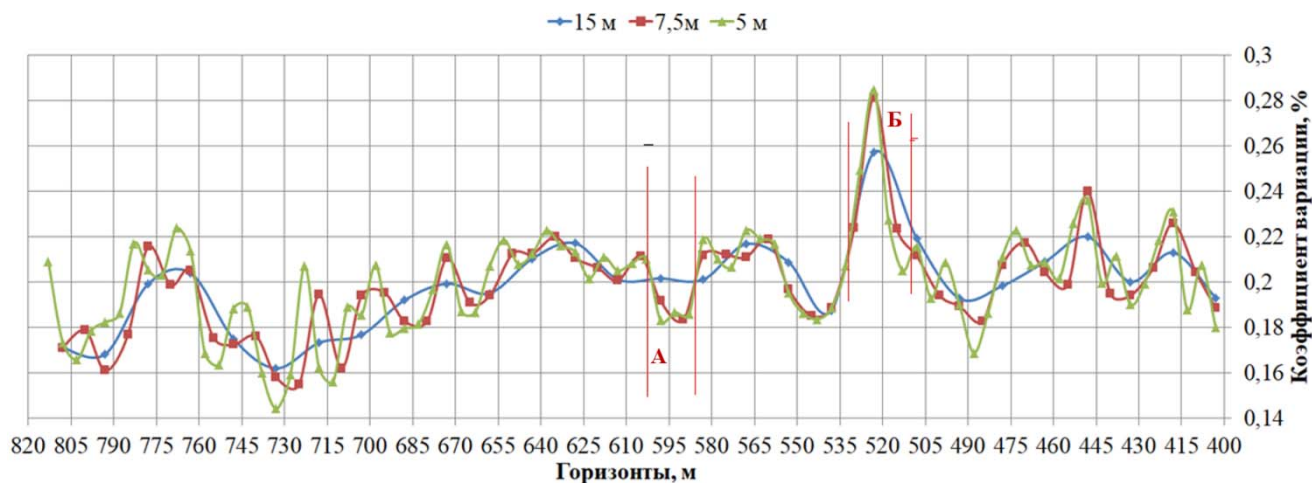
Рисунок 5 – Распределение коэффициентов вариации ванадия при ориентации фронта горных работ вдоль короткой оси - X.

До отметки (-4500...-3300) коэффициент вариации минимален при минимальной скорости подвигании фронта работ, поэтому для выдерживания минимальной колеблемости концентрации ванадия в добываемых рудах на этом участке залежи шаг подвигания фронта следует держать минимальным, а требуемую производительность по полезному ископаемому обеспечивать за счет увеличения скорости понижения горных работ.

Экспресс-оценки при изучении изменчивости качества по глубине объекта связаны с изменением мощности выемочного слоя (уступа/подступа). Для реализации экспресс-оценок вариабельности качества исходная геологическая база данных проходит ряд трансформаций:

- детализация скважинных проб методом «вниз по скважине»;
- итеративная оценка изменчивости для различных значений высоты выемочного слоя;

Результаты работы представлены на рисунке 6.



Распределение коэффициентов вариации содержания ванадия на горизонтах.

А - Участок, где более рационально использовать технологию подступов

Б - Участок, где необходимо рассмотреть целесообразность выделения различных природных типов или сортов руд

Рисунок 6 – Результаты работы методики выделения рудных интервалов с разным коэффициентом вариации методом усреднения профильных содержаний в зависимости от применяемой высоты уступа и направления развития горных работ

Анализ рисунка 6 свидетельствует о том, что вариация качества отрабатываемых руд снижается на ряде участков месторождения за счет перехода на отработку подступами (участок А). В свою очередь (участок Б) существенное увеличение вариабельности данных свидетельствует о необходимости его селективной отработки по сортам или типам.

Таким образом, методика экспресс-оценки является основанием для совокупной оценки качества руд, их изменчивости, разведанности. Результатом являются рекомендации по выбору рационального способа отработки конкретного участка фронта горных работ: валовая или селективная выемка, раздельная добыча, деление участков на подступы для получения требуемого значения содержания при минимальной дисперсии.

Таким образом, *обоснование подходов к управлению рудопотоками на участках карьера в режиме управления качеством достигается изменением*

высоты выемочного слоя и шага подвигания горных работ, способа выемки, усреднения или предобогащения, осуществляемых на основании анализа изменчивости качества по предложенной методике районирования природных и технологических типов руд.

В третьей главе обоснована методика создания геоинформационного обеспечения для перспективного и текущего планирования открытых горных работ в режиме управления качеством (рис. 7), включающая вопросы порядка создания геоинформационной базы, формирования динамических матричных и блочных моделей погоризонтных планов для планирования горных работ и создания основы для формирования цифровых двойников отработки эксплуатационных горизонтов.

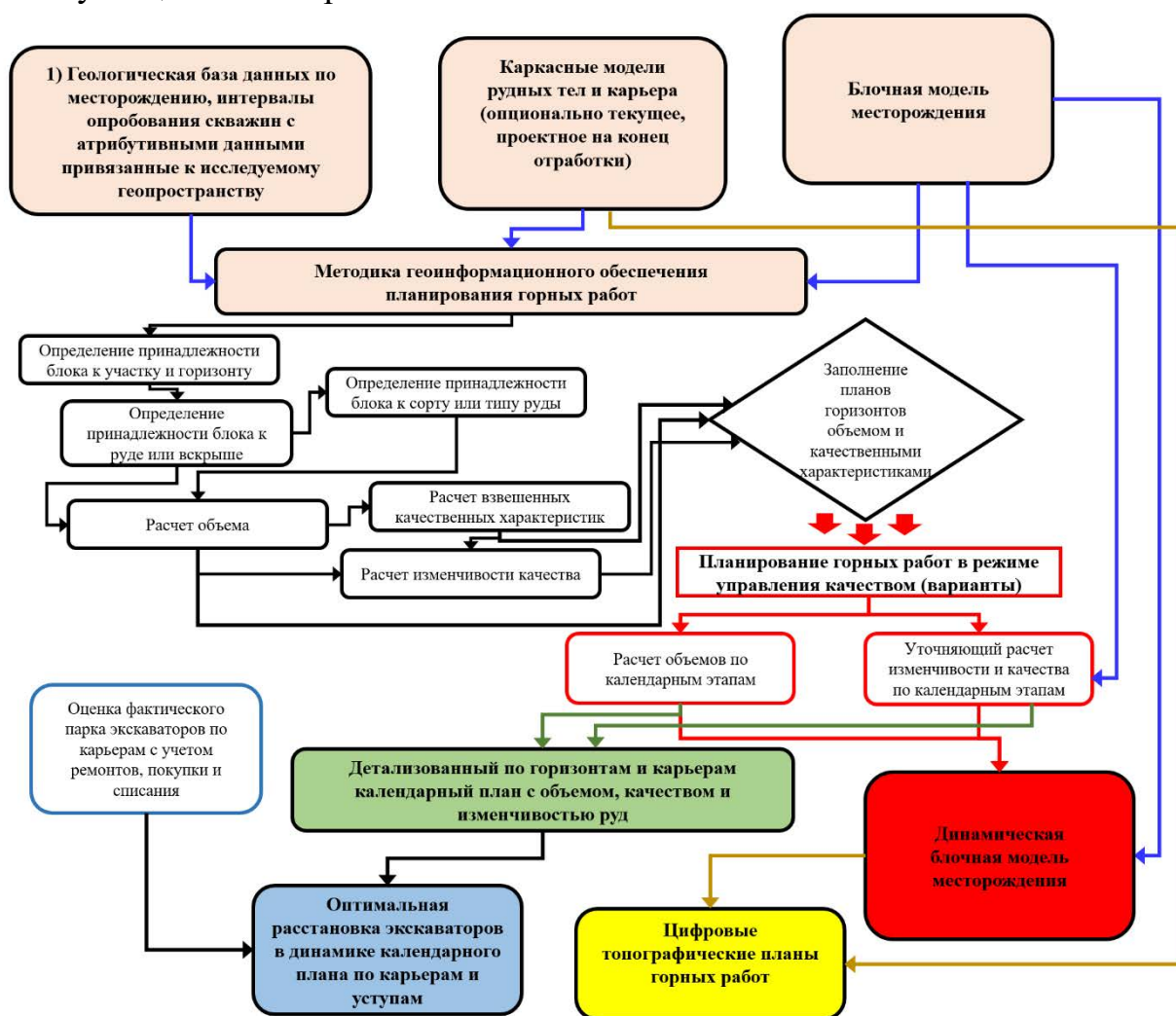


Рисунок 7 – Схема геоинформационного обеспечения планирования горных работ в режиме управления качеством

Совершенствование системы геоинформационного обеспечения принятия решений на стадии планирования горных работ связано с необходимостью учитывать изменчивость качественных характеристик, т.к. она, наряду с горно-геологическими условиями, определяет применяемый подход к управлению качеством на горнодобывающем предприятии. Анализ изменчивости

качественных показателей свидетельствует о том, что с помощью матричных моделей наиболее просто реализуются требования к анализу вариативности показателей качества и обоснованию способов его стабилизации.

Для формирования матричных моделей месторождение разбивается на пространственные участки (пример на рис.8 с размерами 100x100x15), привязанные к текущему положению горных работ, а данные о качестве и изменчивости рассчитываются программным путем на основе блочных моделей. Для каждого горизонта месторождения разработанная программа генерирует взаимоувязанную последовательность матричных моделей – вскрыша, руда, содержание и изменчивость качественных показателей (рис. 9).

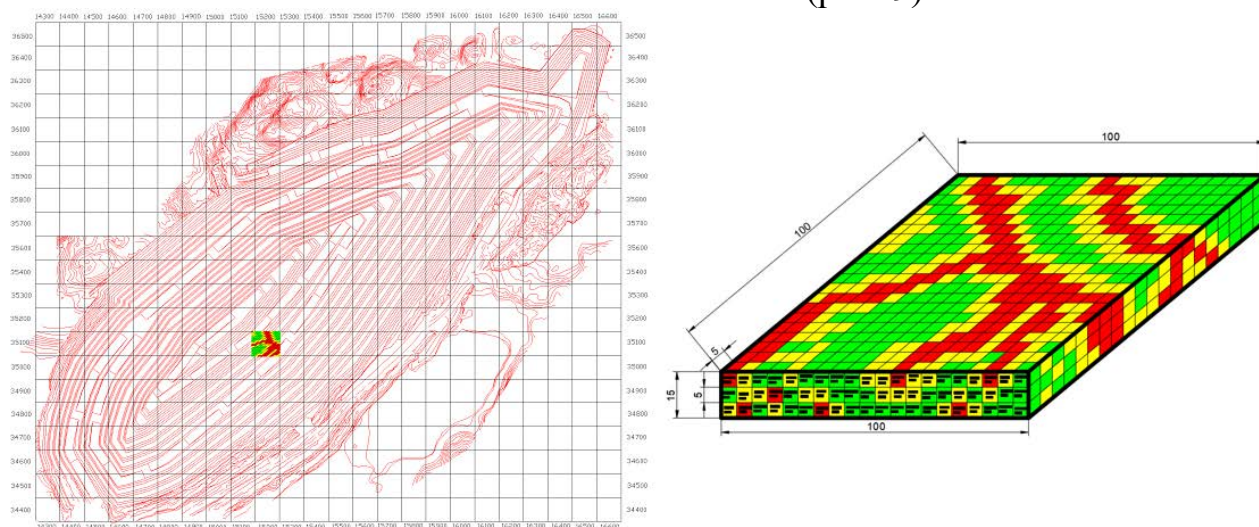


Рисунок 8 – Разбивка карьерного поля и блочной модели на исследуемые участки, привязанные к местной системе координат

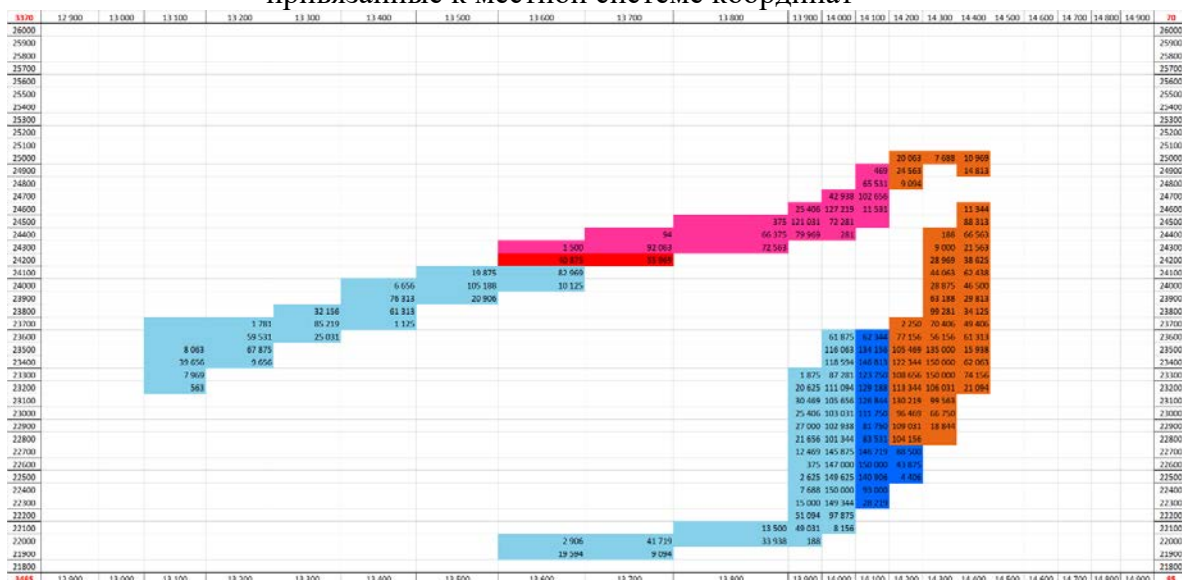


Рисунок 9 – Матричная модель погоризонтного плана, цифрами указаны объемы вскрыши, цветовая окраска года отработки

Назначением матричных моделей погоризонтных планов является раздельное описание объемов моделируемых участков и слагающих их рудных и вскрышных микроблоков. Реализован принцип раздельного моделирования геологической среды в единой системе координат с зафиксированными

«центрами масс» блоков. Информационное обеспечение планирования горных работ обеспечивается созданием совокупности блочных, каркасных и матричных динамических моделей, учитывающих неоднородность распределения показателей качества минерального сырья и обеспечивающих достижение заданных показателей по объемам и содержанию оцениваемых компонентов в геопространстве и времени. Унификация методики достигается за счет использования (экспорта/импорта) стандартных блочных моделей, принятых в различных ГГИС при соответствующей их модернизации под решаемые задачи.

Планирование горных работ с применением матричных моделей наиболее просто реализуется в формате файлов *.xls (Excel, Openoffice и т.п.), где производится интерактивная оценка вариантов развития горных работ в увязке с местом выемки, качественными показателями и глубиной отработки. На системе взаимоувязанных планов (рис. 10), с учетом закона соразмерного развития горных работ, цветом выделяются блоки, соответствующие календарному этапу-году. С использованием макрокоманд на каждой итерации планирования горных работ рассчитываются объемы руды, вскрыши, средневзвешенное содержание и изменчивость руд. После набора плановых показателей в разработанном программном обеспечении формируются различные варианты календарного графика с задаваемым уровнем детализацией (год, карьер, уступ, соотношение руд по типам, изменчивость), рассчитываемые по всей совокупности микроблоков, попавших в календарный этап планирования.

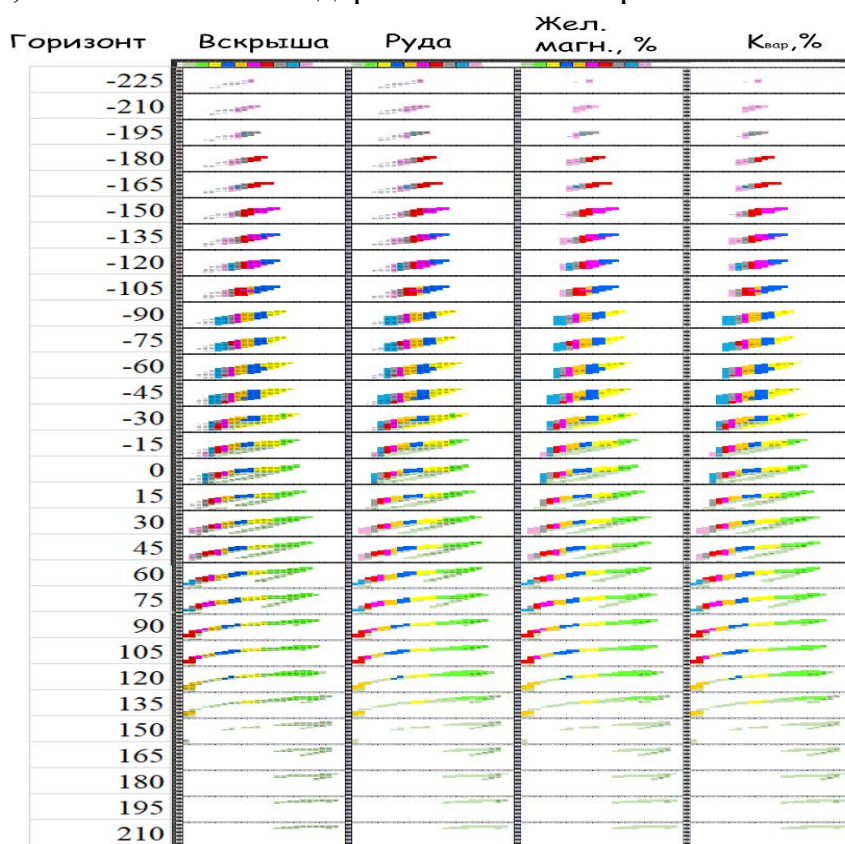


Рисунок 10 – Вид рабочего окна при генерировании вариантов долгосрочных, перспективных и текущих планов в среде Excel

Оценка изменчивости руд и рудоносности блоков заключается в расчете коэффициента вариации и коэффициента рудоносности. При этом, выделяются

участки требующие, предобогащения или выделения различных природных типов и сортов руд. Коэффициент вариации свыше 30% свидетельствует о неоднородности рудной массы в исследуемом участке и необходимости уточнения качественных характеристик. Величина коэффициента рудоносности менее 50% показывает, что данный участок должен обрабатываться с применением селективной выемки или подвергаться ряду технологических операций, связанных с рудоподготовкой. Низкий коэффициент рудоносности свидетельствует о малой мощности рудного тела, большом количестве контактов и породных прослоев и вытекающем из этого повышении разубоживания, и увеличении потерь – такие блоки в случае маломощных рудных тел и невозможности организовать селективную выемку должны отправляться на предобогащение, к примеру – сухую магнитную сепарацию. При планировании учитывается их объем и заранее резервируется часть мощностей комплекса рудоподготовки.

Для выявленных участков неоднородности производится автоматизированная оценка формы гистограмм вероятностного распределения содержания полезных и вредных компонентов в исследуемых объемах для выбора рационального способа рудоподготовки и выделения технологических типов и природных сортов руд. В случае наличия двух пиков (бимодального), формы типа – «плато» или «распределения с изолированным пиком», требуется предусматривать в блоке селективную выемку, либо отдельную добычу или взрывание. Такие участки возможно программно выделить цветом на стадии генерации матричных моделей и в дальнейшем учитывать их объем отдельно при планировании в среде рабочего окна.

Динамические блочные модели представляют собой модификацию исходной блочной модели, полученную в качестве исходных данных. Модификация заключается в изменении структуры информационного массива добавлением атрибутов, характеризующих варианты развития горных работ в части:

- года отработки;
- порядка отработки горизонта или участка карьера;
- изменчивости качества на участке в соответствующий год;
- интенсивности отработки карьера или его участка;
- выделенных участков карьера требующих специальных способов управления качеством.

При создании динамических блочных моделей добавляются атрибуты, которые заполняются при обратном импорте в модель рассчитанными данными (включая изменчивость руд) и отношениями к определенному календарному этапу и типу руды – результатами планирования по матричным моделям и программной генерации календарного плана.

Практическая реализация изложенных результатов исследования позволяет повысить эффективность и комплексность освоения запасов сложноструктурных месторождений, что особенно важно в период санкционной политики и необходимости импортозамещения. Для примера: на Западном карьере АО

«Карельский окатыш» установлено, что с глубиной отработки прогнозируется тенденция к улучшению качества руды. в т.ч. $Fe_{\text{маг}}$ с 17% на гор. +195 м до 27% на гор. -240 м÷-270 м, что требует повышения интенсивности углубки с целью повышения среднего содержания в добываемых рудах, а также увеличивается объем балансовых запасов руды на горизонтах и сокращается объем вскрыши. Этим обеспечивается принятие решений по опережающей выемке вскрышных пород с целью перспективного снижения текущего коэффициента вскрыши на оцениваемой участке. Таким образом, применение матричных моделей обеспечивает системную взаимоувязку порядка развития горных работ, мест выемки вскрыши и создания условий для поддержания рудных фронтов требуемой протяженности с учетом качества руд.

Планирование расстановки оборудования по карьерам и горизонтам, осуществляемое в известных специализированных программных продуктах зачастую жестко привязано к результатам, сформированным работой программы, что позволяет управлять лишь входными параметрами объема добычи по участкам, желаемых качественных характеристик, соотношения рудных сортов, количества выемочного оборудования и его производительности. При жестких ограничениях по содержанию и объемам, повышенной интенсивности отработки- программные продукты не всегда отрабатывают корректно, особенно для глубокозалегающих месторождений, предпочитая первоначально полностью «погашать» верхние горизонты и только затем осуществлять развитие горных работ по глубине за рудной массой. Разработан алгоритм, позволяющий осуществлять расстановку экскаваторов исходя из заданной производительности и количества экскаваторов с учетом плана ремонтов и возможных простоев оборудования на весь рассматриваемый срок на основании предыдущих результатов планирования горных работ. При этом формируется массив данных отражающий дефицит/профицит производительности парка выемочного оборудования по структурным единицам – карьерам, с возможностью поуступной расстановки оборудования.

Разработанная методика геоинформационного обеспечения процесса планирования горных работ на основе данных блочных моделей позволяет произвести анализ текущего состояния горных работ на предприятии, оценить по горизонтам объемы и качество руд, изменчивость качественных показателей. На их основе в короткие сроки можно произвести многовариантную оценку дальнейшего развития горных работ, разработать автоматизированные календарные планы не только по объемам и содержанию полезных и вредных компонентов на требуемый период планирования, но и с учетом изменчивости руд и соотношения различных их сортов. Данная методика может использоваться для оценки стратегии освоения месторождения и выбора направлений развития горных работ, оценки применяемых методов рудоподготовки, что позволяет строить трехмерные планы горных работ с детальной картой грузопотоков по системе «склад-карьер-горизонт».

На основании вышеизложенного, можно сделать вывод, что *информационное обеспечение планирования горных работ обеспечивается*

созданием совокупности блочных, каркасных и матричных динамических моделей, учитывающих неоднородность распределения показателей качества минерального сырья и обеспечивающих достижение заданных показателей по объемам и содержанию оцениваемых компонентов в геопространстве и времени.

В четвертой главе приведены основные результаты практической реализации элементов разработанной методик геоинформационного обеспечения планирования горных работ.

Методика геоинформационного обеспечения при планировании горных работ в режиме управления качеством апробирована на АО «Карельский Окамыш». Апробация результатов исследований в различных условиях свидетельствует о том, что разработанные методики геоинформационного обеспечения оперируют унифицированными моделями, адаптируемыми к принятым на предприятиях ГГИС. Основная область адаптации сложных и разветвленных систем — разработанный подход к экспорту/импорту данных геологической базы данных и базовых блочных моделей, не нарушающий установленные пользователем алгоритмы планирования и работы с созданными предприятием информационными моделями.

Показано, что исследование и уточнение качественных показателей при экспресс-оценках оруденения оценивается совокупностью изогипс, каркасных и блочных моделей. При этом оно позволяет учитывать их изменчивость по глубине и в плане.

Геоинформационное обеспечение принятия решений при планировании обеспечивается моделированием поперечных, продольных и кольцевых систем разработки с вычислением во времени изменчивости качественных показателей рудной массы. Развитие рабочей зоны во времени обеспечивается учетом текущих и средних коэффициентов вскрыши, а также прогнозом качества по каждому варианту календарного плана.

Способы управления качеством извлекаемого минерального сырья выбираются исходя из долгосрочного и текущего прогноза колеблемости качественных показателей в недрах. Предлагаемые методики позволяют оценивать развитие горных работ по участкам рудного тела.

На основании оценки календарного распределения извлекаемых объемов руды и вскрыши с оценками среднего качества и его вариабельности определены подходы к расстановке выемочного оборудования по горизонтам карьера и в случае формирования годовой программы при наличии нескольких добычных единиц распределение экскаваторов между карьерами.

Формируемая динамическая основа расчетов для ускорения времени вычислений и анализа качественных показателей допускает изменение параметров анализируемых участков и микроблоков начиная с размеров 100x100x15 м (возможно более) заканчивая 5x5x5 м. Модификация исходных статических блочных моделей в динамические достигается не только за счет изменения размеров и конфигурации совокупности микроблоков, но и за счет ввода атрибутов: время, показатели вариации качества, участки, требующие

специальных способов управления качеством.

С использованием алгоритма триангуляции созданы модели изогипс качественных показателей, что позволило разработать применительно к условиям Эльгинского месторождения экспресс-методику оценки изменчивости энергетических свойств, коксуетости, а также потерь и засорения угольных пластов. Полученные сведения о позволили рекомендовать внедрение технологии предобогащения - грохочения угольной массы на местах ведения горных работ.

Результаты совместных исследований ИГД УрО РАН, ИМЕТ УрО РАН и УГГУ на Гусевогорском и Собственно-Качканарском месторождениях титаномагнетитов показали, что малотитанистая разновидность руды по сравнению с нормальнотитанистой имеет более высокую обогатимость и измельчаемость и меньшую магнитную жёсткость. Поэтому в действующую классификацию руд по обогатимости, помимо принятых на ГОКе показателей крупности зерна титаномагнетита и содержания железа общего в концентрате, при геометризации введен дополнительный параметр - предельное содержание диоксида титана в добываемых рудах.

Апробация методики геоинформационного обеспечения планирования горных работ показала, возможность быстрой адаптации геологической блочной модели, имеющейся на предприятии и трансформации ее в систему взаимосвязанных динамических матричных моделей по каждому из карьеров, вовлеченных в процесс планирования отработки, что позволяет формировать интегральные и взаимоувязанные показатели разработки по объемам и качеству во времени разработки в учетом переменной интенсивности горных работ в каждом из карьеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований в работе представлено решение актуальной научно-практической задачи - разработана методика геоинформационного обеспечения планирования горных работ в режиме управления качеством минерального сырья, учитывающая изменчивость качественных характеристик и выбор способа управления качеством рудной массы при проектировании новых и планировании горных работ действующих карьеров.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Систематизация горно-геологических условий отработки крупнейших железорудных месторождений РФ позволила выделить 9 характерных групп со схожими морфологическими, качественными и гидрогеологическими особенностями, влияющими на эффективность реализации системы управления качеством.

2. Оценка изменчивости руд и рудоносности блоков заключается в расчете коэффициента вариации и коэффициента рудоносности. Обоснование подходов к управлению рудопотоками на участках карьера достигается изменением

высоты выемочного слоя и шага подвигания горных работ, способа выемки, усреднения или предобогащения, осуществляемых на основании анализа изменчивости качества. При этом, выделяются участки, требующие предобогащения или выделения различных природных типов и сортов руд.

3. Показано, что автоматизированное планирование горных работ в режиме управления качеством минерального сырья обеспечивается созданием и использованием динамических матричных и блочных моделей, учитывающих морфологические особенности оруденения и объемно-качественные свойства полезных ископаемых. Предложенная методика районирования технологических типов руд в зависимости от масштаба оцениваемого объекта основана на построении моделей изогипс (экспресс-оценка объектов: уступ-блок), а также каркасных и блочных моделей при детальном анализе стратегии управления качеством.

4. Разработанные методики геоинформационного обеспечения оперирует унифицированными моделями, адаптируемыми к принятым на предприятиях ГГИС. Основная область адаптации сложных и разветвленных информационных систем — разработанный подход к экспорту/импорту данных геологической базы данных и базовых блочных моделей, дополняющий установленные пользователем алгоритмы планирования и работы с созданными предприятием информационными моделями. Применение матричных моделей обеспечивает системную взаимоувязку порядка развития горных работ, мест выемки вскрыши и создания условий для поддержания рудных фронтов требуемой протяженности с учетом качества руд.

5. Формируемая динамическая основа расчетов для ускорения времени вычислений и анализа качественных показателей допускает изменение параметров анализируемых участков и микроблоков начиная с размеров 100x100x15 (возможно более) и заканчивая 5x5x5. Модификация исходных статических блочных моделей в динамические достигается не только за счет изменения размеров и конфигурации совокупности микроблоков, но и за счет ввода атрибутов: время, показатели вариации качества, участки, требующие специальных способов управления качеством.

6. Подтверждена универсальность методики блочного моделирования качества полезного ископаемого, использование которой при геометризации и выявлении распределения сортовых закономерностей в недрах способствуют разработке эффективных технологий рудоподготовки и обеспечению процесса планирования горных работ на разных этапах планового прогноза. Пороговое значение коэффициента вариации, превышающего 0,3, является критерием для применения селективной выемки природных типов и сортов руд.

7. Использование алгоритма триангуляции и создание моделей изогипс позволило разработать применительно к условиям Эльгинского месторождения экспресс-методику оценки изменчивости качественных показателей энергетических свойств, коксуюемости, а также величины потерь и засорения угольных пластов. Полученные сведения о позволили рекомендовать внедрение

технологии предобогащения - грохочения угольной массы на местах ведения горных работ.

8. Результаты исследований на Гусевогорском и Собственно-Качканарском месторождениях титаномагнетитов показали, что малотитанистая разновидность руды по сравнению с нормальнотитанистой имеет более высокую обогатимость и измельчаемость и меньшую магнитную жёсткость. В действующую классификацию руд по обогатимости, помимо принятых на ГОКе показателей крупности зерна титаномагнетита и содержания железа общего в концентрате, при геометризации рекомендовано ввести дополнительный параметр - предельное содержание диоксида титана в добываемых рудах.

9. Апробация методики геоинформационного обеспечения планирования горных работ показала возможность быстрой адаптации имеющихся блочных моделей имеющихся на предприятиях и их трансформации в систему взаимосвязанных динамических матричных моделей по каждому из карьеров, вовлеченных в процесс планирования отработки, что позволяет формировать интегральные и взаимоувязанные показатели разработки по объемам и качеству во времени разработки в учете переменной интенсивности горных работ в каждом из карьеров.

Основные результаты исследований рекомендуются в качестве методической базы для совершенствования методики автоматизированных расчетов при планировании горных работ, адаптации осваиваемых новых и действующих программных средств на предприятиях и в проектных организациях, а также в учебном процессе при изучении студентами дисциплин, связанных с освоением информационных технологий в горном деле.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:
в изданиях, рекомендованные ВАК Минобрнауки РФ**

1. **Яковлев, А.М.** Перспективы управления качеством сырья на Эльгинском месторождении каменного угля / Ю.В. Лаптев, **А.М. Яковлев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № S4. С. – 83-95.

2. **Яковлев, А.М.** Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения / В.Л. Яковлев, Ю.В.Лаптев, **А.М. Яковлев** // Литосфера. – 2014. – № 5. – С.122-128.

3. **Яковлев, А.М.** Раздельная переработка руд Гусевогорского месторождения / С.В. Корнилков, А.Н. Дмитриев, А.Е. Пелевин, **А.М. Яковлев** // Горный журнал. – 2016. – № 5 – С. 86-89.

4. **Яковлев, А.М.** Прогноз качественных показателей добываемого сырья на основе геоинформационных технологий / С.В. Корнилков, В.М. Аленичев, Ю.В. Лаптев, **А.М. Яковлев** // Горный журнал. – 2017. – № 12 – С. 10-15.

5. **Яковлев, А.М.** Геоинформационные технологии при моделировании качественных характеристик руд / В. Д. Кантемиров, **А. М. Яковлев**, Р. С. Титов // Геоинформатика. – 2019. – №. 3. – С 12-18.

6. **Яковлев, А.М.** Оценка качественных показателей полезных ископаемых

с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования / В.Д. Кантемиров, **А.М. Яковлев**, Р.С. Титов // Геоинформатика. – 2020. – № 3. – С. 29-37.

7. **Яковлев, А.М.** Современные подходы к выбору методов рудоподготовки минерального сырья / В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, **А.М. Яковлев**, М.В. Козлова // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 4(108). – С. 29-34

8. **Яковлев, А.М.** Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством минерального сырья / **А.М. Яковлев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5-1. – С. 248-257.

9. **Яковлев, А.М.** Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования / **А.М. Яковлев** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5-1. – С. 258-268.

Статьи, опубликованные в научных сборниках, журналах и материалах конференций:

1. **Яковлев, А.М.** Геометризация размещения качественных свойств каменного угля на Эльгинском месторождении / **А.М. Яковлев**, Р.С. Титов // Проблемы недропользования : материалы III всероссийской молодежной научно-практической конференции, 10 - 13 февр. 2009 г. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. – С. 186-199.

2. **Яковлев, А.М.** Геометризация качественных показателей Эльгинского месторождения каменного угля / **А.М. Яковлев**, С.В. Корнилков, Ю.В. Лаптев // Международный научно-промышленный симпозиум "Уральская горная школа - регионам" 21 - 28 апреля 2009 г. : сборник докладов / УГГУ. – Екатеринбург : УГГУ, 2009. – С. 92-94.

3. **Яковлев, А.М.** Методика геометризации качественных характеристик Гусевогорского месторождения титаномагнетитовых руд / В.Л. Яковлев, Ю.В. Лаптев, **А.М. Яковлев** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 286-296.

4. **Яковлев, А.М.** Использование ГИС технологий для моделирования месторождений твердых полезных ископаемых / **А.М. Яковлев**, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов // Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем : V Междунар. научно-практ. конф.(07-08.09.2016, Казань): программа : тез. докл. / Правительство Республики Татарстан, Мин-во информации и связи, Казанский (Приволжский) Федеральный университет. – Казань, 2016. – С. 91-98.

5. **Яковлев, А.М.** Возможности компьютерного моделирования для решения вопросов управления качеством минерального сырья / В.Д. Кантемиров, **А.М. Яковлев**, Р.С. Титов. – DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.170 // Проблемы недропользования. – 2016. – № 4. – С. 170-178 .

6. **Яковлев, А.М.** Исследование спектральных, обменных сигналов измерительной петрофизики на массивах хризотиласбеста и титаномагнетита для сортового картирования (из архивов электрометрической оценки

магматических месторождений Урала) / А. В. Тимохин, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, **А.М. Яковлев**. – DOI: 10.25635/2313-1586.2020.03.061 // Проблемы недропользования. – 2020. – № 3 (26). – С. 61-71.

7. Основные направления совершенствования методов рудоподготовки минерального сырья / В.Л. Яковлев, В.Д. Кантемиров, **А.М. Яковлев**, Р. С. Титов. – DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.095// Проблемы недропользования. – 2019. – Вып. 3 – С. 95-106.

8. **Яковлев, А.М.** Анализ эксплуатационных показателей горнодобывающего оборудования ведущих железорудных карьеров России / В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов, **А.М. Яковлев** // Известия Вузов Горный журнал. – 2019. – № 2. – С. 40-50.

9. **Яковлев, А.М.** Практическое применение геоинформационных технологий для моделирования качественных показателей комплексных руд / **А.М. Яковлев**, В.Д. Кантемиров, Р.С. Титов // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений : сборник докладов VIII Международной научно-технической конференции (4 - 5 апреля 2019) / отв. редактор Н. Г. Валиев. – Екатеринбург : УГГУ, 2019. – С. 229-235.

10. **Яковлев, А.М.** Геоинформационные технологии блочного моделирования для оценки качественных показателей полезных ископаемых в условиях переходных процессов горного производства / В.Д. Кантемиров, **А.М. Яковлев**, Р.С. Титов // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2021. – № 1 (215). – С. 38-48.