

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Мельников Н.Н., Лукичев С.В., Козырев А.А., Скороходов В.Ф., Месяц С.П.,
Иванова В.А., Гершенкоп А.Ш., Билин А.Л., Наговицын О.В., Громов Е.В.,
Рыбин В.В., Савченко С.Н., Хохуля М.С., Амосов П.В., Новожилова Н.В.,
Белобородов В.И., Митрофанова Г.В., Захарова И.Б., Андронов Г.П., Мухина Т.Н.,
Марчевская В.В., Бирюков В.В., Никитин Р.М., Остапенко С.П.,
Волкова Е.Ю., Новожилова М.Ю.

*Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук
(ГоИ КНЦ РАН),*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки,
город Апатиты, Россия*

melnikov@goi.kolasc.net.ru

Сложные горно-геологические условия Северо - Западной части Арктической зоны, наличие месторождений с низким содержанием полезных компонентов, необходимость освоения новых с целью расширения минерально-сырьевой базы России требуют создания инновационных наукоемких технологий добычи и переработки руд на базе фундаментальных исследований и определяют их актуальность.

Исследования в рамках проекта направлены на разработку методологии комплексного решения задач освоения месторождений твердых полезных ископаемых, обеспечивающих снижение негативной нагрузки на природную среду при повышении эффективности, промышленной и экологической безопасности добычи и переработки минерального сырья на основе информационных технологий моделирования месторождений, процессов горно-обогачительного производства и геоэкотехнологий.

Для построения инженерно-геологической модели месторождений Ковдорского рудного узла, включающего бадделеит-апатит-магнетитовые и примыкающие к ним перспективные апатит-штаффелитовые и апатит-карбонатитовые рудные тела, изучены физико-механические свойства выделенных литологических разностей, физико-механические и геометрические параметры структурных неоднородностей, полученные методами инженерно-геологического исследования массивов горных пород.

С целью оценки устойчивости борта карьера, отрабатывающего месторождение Олений Ручей, проведены исследования физико-механических свойств основных типов горных пород верхней части месторождения. Полученные сводные данные свидетельствуют о том, что породы и руды данного месторождения имеют высокие показатели прочности и упругости. В соответствии с классификацией прочности руд и пород Хибинских апатит-нефелиновых месторождений руды и породы месторождения Олений ручей могут быть отнесены к категории крепких. Необходимо отметить, что отбор проб производился в верхней части месторождения в трещиноватых скальных породах неоднородной среды зонально-блочного строения. Исследуемые породы характеризуются значительной изменчивостью минерального состава, структуры, текстуры и свойств. С увеличением глубины залегания рудного тела нарушенность и трещиноватость массива пород уменьшается, что ведет к более высоким значениям параметров физико-механических свойств пород в массиве [1].

Изучение геомеханического состояния массивов пород исследуемых месторождений, отрабатываемых открытым способом, показало, что они сложены, в целом, прочными скальными породами с отдельными нарушениями сплошности различных рангов и ослабленными зонами. Напряжённое состояние массива пород соответствует гравитационно-тектоническому типу, а параметры массива претерпевают изменения в окрестностях карьерных выемок, что обусловлено их формой и структурой, влиянием процессов оттаивания – замораживания больших масс снега, скапливающихся на уступах [2, 3].

Обоснована методология геомеханического обеспечения устойчивости параметров бортов и уступов карьеров в массивах скальных тектонически напряженных пород, включающая в себя разработку:

- инженерно-геологической модели месторождения, состоящей из частных моделей структурных нарушений различного порядка, моделей распределения физико-механических свойств, моделей естественного напряжённого состояния;
- инженерно-геологической классификации пород и выполнение инженерно-геологического районирования массива пород;
- геомеханической модели карьера, состоящей из частных моделей напряжённого состояния уступов и борта карьера, моделей расчёта параметров нарушенных зон, моделей расчёта параметров предельных обнажений;
- расчётных моделей определяемых элементов.

В обоснование способов повышения промышленной и экологической безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых открытым способом разработан методический подход к изучению закономерностей пространственного

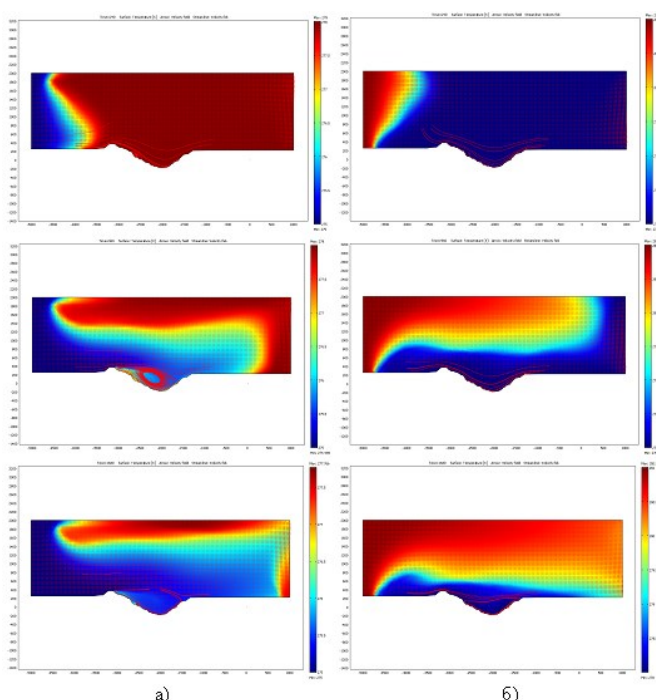


Рис.1. Динамика пространственного распределения температуры в области моделирования при поступлении «холодного» (а) и «теплого» (б) воздуха

распределения аэротермодинамических параметров атмосферы внутрикарьерного пространства, базирующийся на интеграции модели слабой сжимаемости с уравнением теплопроводности.

На базе программного кода COMSOL построены компьютерные модели аэротермодинамических процессов по четырем румбовым сечениям карьера разрабатываемого Ковдорского месторождения комплексных руд (высотные отметки на начало 2014 г.). Проанализированы две ситуации движения воздуха в каждом из сечений, когда в карьер (начальная температура атмосферы принята равной 278 K) поступает либо «холодный» (275 K), либо «теплый» (281 K) воздух (рис. 1).

Показано хорошее качественное согласие динамики распределения температуры с естественной физикой процесса. В случае поступления «холодного» воздуха происходит постепенное заполнение им чаши карьера, при этом более теплый воздух

происходит постепенное заполнение им чаши карьера, при этом более теплый воздух

располагается в верхней части области моделирования с постепенным смещением вниз по потоку. В случае поступления «теплого» воздуха наблюдается его продвижение в верхней области моделирования. В результате в чаше самого карьера достаточно продолжительное время сохраняется охлажденный воздух.

Результаты анализа численных экспериментов свидетельствуют о достаточно объективной физической картине распределения пространственно-временных аэродинамических параметров: температуры, скорости, плотности и давления. На базе реализованной компьютерной модели сделан вывод о принципиальной возможности симуляции аэротермодинамических процессов в карьерах.

Разработан подход к оценке инвестиционной привлекательности месторождений на основе пространственного и экономико-математического компьютерного моделирования, учитывающий технические возможности и экономическую целесообразность извлечения всех полезных компонентов для формирования более полного представления о потенциальной ценности извлекаемых руд. Предлагаемый подход использован при оценке месторождения Партомчорр Хибинского массива, запасы комплексных апатит-нефелиновых руд которого составляют более 800 млн. тонн со средним содержанием $P_2O_5 = 7,5\%$. Уникальность месторождения Партомчорр связана с большими запасами апатита, нефелина и сопутствующих полезных компонентов: стронция, фтора, редкоземельных элементов (РЗЭ), иттрия (в апатите),

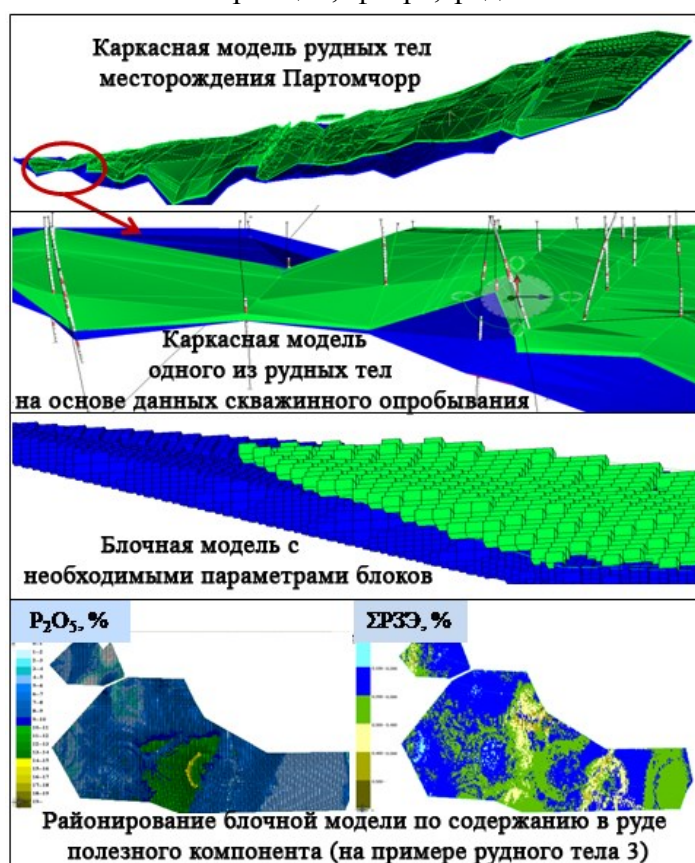


Рис. 2. Этапы создания компьютерной модели месторождения Партомчорр на примере рудного тела 3

галлия, редких щелочных металлов, рубидия и цезия (в нефелине), титана, ванадия, ниобия и тантала (в сфене и титаномагнетите).

В моделирующе-аналитическом комплексе MineFrame, разработанном в ГоИ КНЦ РАН [4], по данным скважинного опробования созданы трехмерные каркасная и блочная цифровые модели рудных тел месторождения Партомчорр (рис. 2). Для каждого блока модели, методом обратных расстояний, выполнена оценка содержания всех имеющихся полезных компонентов.

С учетом общих принципов калькуляции ценности извлекаемой руды, а также выявленных и наиболее существенно влияющих на нее природных и техногенных факторов, в среде «Excel» реализован, разработанный применительно к месторождению Партомчорр, на основе блок-

схемы, представленной на рисунке 3, алгоритм ее расчета. Определены основные эксплуатационные затраты первого этапа отработки месторождения.

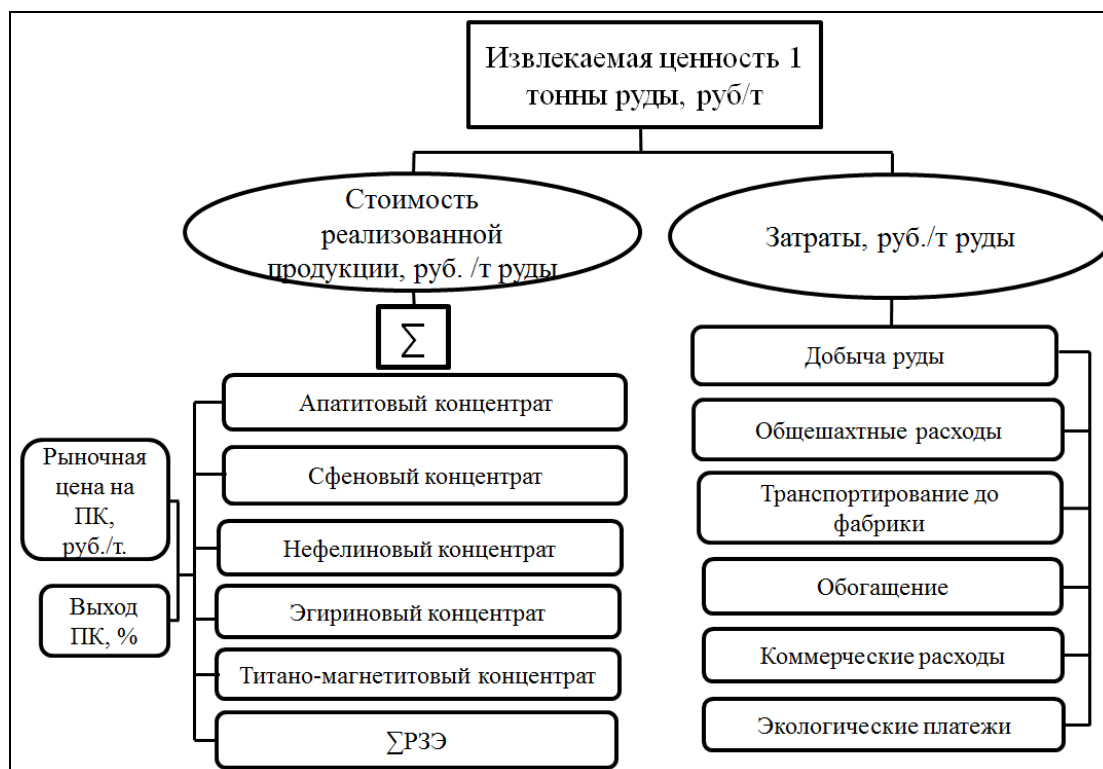


Рис. 3. Блок-схема комплексной оценки извлекаемой ценности руды для основных и попутных полезных компонентов

На основе полученных данных выполнен укрупненный инвестиционный анализ эффективности отработки месторождения, учитывающий комплексное извлечение полезных компонентов из добытой руды. Проведена оценка затрат на подземную добычу, транспортирование до фабрики и обогащение руды. Производительность подземного рудника определена в 7,0 млн. тонн руды в год. Запасы руды до отм. -70 м составляют 287 млн.т. За точку приведения финансовых потоков принято время начала строительства комбината. Оценка показала, что наиболее рентабельной схемой переработки руд месторождения Партомчорр является комплексное извлечение всех полезных компонентов, включая редкоземельную продукцию. Доминирующую роль в экономической эффективности производства играет получение оксидов редкоземельных элементов и апатитового концентрата. Данный проект окупит капитальные вложения через 5,7 лет с начала эксплуатации месторождения. Чистый дисконтированный доход и чистая дисконтированная прибыль составят, соответственно, 128 и 61,3 млрд. руб. Внутренние нормы доходности и прибыльности: 24,5 и 18,3 %. Рентабельность проекта по отношению к капитальным и эксплуатационным затратам составит 47 и 114,2 % (при минимально допустимом показателе 10 %).

Повышение полноты извлечения полезных компонентов из минерального сырья разрабатываемых месторождений предполагает вовлечение в переработку складированных отходов рудообогащения, рассматриваемых в большинстве случаев по содержанию полезных компонентов, как техногенные месторождения, с получением дополнительных объемов продукции.

Складируемые отходы обогащения бадделеит-апатит-магнетитовых руд Ковдорского месторождения (БАМР), представляют интерес для дальнейшей переработки. Ежегодно

сбрасываемый в хвостохранилище объем отходов составляет около 5,7 млн. т. Общий объем этого техногенного месторождения составляет 221,4 млн. т.

Изучение технологических проб, сформированных из материала слоевых керновых проб скважин с различных горизонтов, показало, что пробы имеют близкий химический и минеральный состав: апатит 10-13,5%; форстерит 39-45%; карбонаты 25-27,5%; флогопит 10-15,5%; магнетит 10-13,5%. Для проб характерен высокий модуль карбонатности $\text{CO}_2/\text{P}_2\text{O}_5 = 2,5-3,0$ и содержание в пределах 4-5% P_2O_5 (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав складированных отходов обогащения БАМР

Проба	Содержание, %				
	P_2O_5	CO_2	SiO_2	$\text{Fe}_{\text{общ.}}$	ZrO_2
1	4,45	12,36	24,92	4,73	0,24
2	4,24	11,81	25,49	4,57	0,21
3	4,62	14,30	21,65	4,09	0,19
4	4,20	12,99	24,77	4,54	0,20
5	4,98	12,36	24,27	4,26	0,20
6	5,52	13,87	21,25	4,07	0,19
7	4,98	12,67	23,63	4,25	0,19

На основе изучения вещественного состава складированных отходов переработки бадделеит-apatит-магнетитовых руд сделан вывод о возможности получения из данного вида сырья апатитового, железорудного и бадделеитового концентратов.

Расширение сырьевой базы Северо - Западной части Арктической зоны России, предполагает разработку месторождений платинометалльных руд Федорова Тундра и кианитовых руд Кейвской группы.

Для разработки технологий их переработки проведены минералого-технологические исследования двух проб малосульфидных платинометалльных руд месторождения Федорова Тундра участков Большой Ихтегипакх и Пахкварака. Главные сульфидные минералы пирротин, халькопирит, пентландит в соотношении 5:3:2 слагают до 90-95% рудной массы. Среди второстепенных и аксессуарных минералов в руде присутствуют пирит, виоларит, магнетит, ильменит, рутил.

Основной вклад в суммарное количество благородных металлов вносят платиновые металлы (ПМ), представленные главным образом палладием и платиной и золото. Из минералов благородных металлов наиболее распространенными являются висмутотеллуриды и сульфиды платины и палладия: мончеит, меренскиит, котульскит, брэггит, высокоцит. Вклад золота, представленного золото-серебряными сплавами, в сумму благородных металлов составляет 4 %.

По данным химического анализа средние значения содержаний ценных компонентов в исходной руде технологических проб №1 и №2 соответственно составили: никеля – 0,10 % и 0,11 %, меди – 0,12 % и 0,096 %, платины – 0,25 г/т и 0,14 г/т, палладия – 1,21 г/т и 0,68 г/т, золота – 0,09 г/т и 0,06 г/т, суммы благородных металлов – 1,55 г/т и 0,88 г/т.

Размер зерен минералов благородных металлов колеблется от долей микрометра до 100-150 мкм. Более 80% всех выявленных зерен ПМ крупнее 20 микрон срastaются с сульфидами, а остальные локализованы вблизи них.

Поскольку платиновые минералы пространственно и генетически связаны с сульфидами, основным методом обогащения малосульфидных благороднометалльных руд выбрана флотация.

Исследованиями на обогатимость кианитовой руды технологической пробы месторождения Новая Шуурурта Кейвского рудного района установлена повышенная прочность крупноконкреционных агрегатов кианита и тесная корреляционная связь плотности пород с содержанием в них глинозема, что является предпосылками использования для ее переработки гравитационного тяжелосредного обогащения.

Кианитовые руды, составляющие технологическую пробу, представлены конкреционным типом с примесью до 5% параморфического. Соотношение крупно- и мелкоконкреционных агрегатов в руде составляет 10:1.

К основным текстурным элементам руды относятся (% объемн.): конкреции – 50; параморфозы - 3; кварцево-мусковитовый субстрат – 45; кварцево-слюдистые прожилки по плоскостям рассланцевания – 2.

Главными минералами исследуемой руды являются кианит (90%) и кварц, второстепенными - мусковит, рутил, графитоид, диксит; аксессуарными - ставролит, ильменит, биотит, пирротин, ортит, гидрооксиды железа, плагиоклаз.

Показана оптимальная крупность раскрытия рудных агрегатов кианитовых руд, составляющая -30 мм (рис.4), определены оптимальные значения граничной плотности суспензии для выделения отвальных хвостов и кианитового концентрата (2,8 и 3,3 г/см³ соответственно), рассчитаны прогнозные показатели тяжелосредной сепарации руды крупностью -30+5 мм. Рассмотрена принципиальная возможность получения гравитационного кианитового концентрата с содержанием ~56 % Al₂O₃ при извлечении более 48%. Получающийся промпродукт совместно с рудным отсевом (-5 мм) рекомендуется направлять в дальнейшую переработку с использованием метода флотации.

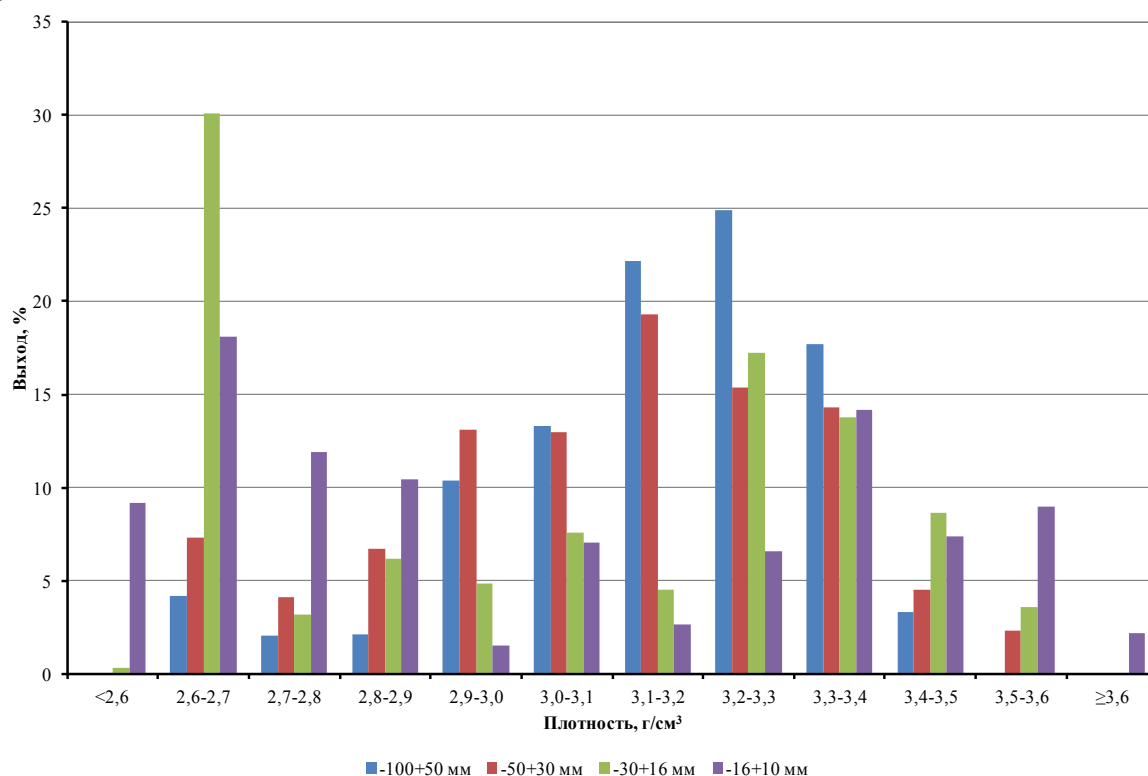


Рис.4. Распределение кианитовых сланцев различной крупности по плотности

Повышение комплексности и полноты извлечения полезных компонентов при обогащения руд разрабатываемых и перспективных месторождений, а также

минерального сырья техногенных месторождений требует разработки новых высокоэффективных реагентов и реагентных режимов.

Обосновано применение собирателя из класса высокомолекулярных алкилбензолсульфокислот. Отработаны параметры синтеза реагента, обеспечивающие получение полиалкилбензолсульфокислоты (ПАБСК) с содержанием основного вещества 82-86 %. Реагент ПАБСК характеризуется низкой чувствительностью к ионному составу и температуре флотационной пульпы, малой токсичностью, относится к умеренно-опасным веществам (3 класс опасности); ПДК в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования – 0,2 мг/дм³; биоразлагаемость – не ниже 90 %.

Исследованиями флотационных свойств ПАБСК показана эффективность его использования при комплексном обогащении апатитсодержащей руды, складированных отходов ее переработки и при флотации кианитовых руд

В основе обогатительных процессов при переработке руд лежит принцип выделения в различные технологические продукты частиц минералов, раскрытых при проведении операций дробления – измельчения исходной руды.

Разработка нового и модернизация серийно выпускаемого обогатительного оборудования для повышения селективности процессов разделения в объеме обогатительного аппарата осуществляется с использованием специализированных САД – САМ – САЕ комплексов, позволяющих в рамках единой программной среды совместить средства автоматизированного проектирования оборудования со средствами компьютерного CFD моделирования процессов разделения компонентов многофазных минеральных суспензий с известными физическими, химическими и физико – химическими свойствами и средствами направленного модифицирования этих свойств [5]. Моделирование модификации свойств минеральных компонентов производится путем совместного использования моделей Эйлера и Лагранжа с дополнительными модулями, такими как модули MHD – магнитной гидродинамики и популяционного баланса. Использование модуля магнитной гидродинамики в рамках подхода Лагранжа позволяет описать процессы агрегирования тонкодисперсных ферромагнитных частиц, повышающие селективность магнитного разделения. В модели Лагранжа смоделировано движение нескольких десятков тысяч минеральных ферромагнитных частиц при действии на них сил со стороны диспергирующей фазы и магнитных градиентных и межчастичных сил, в результате чего происходит образование вытянутых агрегатов. Процессы агрегирования сопровождаются уменьшением удельного коэффициента гидродинамического сопротивления, что приводит к их ускоренному осаждению. Следствием наложения магнитного поля на оживленный слой ферромагнитных частиц в восходящем водном потоке является образование MSFB - магнитно стабилизированного оживленного слоя. Процессы разделения в MSFB более селективны по сравнению с обычной магнитной сепарацией и позволяют получать магнетитовые концентраты высокой чистоты.

Совместное использование САД – САМ – САЕ комплекса со средой имитационного моделирования технологий обогатительных предприятий позволяет получить необходимую топологию технологической цепи путем направленной модификации дифференциальной функции распределения частиц по крупности и содержанию полезного компонента в операциях измельчения и сепарации как при модернизации серийно выпускаемого оборудования, так и разработке нового. Конфигурация цепи аппаратов обогатительного предприятия определяется на основе метода многокритериальной оптимизации технологического процесса, заключающегося в

минимизации целевой функции экономических затрат и максимизации функции эффективности процесса.

В рамках обоснования методологии водоподготовки промышленных сточных вод для их использования в цикле обогащения минерального сырья CFD моделированием процессов флокуляции примесей на базе математического аппарата модели “популяционного баланса” в рамках подхода Эйлера определены коэффициенты адгезионного взаимодействия тонкодисперсных взвешенных частиц в сточных водах. Полученные коэффициенты позволяют рассчитать энергетику процесса образования флоккул и выявить параметры, влияющие на скорость его протекания. Решение системы уравнений “популяционного баланса”, описывающей состояние множества флоккул различной крупности и плотности при действии общего закона сохранения массы, позволяет рассчитать их концентрации при заданных внешних параметрах и условия перехода из одной “популяции” в другую. Использование неорганических коагулянтов обеспечивает требуемую скорость образования прочных флоккул для удаления флотацией. Регулирование температурного баланса дает возможность оптимизировать процесс флокулообразования и достичь требуемую степень очистки сточных вод от взвешенных частиц при пониженном расходе коагулянта.

Интенсивное промышленное освоение Арктики привело к возрастанию нагрузки на природные экосистемы, причем в ряде случаев это воздействие оценивается выше предельно допустимого. Воздействие горнодобывающей отрасли на природную среду заключается в извлечении и перемещении огромных масс горной породы, преобразовании извлекаемого минерального сырья и складировании новообразованного, что приводит к нарушению природных форм рельефа, изменению ландшафта, разрушению его главного компонента – почвенно-растительного покрова, являющегося базисом всех видов природопользования. Понимание того, что почва является не только важнейшим производительным ресурсом, но и управляющей системой биосферы, определяет задачу восстановления нарушенных земель, как одну из важнейших задач современного природопользования.

Обоснован методологический подход к решению проблемы рекультивации породных отвалов горнодобывающей отрасли, заключающийся в реализации эволюционно сложившейся программы образования почв созданием биологически активной среды и выявлены особенности формирования биогеохимического круговорота элементов создаваемых фитоценозов. Создание сеяного фитоценоза без нанесения плодородного слоя при восстановлении нарушенных земель интенсифицирует начальные стадии восстановления биогеохимического круговорота, являющегося главным механизмом самоорганизации природных ландшафтов [6].

С целью обоснования методологии восстановления нарушенных земель при освоении месторождений полезных ископаемых в Арктической зоне разработан методический подход к расчетному моделированию биогеохимического круговорота элементов при восстановлении нарушенных земель в соответствии с концепцией естественного почвообразования, основанный на параметризации элементного состава компонентов формирующегося биогеоценоза химическими формулами и замкнутой по химическим соединениям системой химических реакций, отражающих последовательность биогенной трансформации соединений углерода, водорода, кислорода, азота, составляющих более 95% массы компонентов биогеоценозов. Последовательность биогенной трансформации компонентов сеяного фитоценоза при восстановлении нарушенных земель и круговорота химических элементов описана следующей системой реакций:

- устанавливающих соотношение между составом растений и химическими соединениями, образующимися в процессах фотосинтеза, дыхания и секреторного выделения метаболитов растениями;
- отражающих совокупную модель фотосинтетической деятельности и увеличения массы растений;
- формализующих процессы отмирания растений и образования мортмассы;
- представляющих в модели стехиометрию совокупности процессов микробиологической деструкции мортмассы, увеличения микробной биомассы и дыхания растений;
- отображающих образование органического вещества почвы с участием микроорганизмов с учетом их дыхания;
- связывающих увеличение массы растений с содержанием органического вещества в формирующейся почве и фотосинтетическим процессом.

Математическим выражением расчетной модели изменения массы компонентов формирующегося биогеоценоза является система дифференциальных уравнений, решение которой хорошо коррелируется с данными мониторинга по накоплению органического вещества в процессе биологической организации горной породы в почву при восстановлении нарушенных земель в соответствии с концепцией естественного почвообразования, что свидетельствует о непротиворечивости предложенной модели.

Результаты анализа многолетнего мониторинга состояния сеяных фитоценозов на различных объектах в различных климатических зонах свидетельствуют: стабильно высокая продуктивность травостоя и, как следствие, высокая биохимическая активность корнеобитаемых горизонтов обеспечивают быстрое накопление органического вещества и формирование запасов гумуса. Выполяживание кривой накопления гумуса с середины второго десятилетия свидетельствует о достижении формирующейся почвенной системой определенной стабильности [6].

Расчет показал, что время оборота элементов-биогеоценозов уменьшается в ряду углерод, азот, водород, кислород, а время оборота углерода коррелирует с периодом накопления органического вещества в корнеобитаемом слое сеяного фитоценоза, что может быть использовано в качестве показателя выхода на стационарный режим биологического круговорота.

Таким образом, в ходе работ по проекту получены следующие результаты:

- разработана методология геомеханического обеспечения безопасной отработки месторождения на примере месторождения бадделеит-апатит-магнетитовых руд и примыкающих к нему перспективных апатит-штаффелитового и апатит-карбонатитового месторождений Ковдорского рудного узла и апатит-нефелиновых месторождений Хибинского массива;
- разработан методический подход к изучению закономерностей пространственного распределения аэротермодинамических параметров атмосферы внутрикарьерного пространства, построены CFD-модели аэротермодинамических процессов в карьере;
- разработана трехмерная цифровая модель месторождения Партомчорр Хибинского массива с дифференциацией по содержанию и запасам основных и попутных компонентов, обоснована технология подземной разработки месторождения и проведена оценка его инвестиционной привлекательности;
- разработана методология создания топологий технологических схем переработки минерального сырья;
- обосновано получение апатитового, железорудного и бадделеитового концентратов из складированных отходов обогащения бадделеит-апатит-магнетитовых руд;

- обоснованы технологии переработки перспективных месторождений платинометаллических и кианитсодержащих руд;
- разработан новый эффективный реагент-собирающий для флотации несulfидных руд;
- обоснована методология водоподготовки промышленных сточных вод для использования в оборотном водоснабжении цикла переработки минерального сырья компьютерным моделированием процессов флокуляции примесей;
- обоснован методологический подход к решению проблемы рекультивации породных отвалов горнодобывающей отрасли и выявлены особенности формирования биогеохимических циклов создаваемых фитоценозов.

Научная новизна исследований состоит в комплексном подходе к решению задач освоения месторождений твердых полезных ископаемых Арктической зоны Российской Федерации, обеспечивающих снижение техногенной нагрузки на природную среду при повышении эффективности добычи и переработки минерального сырья в соответствии с экологической стратегией развития горнодобывающей отрасли, разработанной в Горном институте КНЦ РАН.

Практическая значимость исследований заключается в расширении сырьевой базы предприятий, получении дополнительных объемов и видов продукции, повышении экологических, технологических и экономических показателей, промышленной и экологической безопасности при производстве работ, что обеспечивает повышение инвестиционного потенциала эксплуатируемых и перспективных месторождений

Список литературы:

1. В.И.Панин, В.В.Рыбин, К.Н.Константинов. Новая информация о физических свойствах руд и пород месторождений Кольского полуострова и её использование в проектах развития горно-добывающих предприятий региона. *Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24-27 сентября 2013 г.*, 2013, 155-160.
2. Н.Н.Мельников, А.А.Козырев, С.П.Решетняк, Э.В.Каспарьян, В.В.Рыбин, И.В.Мелик-Гайказов, В.С.Свинин, А.Н.Рыжков. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении. *Труды 8-го международного симпозиума «Горное дело в Арктике» (под ред. Н.Н. Мельникова, С.П. Решетняк, 2005, 2-14.*
3. А.А.Козырев, И.Э.Семенова, В.В.Рыбин, И.М.Аветисян. Исследование напряжённо-деформированного состояния массива пород численными методами на основе данных натурных измерений в окрестности крупной карьерной выемки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2011, **11**, 78-89.
4. С.В.Лукичёв, О.В.Наговицын, А.В.Морозова. Моделирование рудных и пластовых месторождений в системе MineFrame. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2004, **5**, 296-301.
5. В.Ф. Скороходов, М.С. Хохуля, А.С. Опалев, В.В. Бирюков, Р.М. Никитин. Применение методов вычислительной гидродинамики к исследованию и анализу процессов разделения минералов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2013, **3**, 179-187.
6. С.П.Месяц, Е.Ю.Волкова, М.Ю.Новожилова. Восстановление нарушенных земель в соответствии с эволюционно сложившейся программой образования почв. *Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, 13-15 окт. 2014г.*, 2014, **1**, 345-354