

На правах рукописи

А. Чебан

Чебан Антон Юрьевич

**РАЗВИТИЕ АДАПТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЕЛЕКТИВНОЙ
ВЫЕМКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность

2.8.8. Геотехнология, горные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Хабаровск 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

Научный консультант:

Рассказов Игорь Юрьевич

академик РАН, доктор технических наук, директор ФГБУН Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

Официальные оппоненты:

Ткач Сергей Михайлович

Доктор технических наук, директор Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск

Глебов Андрей Валерьевич

Доктор технических наук, заместитель директора по научным вопросам, ФГБУН Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург

Гавришев Сергей Евгеньевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Разработки месторождений полезных ископаемых, ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

Ведущая организация:

ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

Защита диссертации состоится 29 сентября 2026 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.478.01 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51, конференц-зал. Тел./факс: (4212) 32-79-27, e-mail: adm@khfrc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51 и на сайте www.khfrc.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

К настоящему времени наиболее простые по геологическому строению и богатые по содержанию полезного компонента месторождения в значительной мере уже отработаны. В связи с чем в эксплуатацию вовлекаются месторождения со все более сложными горно-геологическими параметрами, что приводит к значительной изменчивости качественных характеристик добываемого минерального сырья, а соответственно к снижению эффективности перерабатываемого комплекса и в целом – горного производства. Высокая изменчивость качественных характеристик, к которым относится не только содержание ценного компонента, но и целый ряд других параметров, влияющих на выход и качество конечной продукции, итоговое извлечение ценного компонента, объективно требует использования гибкого (адаптивного) управления процессами подготовки к выемке и собственно выемки с целью недопущения поступления на переработку сырья с технологически несовместимыми характеристиками. Под адаптацией понимается согласованность применяемых технологий с изменчивостью морфолого-структурных параметров оруденения, прочностью руд и пород, а также содержанием ценных компонентов для повышения эффективности горного производства.

В настоящее время разработка месторождений, сложенных прочными породами и рудами, ведется в основном с применением буровзрывных работ, что приводит к перемешиванию полезного ископаемого с пустыми породами, а также различных типов и сортов руд, образованию зон их переизмельчения, т.е. в целом – к снижению природного качества минерального сырья. Поэтому разработка сложноструктурных эксплуатационных блоков без должного качества селективной выемки и/или усреднения приводит к высокой вариативности вещественного состава рудной массы, концентрации и форм нахождения в ней рудных минералов, направляемой на обогащение, режимы и параметры которого задаются с установкой на относительно выдержанный диапазон изменчивости характеристик поступающего на переработку сырья. Выход из этого диапазона ведет к недостаточно высокому извлечению металлов при переработке руд. Вовлечение в отработку сложноструктурных россыпных месторождений с большой долей мелкого золота с применением традиционных технологий также приводит к большим потерям металла. Расширение спектра технологий добычи и переработки минерального сырья, включая соответственно не только взрывную дезинтеграцию и схемы обогащения, позволяет на основе поблочной горно-геологической оценки сложности оруденения осуществлять гибкий, адаптивный выбор схем подготовки к выемке и собственно выемки, как в режиме внутрисортовой селекции, так и в режиме усреднения. В свою очередь, это обеспечит рациональное формирование технологических потоков со стабильными качественными характеристиками, соответствующими отдельным техно-

логическим схемам, режимам и параметрам переработки, включая такие новые технологии как кучное и кюветное выщелачивание бедных и разубоженных руд, что является важным условием повышения эффективности горного производства. Поэтому обоснование адаптивных геотехнологий разработки сложноструктурных месторождений с гибкой комбинацией производственных процессов, является актуальной научно-технической проблемой, решение которой позволит увеличить сквозное извлечение полезных компонентов, снизить себестоимость конечной продукции и расширить минерально-сырьевую базу месторождений.

Работа основана на результатах исследований, выполненных в 2011–2025 годах при непосредственном участии автора, в том числе по плановым темам НИР Института горного дела ДВО РАН: «Фундаментальные проблемы комплексного освоения природных и техногенных месторождений твердых полезных ископаемых Дальневосточного региона России на основе инновационных геотехнологий» (ГР № 01201253448), «Создание научных основ инновационных, ресурсосберегающих и экологически безопасных геотехнологий разработки месторождений полезных ископаемых Дальнего Востока России» (ГР № 115020410158), «Развитие научных основ эффективных и экологически безопасных инновационных технологий освоения месторождений полезных ископаемых Дальнего Востока России» (ГР № АААА-А18-118020590026-4), «Развитие научных основ эффективных и экологически безопасных инновационных геотехнологий освоения полезных ископаемых Дальнего Востока России» (ГР № 122042900005-5).

Цель работы заключается в обосновании эффективных малоотходных и энергосберегающих геотехнологий разработки сложноструктурных месторождений на основе комбинации процессов разупрочнения и разрушения горных пород и селективной выемки полезного ископаемого из недр.

Идея работы состоит в том, что повышение эффективности разработки месторождений твердых полезных ископаемых, характеризующихся высокой изменчивостью качественных и прочностных свойств, достигается применением стадийной селективной выемки разносортного минерального сырья с учетом взаимосвязи внутреннего строения обрабатываемых участков и возможностей адаптивных геотехнологий добычи.

Объект исследования: горнотехнические системы, используемые при освоении сложноструктурных месторождений полезных ископаемых.

Предмет исследования: технологии и технические решения, обеспечивающие повышение эффективности разработки сложноструктурных залежей.

Задачи исследования:

- оценить изменчивость качественных характеристик руд и песков на примере характерных месторождений различного минерального сырья и определить их влияние на показатели извлечения полезных компонентов;

- обосновать показатели оценки сложности строения рудных блоков как факторов, определяющих параметры селективной выемки и их влияние на эффективность последующей переработки минерального сырья;

- выполнить анализ технологических решений по использованию инновационных методов выемки твердых полезных ископаемых, характеризующихся высокой изменчивостью физико-механических и качественных параметров;

- обосновать систему показателей оценки эффективности адаптивных технологий добычи и переработки руд, с учетом возможности последующей переработки хвостов обогащения руд с повышенными качественными характеристиками, для определения границ выделяемых сортов;

- обосновать возможность эффективной дифференцированной подготовки локальных богатых включений с аномально высоким содержанием ценных компонентов к выемке с учетом их прочности с применением механического рыхления, разупрочнения растворами поверхностно-активных веществ, рыхления взрывными зарядами специальных конструкций;

- разработать адаптивные технологии, обеспечивающие возможность внутрисортной селекции при извлечении богатых включений за счет гибкого применения широкого спектра выемочного оборудования, включая инновационное, для повышения стабильности качественных характеристик оставшегося минерального сырья при его последующем усреднении в процессе выемки;

- оценить эффективность предлагаемых технологий разработки сложноструктурных месторождений.

Методы исследований. Общей теоретической и методологической основой диссертации является комплексный подход, включающий анализ и обобщение научно-технической литературы и имеющихся эмпирических данных, патентный поиск, методы многофакторного планирования экспериментов, обобщение производственной и проектной практики разработки сложноструктурных месторождений. В качестве основных методов исследований использовались: аналитические и графо-аналитические методы; экономико-математическое моделирование; горно-геометрическое моделирование сложноструктурных рудных тел; системный анализ и лабораторные эксперименты при исследовании параметров технологических процессов и моделей горного оборудования; методы математической статистики обработки результатов экспериментов; метод экспертных оценок; технико-экономические расчеты и анализ при определении области применения разработанных технологий.

Основные защищаемые положения:

1. Выбор рациональных технико-технологических схем селективной выемки полезных ископаемых необходимо осуществлять на основе оценки сложности внутренней структуры обрабатываемых участков сложноструктурных рудных и россыпных месторождений с выделением элементов выемки однородных по комплексу качественных и прочностных характеристик с примене-

нием системы показателей, определяющих морфолого-структурные параметры эксплуатационных блоков.

2. Селективное извлечение запасов по сортам с выделением богатых включений при отработке сложноструктурного блока обеспечивает стабилизацию качества в границах оставшихся сортов руд (песков россыпей) при последующей раздельной переработке, что позволяет повысить сквозное извлечение металла на 4-14 %. Критерием качества при обосновании границ таких выемочных элементов выступает максимум интегрального ЧДД добычи и последующей переработки всех извлекаемых сортов руд или песков россыпей, включая переработку формируемых техногенных отходов.

3. Для условий разработки месторождений цветных и благородных металлов, сложенных относительно прочными контрастными рудами, необходимо дифференцированно производить дезинтеграцию и выемку технологических сортов руд с опережающей селективной выемкой богатых включений после их предварительной подготовки, в частности с применением растворов поверхностно-активных веществ, позволяющих снизить прочность руд на 20-40 %, с максимальным сохранением природной структуры массива.

4. Безвзрывное рыхление с последующей селективной выемкой при разработке сложноструктурных месторождений, характеризующихся высокой изменчивостью качественных и прочностных параметров участков залежей, представленных минеральными образованиями преимущественно невысокой прочности с наличием относительно прочных включений, целесообразно вести с их предварительным физико-химическим разупрочнением, что позволит увеличить производительность механического рыхления в 1,5-1,7 раза.

5. Разработку сложноструктурных россыпных месторождений целесообразно осуществлять с применением технологий, предусматривающих районирование полигона и выделение в продуктивном пласте выемочных слоев для селективного извлечения богатых песков усовершенствованными горными машинами циклического действия, обеспечивающими внутрисортную селекцию при одновременном усреднении качественных показателей при выемке.

Научная новизна:

1. Определена рациональная структура эксплуатационных рудных блоков, в которой выделяются качественно-однородные выемочные элементы, различающиеся уровнем содержания полезного компонента: богатые, рядовые, бедные, особо бедные (некондиционные), границы между которыми устанавливаются по суммарному чистому дисконтированному доходу (ЧДД).

2. Разработана система показателей оценивающая сложность внутренней структуры оруденения выемочных блоков как горнотехнических объектов, позволяющая дать их интегральную и дифференцированную оценку в процессе вы-

бора геотехнологических решений, с учетом особенностей технологий последующей отдельной переработки разносортной рудной массы.

3. Предложено новое технологическое решение, предполагающее оконтуривание и селективную выемку различными техническими средствами богатых, рядовых и бедных руд для последующей отдельной переработки, в том числе совместно с промежуточными продуктами, полученными при обогащении богатых руд, а также с продуктивными фракциями, выделенными из особо бедных руд, которые содержат полезные компоненты в количестве, позволяющем перерабатывать такое сырье по низкочастотным технологиям.

4. Обоснован критерий максимума суммарного чистого дисконтированного дохода добычи и переработки запасов сложноструктурных месторождений с выделением руд не менее трех сортов, границы которых определяются возможностью фракционирования добытой рудной массы, а также технологическими режимами и параметрами ее переработки, с учетом вовлечения в переработку части техногенных отходов методами физико-химической геотехнологии.

5. Разработан алгоритм выбора технологий освоения сложноструктурных месторождений и их эффективных параметров, с учетом ценности и физико-механических характеристик руд, а также приведенного граничного коэффициента вскрыши, определенного по усовершенствованной методике с учетом возможности вовлечения в переработку продуктивных фракций некондиционной руды.

6. Предложены методики определения оптимальной длины ковша усовершенствованного колесного скрепера и сопротивления продвижению интенсификатора загрузки ковша при селективной выемке песков россыпей, определена заполняемость ковша в зависимости от связности песков, геометрических параметров ковша и способов его загрузки.

7. Обоснованы принципы комбинированной разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей с опережающей селективной выемкой богатых песков и последующей отработкой участков рядовых и бедных песков методом скважинного выщелачивания растворами с адаптированными концентрациями экологощадящих реагентов, обеспечивающими относительно высокое извлечение золота в продуктивный раствор.

Практическая значимость:

1. Предложены схемы отработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых с осуществлением внутрисортной селекции, уменьшением потерь и обеспечением максимальной сохранности природного качества минерального сырья путем применения щадящих способов подготовки к выемке и локальной выемки особо ценных участков эксплуатационного блока, а также выделения продуктивных фракций из некондиционных (особо бедных) руд.

2. Предложено техническое решение по переводу руд средней трудности разрушения в класс легко разрушаемых и разработана технология комбиниро-

ванной выемки, предусматривающая предварительное разупрочнение растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ), подаваемых через сгущенную сеть скважин, включений богатых руд с их последующим опережающим локальным механическим извлечением.

3. Разработана технология безвзрывного рыхления сложноструктурных участков рудных массивов, характеризующихся высокой изменчивостью качественных и прочностных параметров, с применением усовершенствованных машин послойного фрезерования, обеспечивающих предварительное разупрочнение относительно прочных включений за счет их пропитки раствором ПАВ, совмещенной с выемкой вышележащего слоя.

4. Разработаны эффективные технологии и конструкции усовершенствованных машин послойного фрезерования для освоения сложноструктурных залежей, обеспечивающие дезинтеграцию относительно прочных включений за счет их пропитки раствором ПАВ, а также конструкция усовершенствованного колесного скрепера с комбинированным рабочим оборудованием в виде удлиненного ковша с интенсификатором загрузки и рыхлителем.

5. Разработаны эффективные адаптивные технологические схемы подготовки и отработки рудных тел, которые рекомендованы к применению в различных горно-геологических и горнотехнических условиях сложноструктурных месторождений.

Достоверность научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечена применением современных методов анализа и моделирования; удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований; использованием апробированных методов и теоретических положений геотехнологии, а также привлечением проектных и фактических материалов предприятий горной промышленности.

Личный вклад автора состоит в постановке проблемы и обосновании идеи работы и ее реализации путем постановки целей и задач исследований; в обобщении технологических решений по комбинированной подготовке сложноструктурных массивов к выемке и собственно выемки; в формировании методологического подхода для решения поставленных задач; разработке комплекса инновационных технологических решений проблемы; в проведении экспериментальных исследований; в установлении системы показателей характеризующих сложность рудного блока при его селективной отработке; разработке и обосновании технологических схем комбинированной отработки сложноструктурного массива; разработке технико-технологических решений по выбору схем селективной выемки богатых включений; разработке технологических схем по отделению обогащенной рудной мелочи из рудной массы непосредственно во время ведения выемочно-погрузочного процесса; разработке технологических рекомендаций по выбору рациональной технологии разработки сложноструктурных массивов различными комплексами выемочно-погрузочного и транспортного оборудования.

Реализация результатов работы.

Результаты исследований переданы ряду горнодобывающих предприятий, занимающихся разработкой золоторудных и золотороссыпных месторождений Дальневосточного региона. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ТОГУ при подготовке горных инженеров по специальности «Открытые горные работы», а также при подготовке аспирантов в ИГД ДВО РАН.

Апробация работы. Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2013-2016, 2024), Международной научной школе академика РАН К.Н. Трубецкого (г. Москва, 2020, 2022, 2024), Международных научно-практических конференциях «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов» (г. Чита, 2013, 2023), «Наука и инновационные разработки – Северу» (г. Мирный, 2014), Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (г. Екатеринбург, 2017-2025), Международной научной конференции «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (г. Хабаровск, 2018, 2020, 2023), Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Глубокие карьеры» (г. Апатиты, 2015), «Научно-технические проблемы и технологии освоения месторождений полезных ископаемых в сложных горно-геологических условиях и на больших глубинах горных работ» (г. Новосибирск, 2022), Всероссийской научно-практической конференции «Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых Северных и Северо-Восточных регионов России» (г. Якутск, 2015, 2017), Петербургской технической ярмарке в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» (г. Санкт-Петербург, 2011) и других конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 57 печатных работ, в том числе 29 статей в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ, 12 патентов на изобретения и две монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (330 источников), 93 иллюстраций, 41 таблицы. Общий объем – 269 страниц.

Автор выражает благодарность академику РАН Рассказову И.Ю., д.т.н., профессору, засл. деятелю науки РФ Секисову Г.В., д.т.н. Секисову А.Г., чл.-корр. РАН Шулюпину А.Н., д.т.н. Шемякину С.А., к.т.н. Хруниной Н.П., к.г.-м.н. Крюкову В.Г. и другим коллегам из ИГД ДВО РАН за помощь и ценные советы при написании диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены проблематика и актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также научная и практическая значимость полученных результатов исследований.

Значительный вклад в развитие и совершенствование геотехнологий разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых внесли известные советские и российские ученые М.И. Агошков, Ю.И. Анистратов, В.Ж. Аренс, И.И. Аристов, А.И. Арсентьев, С.А. Батугин, С.Д. Виктор, В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак, Д.В. Доможиров, Е.А. Дорош, Н.В. Дронов, Н.Г. Дубынин, В.Н. Захаров, В.Р. Именитов, Д.Р. Каплунов, С.В. Корнилков, М.В. Курленя, В.Г. Лешков, В.М. Лизункин, М.В. Лизункин, Г.Г. Ломоносов, А.Р. Маттис, Н.В. Мельников, В.Н. Опарин, И.А. Пыталев, В.В. Ржевский, В.Ф. Рогизный, М.В. Рыльникова, Г.В. Секисов, С.М. Ткач, К.Н. Трубецкой, С.И. Фомин, В.А. Хакулов, А.С. Чирков, В.А. Шестаков, С.М. Шорохов, Б.П. Юматов, В.Л. Яковлев и многие другие.

Несмотря на значительные исследования в этой области, проведенные в прошлые десятилетия, перманентное снижение качества минерально-сырьевой базы с одной стороны, а также развитие оборудования и технологий по добыче и переработке минерального сырья – с другой стороны, предопределяет необходимость совершенствования технологических схем освоения месторождений с применением адаптивных технологий, обеспечивающих повышение эффективности разработки сложноструктурных залежей. Адаптация (от лат. *adaptation* – приспособление, прилаживание) в технике – способность технических устройств и систем приспособляться к изменяющимся условиям окружающей среды, что приводит к повышению эффективности их работы. В настоящее время вопросами адаптации горнотехнических систем в области ведения буровзрывных работ, а также карьерного транспорта занимается чл.-корр. РАН В.Л. Яковлев. Основоположниками адаптивного подхода по взаимоувязке технологий добычи и переработки минерального сырья являются Б.П. Юматов, В.А. Шестаков, З.А. Терпогосов, В.С. Хохряков.

В первой главе приведены результаты анализа состояния проблемы практики работы горнорудной промышленности, предложена систематизация оруденения по морфолого-структурным параметрам с позиций их соответствия технологическим параметрам способов подготовки массива к выемке, собственно выемки и технологий переработки.

В настоящее время наблюдается тенденция по снижению качества запасов многих видов минерального сырья. Необходимо отметить, что вовлечение в отработку сложноструктурных месторождений без обеспечения необходимой глубины селекции при выемке приводит к значительному разубоживанию и пересортице руд, которые в последствии не всегда компенсируются на стадии

обогащения, что ведет к увеличению сквозных потерь металлов и интенсивному росту объемов отходов горного производства. Изменение структуры минерально-сырьевой базы происходит не только в количественном, но и в качественном аспекте, что обуславливает проблему извлечения полезных компонентов по унифицированным технологическим схемам и параметрам переработки. Изменение содержания полезного компонента в руде влияет на эффективность процесса обогащения флотационным методом. Согласно современным представлениям, с повышением содержания увеличивается извлечение металлов в концентрат, однако после достижения оптимального значения дальнейшее повышение содержания приводит к незначительному росту извлечения. С участием диссертанта также проведены исследования по определению зависимости извлечения полезных компонентов от их содержания в рудах, на рисунке 1 представлены результаты данных работ, выполнявшихся в МГРИ-РГГРУ и ИГД ДВО РАН.

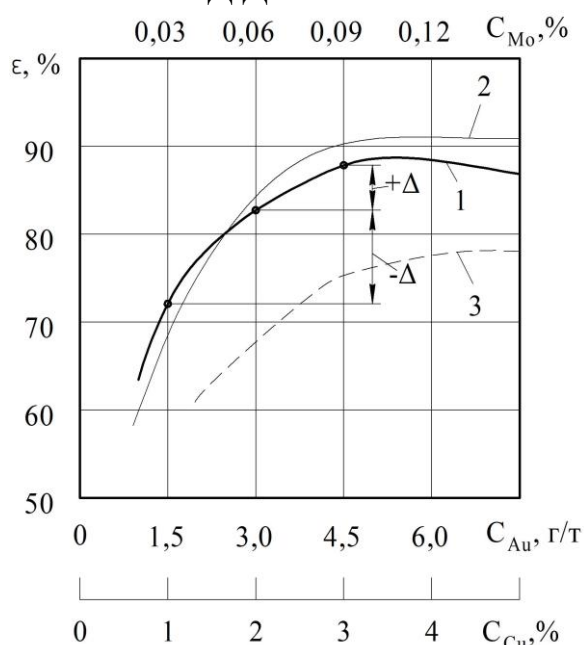


Рис. 1. Зависимости извлечения полезных компонентов в концентрат от их содержания в исходной руде при обогащении методом флотации: 1 – золотосодержащая руда месторождения Талатуй; 2 – молибденовая руда Сорского месторождения; 3 – медная руда месторождения Удокан

При переработке золотосодержащей руды месторождения Талатуй рост содержания золота в рудной массе с 3,0 до 4,5 г/т обеспечивает увеличение извлечения с 82,7 до 87,9 % (+ Δ), а снижение содержания с 3,0 до 1,5 г/т, приводит к

уменьшению извлечения золота в концентрат с 82,7 до 72,6 % (– Δ). Таким образом, в первом случае прирост извлечения составляет 5,2 %, а во втором случае извлечение снизится на 10,1 %. Следовательно, в некоторых случаях может быть целесообразным использовать часть руд с относительно высоким содержанием полезного компонента для подшихтовки руд, имеющих содержание полезного компонента ниже рационального значения с целью увеличения суммарного выхода металла по всем сортам руд.

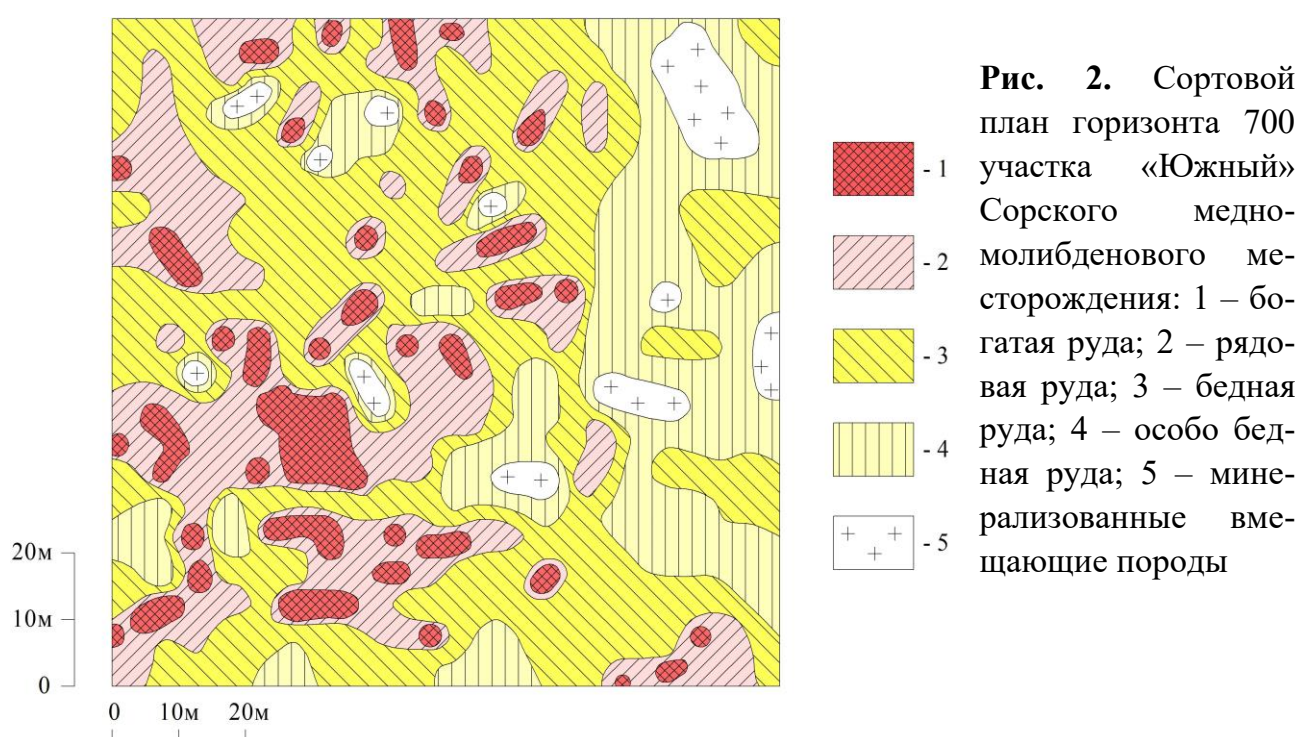
Существенное влияние на полноту извлечения металлов при переработке руд оказывает изменчивость содержания металла в руде. Так согласно данным д.т.н. Ломоносова Г.Г. уменьшение изменчивости содержаний никеля с 0,1 до 0,01 % в рудной массе рудника «Заполярный» повышает степень извлечения никеля в концентрат с 65 до 78 %. Наибольшая вариативность содержаний бу-

дет появляться при перемешивании богатых руд с рядовыми, что приведет к снижению общего извлечения металла. Таким образом, объективно необходима внутрисортная селекция при выемке руд.

Учитывая, что в настоящее время возможно использование различных технологий переработки руд, характеризующихся соответственно разным уровнем извлечения ценных компонентов, эксплуатационными и капитальными затратами, целесообразно осуществлять оценку эффективности добычи и переработки разнотипно-разносортных руд по альтернативным схемам. Например, при извлечении ценных компонентов из богатых руд, которые могут быть непосредственно или после предварительной сортировки переработаны методами автоклавного выщелачивания, интенсивного цианирования после сверхтонкого измельчения, двухстадийного сорбционного выщелачивания и т.д., параллельно используются традиционные схемы предварительного обогащения рядовых руд с получением концентратов. Переработка же бедных, забалансовых и разубоженных рядовых руд в настоящее время производится методами кучного выщелачивания. Таким образом, требуется гибкий дифференцированный подход к определению границ сортов руд, выделяемых по содержанию и разделению руд на геолого-технологические типы по минералогическим и текстурно-структурным параметрам. При этом соответственно требуется и дифференцированный подход к воздействию на минеральное вещество, соответствующее использование нескольких технологических схем переработки с гибким регулированием их параметров и режимов. Необходимым этапом реализации такого подхода является также глубокая дифференциация объектов выемки и переработки во взаимосвязи с существующими и перспективными техническими средствами для добычи и обогащения. Поэтому рудные тела и в целом тела полезных ископаемых целесообразно рассматривать не как однородные геологические образования, а как систему пространственно-сопряженных зон продуктивной минерализации различных параметров.

Наиболее сложными по структуре являются месторождения штокверкового и жильного типов. В процессе проведения опережающей эксплуатационной разведки месторождений появляется новая информация о количестве, качестве и местоположении отдельных рудных включений внутри контуров крупных зон оруденения, которые на стадии перспективного планирования рассматривались как однородные по качеству объекты разработки. Внутри блока могут чередоваться не только руда и пустые породы, но и в рудных телах выделяться руды различных типов и сортов. Так применительно к условиям Сорского медно-молибденового месторождения с учетом данных эксплуатационной разведки ранее отработанных блоков, рационального содержания Mo равного 0,105 % и применением предложенного критерия оценки эффективности автором определены рациональные диапазоны содержаний Mo для сортов руд: богатые – более 0,13 %; рядовые – 0,09...0,13 %; бедные – 0,055...0,090 %; особо бедные –

0,034...0,055 %; минерализованные вмещающие породы – менее 0,034%. Автором обработаны данные эксплуатационной разведки нескольких участков и горизонтов месторождения, на рисунке 2 представлен сортовой план основного оруденения участка «Южный» Сорского месторождения. Учитывая, что неоднородность руды существенно влияет на показатели ее переработки, необходимо оценивать и сложность внутреннего строения «рудного ядра», так в 30,9 % объема руд участка (рис. 2) содержится 50,4 % запасов металла. При формировании выемочных блоков по горизонтам важно учитывать требования к отдельным сортам руд, границы естественного оруденения, возможность отдельной выемки разнокачественных руд по простиранию рудного тела с применением горизонтальной или вертикальной селекции после производства рыхления.



Поскольку в сложноструктурных рудных блоках отдельные включения богатых руд значительно отличаются друг от друга по объему, морфологии и содержанию металла, то очевидно, что не всегда может быть экономически целесообразным селективное извлечение всех богатых включений в связи с дополнительными затратами. Принятие решения о целесообразности селективного извлечения конкретного богатого включения может быть основано на условии:

$$\Delta Z_{\text{Д}}^{\text{вкл}} + \Delta Z_{\text{П}}^{\text{вкл}} \geq \Delta C^{\text{вкл}}, \quad (1)$$

где $\Delta Z_{\text{Д}}^{\text{вкл}}$, $\Delta Z_{\text{П}}^{\text{вкл}}$ - дополнительные затраты на извлечение и переработку руды богатого включения по специальной технологии обогащения; $\Delta C^{\text{вкл}}$ - дополнительно извлекаемая ценность металла, полученного из руды богатого включения, в сравнении с традиционной технологией обогащения.

В результате богатые включения можно разделить на *крупные* – внутри-сортовое селективное извлечение которых, с целью последующей переработки по специальной технологии оправдано, и *малообъемные* – применение для которых данной технологической схемы экономически не целесообразно.

Автор предлагает сложность внутренней структуры рудных включений оценивать с применением системы показателей:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_B = \sum_{i=1}^N S_{iBK} / S_{\text{бл}}; \\ \psi_B = \sum_{i=1}^N L_{iBK} / \sum_{i=1}^N S_{iBK}; \\ \psi_{p-\delta} = \frac{\sum L_{BM-p} + \sum L_{p-\delta} + \sum L_{\delta-o} + \sum L_{o-n}}{S_{\text{бл}}(1 - K_B)} \end{array} \right. \quad (2)$$

где K_B - коэффициент, учитывающий площадь крупных богатых включений в общей площади эксплуатационного блока; ψ_B - показатель сложности оруденения эксплуатационного блока с позиций селективной выемки крупных богатых включений; $\psi_{p-\delta}$ - показатель сложности оруденения эксплуатационного блока с позиций селективной выемки после опережающего извлечения из него крупных богатых включений; S_{iBK} - площадь крупных богатых включений, м²; N - количество крупных богатых включений; $S_{\text{бл}}$ - площадь эксплуатационного блока; L_{iBK} , - длина контактов крупных богатых включений, м; $\sum L_{BM-p}$, $\sum L_{p-\delta}$, $\sum L_{\delta-o}$, $\sum L_{o-n}$ - суммарные длины контактов в эксплуатационном блоке соответственно малообъемных богатых включений и рядовых руд, рядовых и бедных руд, бедных и особо бедных руд, особо бедных руд и пустых (минерализованных вмещающих) пород.

На основании величин показателей K_B , ψ_B и $\psi_{p-\delta}$ подбирается выемочная техника небольшого типоразмера для осуществления опережающего извлечения включений богатых руд (гидравлический одноковшовый экскаватор с основным или сменным рабочим оборудованием, одноковшовый погрузчик), а также уточняется производительность основной выемочной техники для блоков разной сложности строения при селективной выемке руд и величина пересортицы руд.

Еще большую изменчивость по содержанию полезного компонента имеют месторождения благородных металлов. Согласно данным ряда исследователей, в рудных месторождениях золота 25-30 % объема руды содержат 70 % металла; золотоносные россыпи в 20-40 % объема содержат 60-90 % металла; рудные урановые месторождения в 20-30 % объема содержат более 90 % урана. Автором обработаны данные эксплуатационной разведки нескольких участков

и горизонтов золоторудного месторождения Талатуй Дарасунского рудного поля, на рисунке 3 представлен сортовой план горизонта 750 Западного блока.

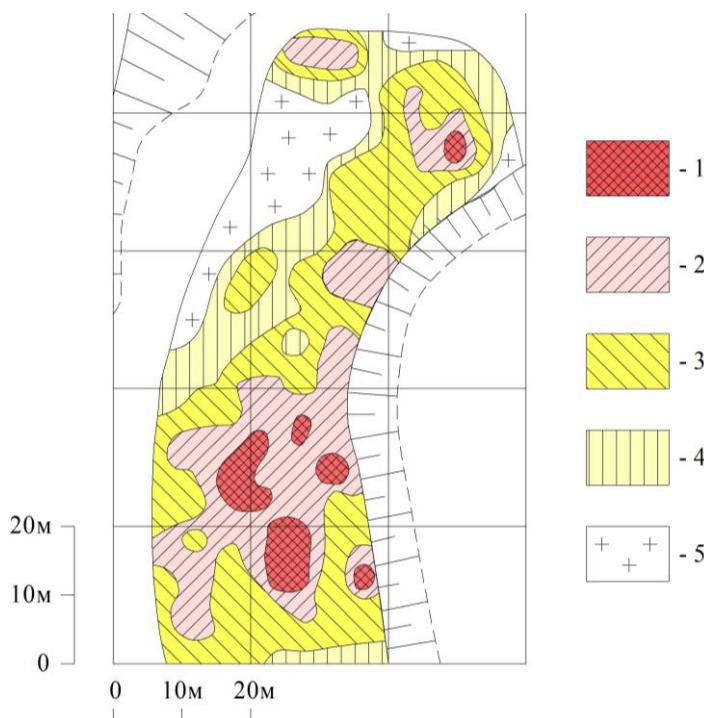


Рис. 3. Сортовой план горизонта 750 Западного блока золоторудного месторождения Талатуй. Диапазоны содержания Au, (у.е.): 1 - более 6; 2 – 2...6; 3 – 0,7...2; 4 – 0,3...0,7; 5 – менее 0,3 (минерализованные вмещающие и пустые породы)

В рассмотренном блоке (рис. 3) на долю богатых и рядовых руд приходится 35,8 % при этом содержание металла в них составляет 73,2 %, в том числе на 6,7% богатых руд приходится 29,7 % металла.

В отдельных призальбандовых зонах жил содержания золота могут составлять сотни грамм на

тонну (рис. 4).

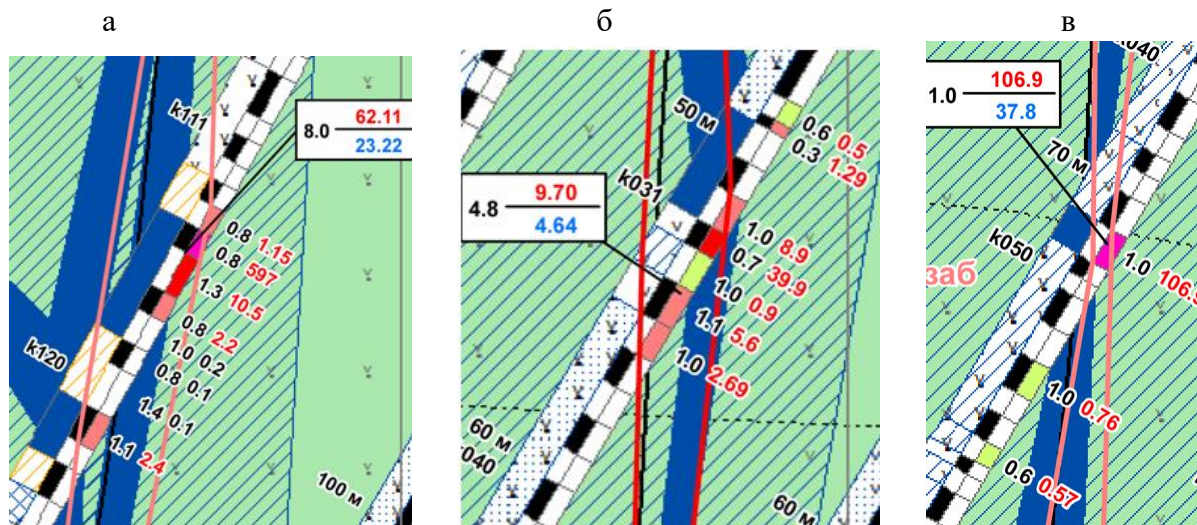


Рис. 4. Фрагменты продуктивной части жилы золоторудного месторождения Пионер. Величина интервала опробования (м) и содержание золота/серебра (у.е.)

На месторождениях изменчивость содержаний полезных компонентов прослеживается не только в плане, но и по глубине. Так исследования, проводившиеся с участием диссертанта на золоторудном месторождении Биркачан (Магаданская область), показали, что сортовой разрез может значительно изменяться в зависимости от величины интервала отбора проб, которые велись по сетке 4,0x4,5 м в плане и через 5 и 10 м по вертикали. С уменьшением величи-

ны интервалов внутренние контуры рудных тел значительно изменяются, так в зоне рядовых руд выявляются включения бедных и даже особо бедных руд, в тоже время в зоне богатых руд выявлено включение рядовой руды.

Высокая изменчивость качественных параметров минерального сырья характерна также и для россыпных месторождений. Автором проведена обработка данных детальной геологической разведки с выявлением характера распределения золота в песках продуктивного пласта ранее отработанной россыпи руч. Большой Ельник (Хабаровский край), а также выполнены разрезы по линиям скважин с учетом изменения величины интервалов опробования (рис. 5).

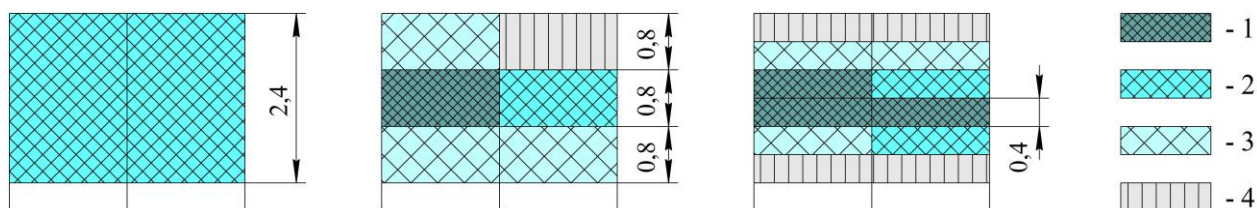


Рис. 5. Разрез продуктивного пласта россыпи руч. Большой Ельник по линии скважин при интервалах опробования 2,4; 0,8; 0,4 м. Содержания золота в песках, г/м³: 1 - более 5; 2 – 2...5; 3 – 0,5...2; 4 – менее 0,5

На участке «Верхний» исследуемой россыпи в 4,9 % проб (полученных при интервале опробования 0,4 м), приходящихся на богатые пески (с содержаниями более 2 г/м³), находилось 29,8 % металла, а в 29,4 % песков с содержанием золота более 0,5 г/м³ – 72,2 % металла. Результаты ситового анализа золотин по линиям скважин показали, что золотины класса крупности +2 мм преимущественно приурочены к более богатым по содержанию металла зонам, в тоже время в бедных зонах класс крупности +2 мм практически отсутствует.

Автором проведено обобщение результатов ситового анализа 75 россыпных месторождений или их отдельных участков разрабатывавшихся в период с 1990 по 2025 годы в Дальневосточном регионе: с 1990 по 2006 годы – 37 объектов; с 2007 по 2025 годы – 38 объектов. Из сравнения результатов по двум периодам видно, что доля россыпей с содержанием мелкого золота -0,25 мм менее 3 % сократилась с 29,7 до 7,9 %, а доля россыпей с содержанием мелкого золота в интервале 3-10 % увеличилась с 37,8 до 52,6 % (таблица 1).

Таблица 1. Количество россыпей с долей класса крупности -0,25 мм

Годы освоения	Количество россыпей			
	Доля класса крупности -0,25 мм, %			
	Более 30	10-30	3-10	Менее 3
1990-2006	6	6	14	11
2007-2025	7	8	20	3

Таким образом, удельный вес мелкого золота в запасах оставшихся россыпей существенно увеличился. Также необходимо отметить, что содержание класса крупности золотин -0,5+0,25 мм в россыпях, отработывавшихся в период

с 2007 по 2025 годы, составляет в среднем 27-38 %, в отдельных случаях превышая 50 %. Большая доля мелкого золота в песках россыпей предопределяет высокие технологические потери при их традиционных методах переработки. При этом доля россыпей с содержанием крупного золота +2 мм более 25 % сократилась с 16,2 до 2,6 %, а доля россыпей, в которых крупное золото отсутствует, увеличилась с 27,0 до 36,8 %. Также важное значение на величину извлечения при промывке песков имеют такие характеристики золотин как их морфология и наличие на них оксидно-железистых и оксидно-марганцевых пленок. Поэтому даже при значительном общем содержании золота в продуктивном пласте песков его извлечение может существенно варьировать вплоть до падения до 40 %.

Таким образом обосновано, что ***выбор рациональных технико-технологических схем селективной выемки полезных ископаемых необходимо осуществлять на основе оценки сложности внутренней структуры обрабатываемых участков месторождений с выделением элементов выемки однородных по комплексу качественных и прочностных характеристик.***

Во второй главе предложен критерий максимума интегрального (суммарного) ЧДД добычи и переработки запасов сложноструктурных месторождений с выделением не менее трех сортов руд, границы которых определяются технологическими режимами и параметрами их переработки.

Критерием выбора способа подготовки к выемке и выемки твердого полезного ископаемого является максимум суммарного ЧДД при использовании комбинации основной и вспомогательных технологий добычи и переработки запасов месторождения, представленных несколькими качественными разновидностями твердых полезных ископаемых, выделенных исходя из обеспечения возможности применения рациональных технологий добычи и последующей переработки с целью максимального сквозного извлечения полезного компонента и его ценности путем сохранения природного качества сырья: для металлорудных и химического сырья – по уровням содержания полезного компонента; для россыпных месторождений – по содержанию полезного компонента, а также форме и крупности золотин.

Дифференциация залежи на технологически-однородные зоны может вестись не только по содержанию в руде полезных компонентов, но и по прочности руд, их контрастности и минералогическому составу. Согласно классификации академика В.В. Ржевского горные породы по трудности разрушения делятся на пять классов: I – мягкие, плотные и полускальные породы, которые эффективно разрушаются механическим рабочими органами горных машин; II – легкоразрушаемые скальные породы с прочностью на одноосное сжатие 50-100 МПа, механическое рыхление которых может вестись с приемлемой производительностью гидромолотами, горными комбайнами различных конструкций

и другим оборудованием; III, IV, V – соответственно скальные породы средней трудности разрушения, трудноразрушаемые и весьма трудноразрушаемые, рыхление которых ведется практически в полном объеме взрывным способом. Также дифференцированно необходимо подходить к переработке добытого минерального сырья для обеспечения наибольшего извлечения металла при приемлемой себестоимости процессов.

Предлагается усовершенствованная технология селективной выемки руд сложноструктурных месторождений цветных и благородных металлов, в соответствии с которой на основе минералого-геохимических исследований, включающих электронную микроскопию и геотехнологическое тестирование крупнообъемных проб, осуществляется глубокое дифференцирование руд по типам, отражающим не только особенности вещественного состава и текстурно-структурные характеристики, но и соотношение форм нахождения благородных металлов, включая инкапсулированные и химически связанные, дисперсные. Внутри типов руд выделяются сорта от богатых до особо бедных (рис. 6). Специальные высокочрезвычайно затратные методы переработки богатых руд (двухстадийное сорбционное выщелачивание, автоклавное выщелачивание и др.), позволят получить наиболее высокие показатели извлечения металла. При этом, поскольку в хвостах переработки будут иметь место содержания полезного компонента сопоставимые с таковыми для бедных руд, то хвосты целесообразно подвергать последующей переработке с использованием физико-химических геотехнологий (кучное или скважинное выщелачивание).

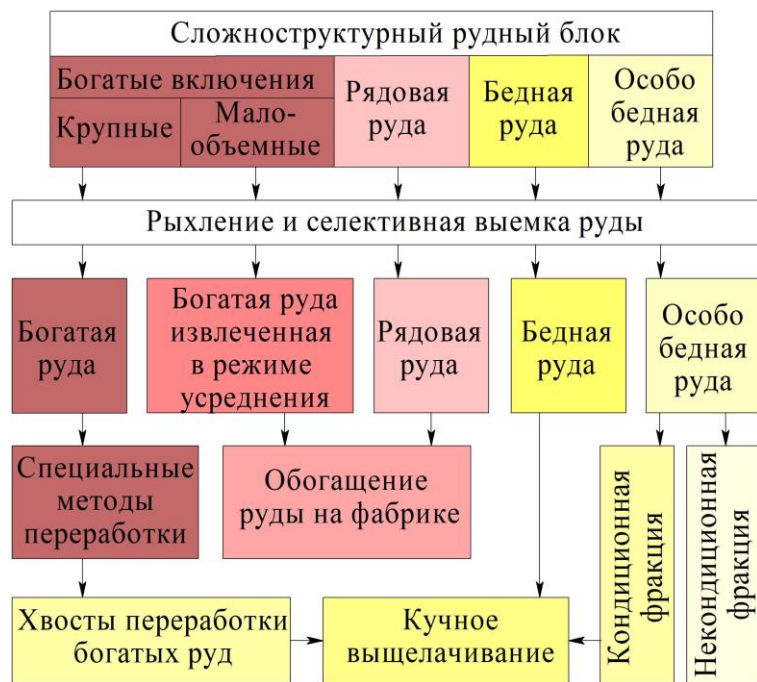


Рис. 6. Принципиальная схема формирования рудопотоков при отработке сложноструктурного блока

Богатая руда малообъемных включений, извлеченная в режиме усреднения, перерабатывается совместно с рядовой рудой на обогатительной фабрике, при этом их объединение может производиться как на усреднительном складе, так и после измельчения в случае значительного различия физико-

механических характеристик руд. Бедная руда направляется на кучное выщелачивание (после дробления до размера 10...20 мм), как правило, без окомкования. При высокой контрастности особо бедной (некондиционной) руды

возможно выделение обогащенной рудной мелочи (кондиционной фракции) непосредственно в процессе выемки или при складировании некондиционной руды с применением разработанных автором технико-технологических решений.

В работах ряда исследователей выявлено, что у многих руд в процессе взрывного или механического рыхления происходит концентрирование полезных компонентов в мелких классах рудной массы, в тоже время крупные фракции имеют относительно низкое содержание полезных компонентов. В ИГД ДВО РАН с участием автора были проведены комплексные аналитические и геотехнологические исследования проб взорванных кварц-серицитовых метасоматитов золоторудного месторождения Перевальное (Хабаровский край) с разделением их по классам крупности и по сортам руд, выделенных по различным содержаниям металла, результаты исследований представлены на рисунке 7.

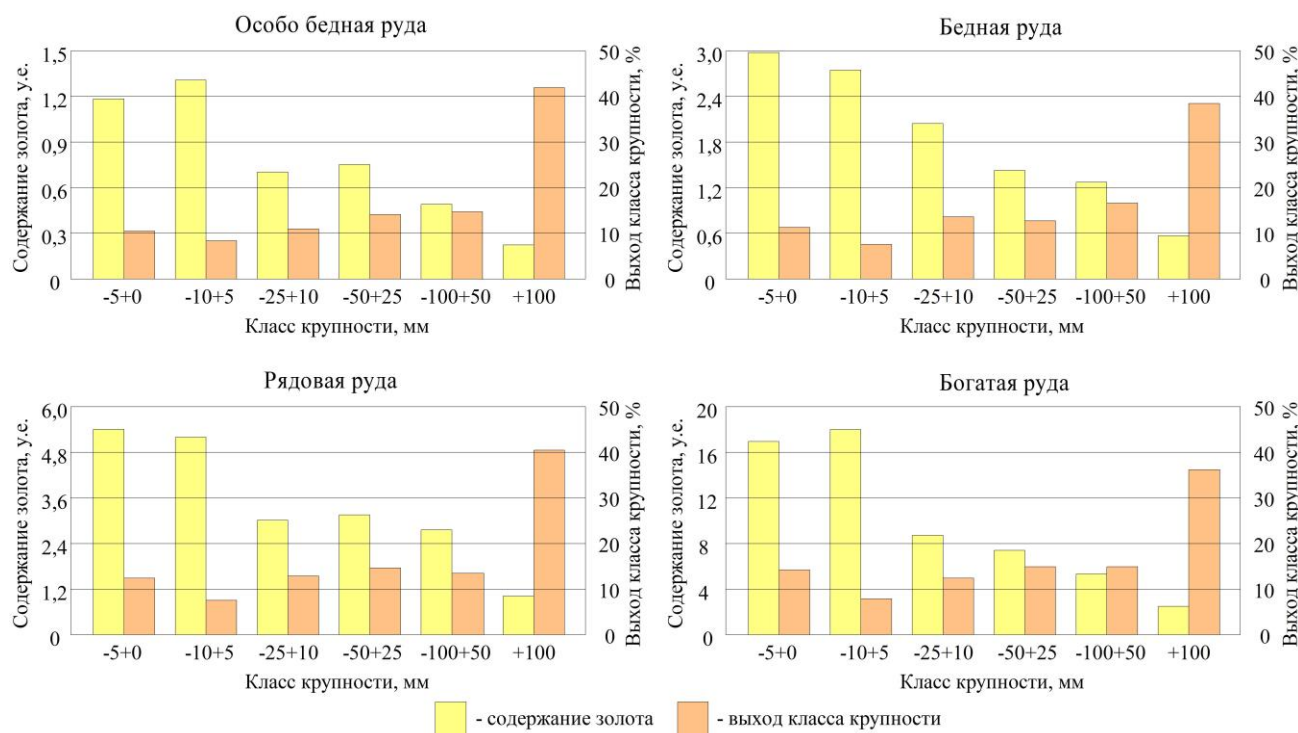
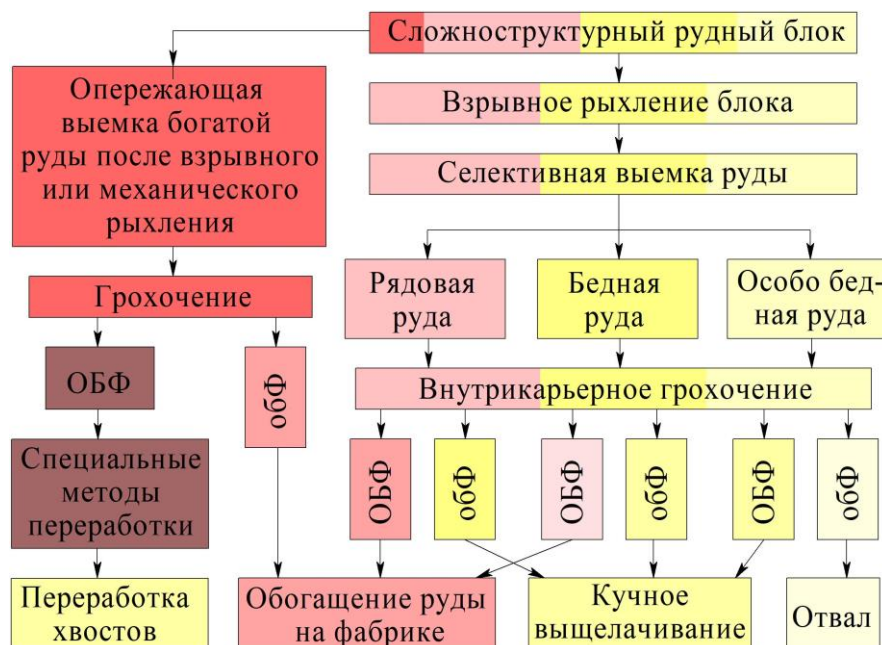


Рис. 7. Распределение рудной массы по классам крупности после взрыва и содержания металла в различных сортах руд

Анализы проводились с применением атомно-абсорбционного метода с использованием спектрофотометра AA-7000 Shimadzu (Япония). Исследование показало, что содержание металла в мелких классах (-10 мм) в 2,0...2,3 раза превышает средний показатель в пробах руд различных сортов, что позволяет направлять отделенный обогащенный класс -10 мм некоторых сортов на переработку совместно с рудами более высокого сорта. В тоже время, класс +100 мм и в некоторых случаях класс -100+50 мм имеют относительно низкое содержание золота. Таким образом, для некоторых сортов руд может быть це-

лесообразным выделение обедненных полезным компонентом крупных классов с их направлением на переработку с рудами более низкого сорта с использованием менее затратных технологий.

На рисунке 8 представлена рекомендуемая схема формирования рудопотоков, сложноструктурного блока исследуемого золоторудного месторождения Перевальное.



ОБФ - обогащенная фракция; обФ - обедненная фракция

Рис. 8. Схема формирования рудопотоков при отработке сложноструктурного блока, для руд которого характерно фракционирование по классам крупности с существенно различающимся содержанием полезного компонента

Для повышения эффективности переработки минерального сырья предлагается из

богатых руд после грохочения выделять обогащенный класс -50мм, направляемый на специальную переработку (двухстадийное сорбционное выщелачивание), обеспечивающую повышенное извлечение металла, из рядовой руды удалять обедненный полезным компонентом класс +100 мм, который после дробления направляется на кучное выщелачивание, а выделенную из бедной руды обогащенную рудную мелочь (-10 мм) транспортировать на обогатительную фабрику для переработки совместно с рядовой рудой по флотационной схеме.

Границы выделяемых сортов руд определяются технологическими режимами и параметрами их переработки с применением критерия оценки эффективности комбинированных технологий добычи и переработки руд сложноструктурного месторождения, в качестве которого автор предлагает использовать суммарный максимальный чистый дисконтированный доход, получаемый за весь период эксплуатации месторождения. В общем виде критерий оценки эффективности целесообразно представить с учетом возможности последующей переработки хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатых руд:

$$\begin{aligned}
 ЧДД = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+E)^t} [& Q_{it}^B c_i^B k_{ni}^B k_{oi}^B k_{mi} (C_t - 3_t^B) + Q_{it}^P c_i^P k_{ni}^P k_{oi}^P k_{mi} (C_t - 3_t^P) + Q_{it}^O c_i^O k_{ni}^O k_{oi}^O (C_t - 3_t^O) + \\
 & + Q_{it}^H c_i^H k_{ni}^H k_{oi}^H k_{mi} (C_t - 3_t^H) + Q_{it}^F c_i^F k_{ni}^F k_{oi}^F (1 - k_{oi}^B) k_{ei}^X (C_t - 3_t^X) + Q_{it}^K c_i^K k_{ni}^K k_{oi}^K (1 - k_{oi}^B) (1 - k_{mi}) (C_t - 3_t^K)] \rightarrow \max
 \end{aligned} \quad (3)$$

где N – число разрабатываемых блоков; T – время отработки месторождения, лет; E – коэффициент приведения разновременных затрат; t – год приведения; i – индекс рудного блока; $Q_{it}^B, Q_{it}^P, Q_{it}^{\bar{B}}, Q_{it}^H$ – соответственно количество добываемой богатой, рядовой, бедной и некондиционной (особо бедной) руды; $c_i^B, c_i^P, c_i^{\bar{B}}, c_i^H$ – содержание полезного компонента соответственно в богатой, рядовой, бедной и некондиционной руде в i -м блоке; $k_{ni}^B, k_{ni}^P, k_{ni}^{\bar{B}}, k_{ni}^H$ – коэффициент извлечения из недр соответственно богатой, рядовой, бедной и некондиционной руды для i -го блока; k_{oi}^B, k_{oi}^P – коэффициент извлечения полезного компонента при обогащении соответственно богатой и рядовой руды; k_{mi} – коэффициент извлечения полезного компонента при металлургическом переделе; C_t – цена полезного компонента в t -м году; $Z_t^B, Z_t^P, Z_t^{\bar{B}}, Z_t^H, Z_t^X, Z_t^K$ – затраты на полный технологический цикл по извлечению полезного компонента в t -м году, соответственно из богатой, рядовой, бедной, некондиционной руды, хвостов и кеков; $k_{ei}^{\bar{B}}, k_{ei}^H$ – коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании, соответственно бедной и некондиционной руды; k_{ni}^H – коэффициент, учитывающий выход из некондиционной руды продуктивной фракции; k_{ei}^X, k_{ei}^K – коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании из хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатой руды.

При этом количество богатой руды, требующей для переработки специального оборудования, должно обеспечивать окупаемость дополнительных капитальных вложений. Использование данного критерия позволяет определять оптимальные границы содержания полезного компонента для выделения технологических сортов руд.

Автором проведена сравнительная технико-экономическая оценка эффективности различных технологий освоения одного из сложноструктурных участков золоторудного месторождения Перевальное с применением предлагаемой технологической схемы, представленной на рисунке 8, и традиционных технологий горно-обогажительного производства. Предлагаемая технология в сравнении с традиционной технологией отдельной переработки руд (на обогажительной фабрике и кучным выщелачиванием) позволила увеличить сквозное извлечение металла на 5,5 % при сопоставимой себестоимости металла.

Таким образом доказано, что *селективное извлечение запасов по сортам с выделением богатых включений при отработке сложноструктурного блока обеспечивает стабилизацию качества в границах оставшихся сортов руд (песков россыпей) при последующей отдельной переработке, что позволяет повысить сквозное извлечение металла на 4-14 %, в том числе за счет переработки части формируемых техногенных отходов.*

Третья глава диссертации посвящена обоснованию путей совершенствования схем оконтуривания, комбинированной подготовки к выемке и собственно выемки руд сложноструктурных эксплуатационных блоков.

Исследованиями доказано, что для эффективного освоения сложноструктурных месторождений требуется обоснование технологических схем, обеспечивающих внутрисортовую селекцию. Это требует разработки новых и усовершенствованных технико-технологических решений по селективной выемке руд различных сортов с учетом их физико-технических параметров. При отработке сложноструктурного выемочного блока целесообразно вести внутрисортовую селективную выемку включений богатых руд для уменьшения их перемешивания с рудами, имеющими существенно более низкое содержание полезного компонента. Диссертантом обоснован алгоритм выбора технологии разработки сложноструктурных месторождений, представленный в виде блок-схемы (рис. 9).

Открытая разработка включает первую стадию сопровождающей эксплуатационной разведки с бурением взрывных скважин и выделением на основании данных перебура (при отработке вышележащего блока) обогащенных участков, в которых взрывные скважины бурятся с поинтервальным опробованием. По результатам данных опробования перебура основных скважин, уступ может быть разделен на два подступа, также определяются места бурения взрывных скважин на следующий горизонт. Таким образом, после выявления зон с повышенным содержанием полезного компонента ($C_i > C_p$), осуществляется вторая стадия сопровождающей эксплуатационной разведки, со сгущением сети скважин (меньшего диаметра) с уменьшенным интервалом опробования, на основании данных которой принимается решение о возможности ведения селективной выемки с учетом предложенных показателей сложности оруденения K_B , ψ_B и параметров имеющегося горного оборудования с оконтуриванием включений богатых руд в плане и по вертикали. Также составляется сортовой план эксплуатационного блока. Проводится опережающее взрывное рыхление богатых включений с использованием сгущенной сети скважин и получением качественно раздробленной рудной массы. В случае если прочность руд не превышает величины позволяющей вести локальную механическую выемку руды ($\sigma_i \leq \sigma_{\text{мех}}^{\text{лок}}$) предпочтительно для уменьшения пересортицы осуществлять безвзрывную выемку богатых руд. Для повышения эффективности механической выемки в некоторых случаях целесообразно проводить дезинтеграцию руд с применением растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Опережающая выемка взорванных при соблюдении соответствующих параметров БВР богатых руд ведется гидравлическим экскаватором типа «обратная лопата», который переоснащается грейферным ковшом при ограниченных в плане размерах включений ($L_i < L_{30}$). Также целесообразно его использование при выемке относительно крупных включений со сложным чередованием сортов руд для уменьшения пересортицы. После взрывного рыхления эксплуатационного блока с учетом технологической совместимости руд может вестись селективная выемка сортов, либо выемка в режиме усреднения. При этом в случае доминирующей изменчивости в плане для обеспечения выемки в режиме усреднения следует использовать фронтальные погрузчики, а при вертикальной – одноковшовые экскаваторы.

Доработку прибортовых запасов руд сосредоточенных в маломощных рудных телах с содержаниями полезного компонента не ниже рядового C_p целесообразно вести посредством механической выемки посредством специального оборудования с оставлением целиков, либо локальной взрывной подготовки с использованием специальных скважинных зарядов, конструкция которых разработана с участием автора, и последующим извлечением полученной рудной массы гидравлическим грейферным агрегатом.

Повысить эффективность локальной механической выемки скальных пород средней трудности разрушения прочностью на одноосное сжатие 100-150 МПа возможно путем их предварительного разупрочнения с применением растворов ПАВ. Исследование прочностных характеристик проводилось с участием автора на образцах горных пород золоторудного месторождения Талатуй, при этом испытывались образцы находящихся как в естественном состоянии, так и после пропитки в растворе ПАВ. Определение прочности на одноосное сжатие пород проводилось с применением испытательной машины ToniРАСТ II (Германия), испытания предела прочности на одноосное растяжение проводилось на установке ToniNORM, результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения предела прочности образцов руд при одноосном сжатии и растяжении

Вещественная основа руды	В естественном состоянии		После обработки раствором ПАВ	
	Сжатие, МПа	Растяжение, МПа	Сжатие, МПа	Растяжение, МПа
Роговики	180,8	5,50	157,4	5,38
Березиты	135,3	5,03	91,4	3,69
Кварц-гидрослюдистые метасоматиты	107,9	6,12	62,3	3,62
Хлориты	99,3	5,63	78,2	3,79

Пропитка образцов руд раствором ПАВ привела к снижению их прочности на одноосное сжатие, так прочность березитов в среднем снизилась на 32,4 %, кварц-гидрослюдистых метасоматитов – на 42,3 %, хлоритов – на 21,2 %. Также после обработки раствором ПАВ снизилась прочность образцов на одноосное растяжение: березитов на 26,4 %, кварц-гидрослюдистых метасоматитов на 40,8 %, хлоритов на 32,7 %. Наименьшее изменение физико-механических свойств было выявлено у роговиков, у которых прочность на одноосное сжатие снизилась на 12,9 %, а на одноосное растяжение – на 2,2 %.

На рисунке 10 приведена адаптивная технологическая схема отработки сложноструктурного рудного тела, обоснованная диссертантом, с детальной разведкой участков, представленных богатыми рудами, проведенной путем сгущения сети скважин с последующей пропиткой массива раствором ПАВ, подаваемого из автоцистерны в скважины, пробуренные по уплотненной сети.

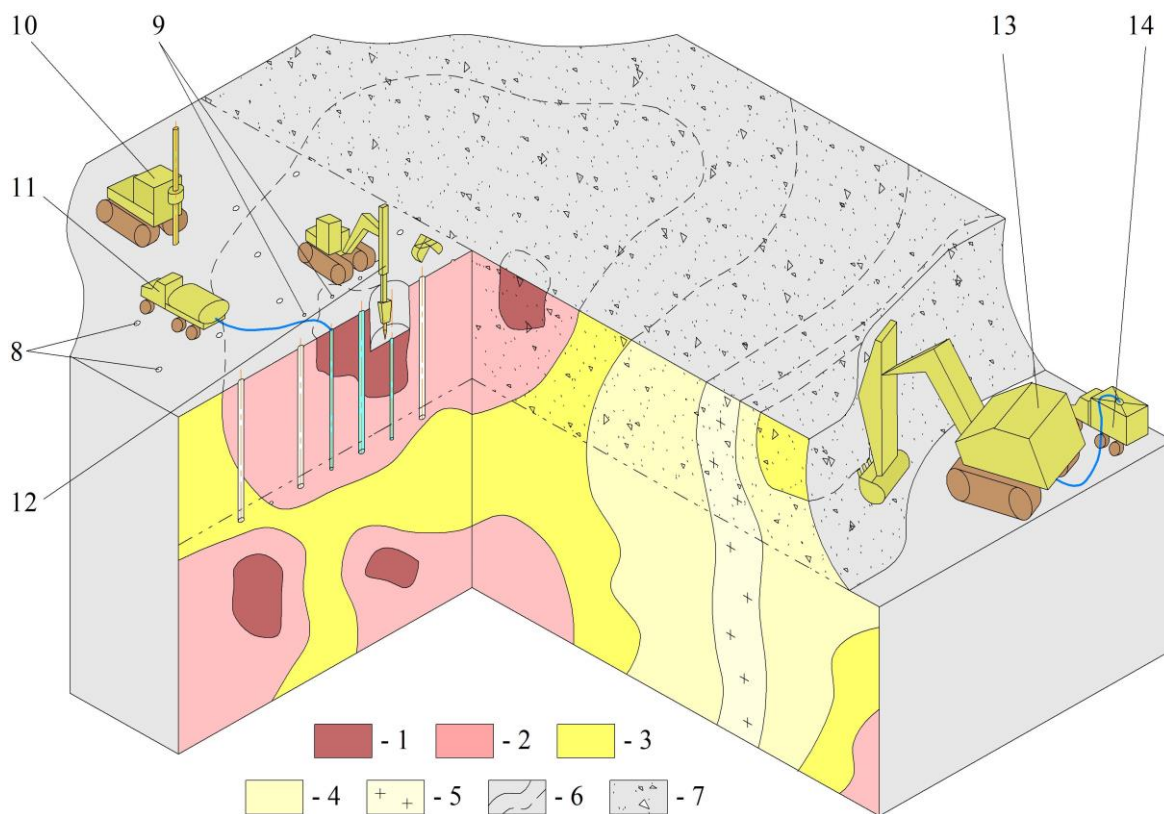


Рис. 10. Адаптивная технологическая схема отработки сложноструктурного рудного тела штокверкового типа: 1 – богатая руда; 2 – рядовая руда; 3 – бедная руда; 4 – особо бедная руда; 5 – пустые породы; 6 – контуры сортов руд; 7 – взорванные руда и порода; 8 – взрывные скважины; 9 – скважины детальной разведки; 10 – буровая установка; 11 – автоцистерна с раствором ПАВ; 12 – экскаватор со сменным оборудованием; 13 – карьерный экскаватор; 14 – самоходный бункер для сбора обогащенной рудной мелочи

Автором предложена формула по определению потребного диаметра скважин для заливки необходимого объема раствора ПАВ:

$$d \geq \sqrt{\left(\frac{4Q\delta}{\pi H k_n} - ND^2 \right) / n}, \quad (4)$$

где Q - объем разупрочняемого богатого рудного включения, м³; δ - удельный расход раствора ПАВ для пропитки массива, м³/м³; H - высота разупрочняемого уступа, м; k_n - эмпирический коэффициент, учитывающий частичное поглощение раствора ПАВ непосредственно при заливке из-за наличия трещиноватости и пористости массива; N , n - соответственно, число скважин основной сети и число скважин малого диаметра, расположенных в объеме богатого рудного включения; D - диаметр скважин основной сети, м.

После разупрочнения богатых руд ведется их рыхление гидромолотом установленным на экскаваторе с последующей выемкой сменным гидравлическим грейферным оборудованием. Затем осуществляется взрывание блока под пригрузкой рудной массой ранее взорванного блока с возможностью селективной выемки или усреднения руд ранее взорванного блока. При выемке может быть использован карьерный экскаватор с ковшом специальной конструкции для отделения обогащенной рудной мелочи из особо бедных руд.

При разработке рудных жил с применением взрывного рыхления происходит существенное ухудшение качества добываемого высокоценного минерального сырья из-за его перемешивания с околожильными породами, в связи с чем применительно к жильным объектам необходимо оценивать соотношение продуктивных площадей и площади минерализованных вмещающих пород, а также морфологические особенности основной продуктивной части жилы.

По результатам исследования предлагается адаптивная технология открытой разработки маломощных рудных тел с высоко-градиентной зональностью (для которой характерно сосредоточение полезного компонента в зальбандах), предполагающая уточнение контуров жилы и составление сортового плана, который может быть реализован на основе цифровых моделей, в ходе эксплуатационной разведки. В процессе взрывного рыхления вскрышных и вмещающих горных пород происходит существенное ослабление массива в пределах ближней зоны действия взрыва с образованием и прорастанием трещин, нарушением связности по поверхностям структурных неоднородностей, что позволяет достаточно эффективно осуществлять механическое рыхление рудного тела. Селективная отбойка ослабленных взрывом разнорудных руд ведется гидромолотом, устанавливаемым в качестве сменного оборудования на одноковшовый экскаватор (рис. 11а). Последовательно отбиваемая разнорудная рудная масса ссыпается к подошве уступа, откуда грузится в транспортные средства, направляемые к соответствующему месту переработки минерального сырья.

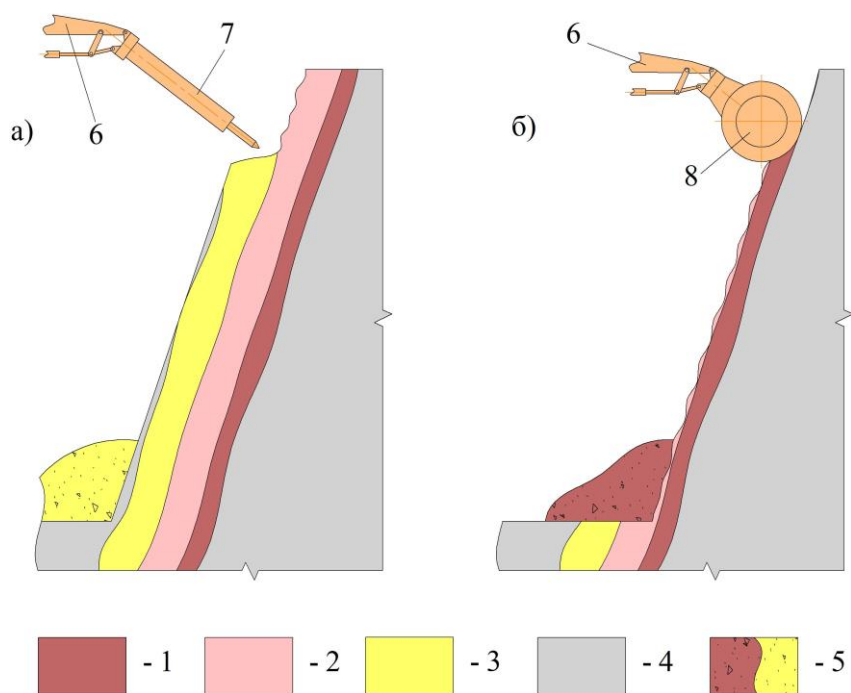


Рис. 11. Схема адаптивной технологии открытой разработки маломощных рудных тел с высокоградиентной зональностью: а – селективная отбойка бедных и рядовых руд; б – фрезерование богатых руд зальбандой; 1 – богатая руда; 2 – рядовая руда; 3 – бедная руда; 4 – вмещающие породы; 5 – разрыхленная рудная масса; 6 – одноковшовый экскаватор; 7 – гидромолот; 8 – фрезерный рабочий орган

При малой мощности включения с богатыми рудами для снижения разубоживания и пересортицы при отбойке гидромолот заменяется на фрезерный рабочий орган (рис. 11б). При отработке участков рудного тела, в которых отсутствуют включения богатых руд, их отбойка может вестись с применением взрыва, а полученная рудная масса в зависимости от среднего содержания металла направляется на фабрику или на штабель кучного выщелачивания.

Использование селективной выемки разнорудных руд и их отдельной переработки посредством технологий с различным уровнем затрат и извлечения, обеспечит увеличение сквозного извлечения металла на 4-7 % при уровне рентабельности, сопоставимом с традиционными технологиями.

Дополнительно увеличить эффективность освоения месторождений возможно за счет вовлечения в отработку части прибортовых запасов. В зависимости от прочности руд их дезинтеграция может осуществляться с применением взрыва или без него. Для доработки маломощных рудных тел оставшихся в прибортовом и подкарьерном пространстве предлагается технология, заключающаяся в бурении скважин малого диаметра с поинтервальным опробованием и выявлением богатых участков жилы, размещении специальных скважинных зарядов с ортогонально-ориентированными кумулятивными полостями и их взрывании, селективной выемке рудной массы усовершенствованным гидравлическим грейферным агрегатом с ковшом изменяемой ширины, регулируемой с учетом мощности рудного тела. Для доработки руд прочностью на одноосное сжатие до 80-100 МПа может быть использовано разработанное с участием автора технико-технологическое решение, предполагающее применение добычной установки с автономным выемочным модулем, оснащенным фрезерным

рабочим органом и системой пневмотранспортирования разрыхленной мелкокусковой рудной массы. Доработка части прибортовых запасов с применением специальных видов выемочного оборудования с учетом имеющейся инфраструктуры продлевает срок службы горнодобывающих предприятий и увеличивает коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр.

Таким образом обосновано, что *для условий разработки месторождений цветных и благородных металлов, сложенных относительно прочными контрастными рудами, необходимо дифференцированно производить выемку технологических сортов руд с предварительной дезинтеграцией и максимальным сохранением природной структуры массива.*

Четвертая глава диссертации посвящена вопросам повышения эффективности безвзрывной разработки сложноструктурных месторождений, характеризующихся высокой изменчивостью качественных и прочностных параметров участков залежей, представленных минеральными образованиями преимущественно невысокой крепости, с прочностью на одноосное сжатие до 60-70 МПа.

В настоящее время с применением карьерных комбайнов и фрезерных машин ведется послойная разработка сложноструктурных месторождений карбонатных пород, фосфоритов, апатитов, кимберлитов, угля и других полезных ископаемых. При этом прочность пород сложноструктурного массива может существенно варьировать, в связи с чем, в большом диапазоне изменяется производительность выемочных машин. В результате анализа научно-технической литературы и обработки приведенных в ней данных автором получены зависимости технической производительности карьерных комбайнов различных типоразмеров от прочности разрабатываемых горных пород (рис. 12).

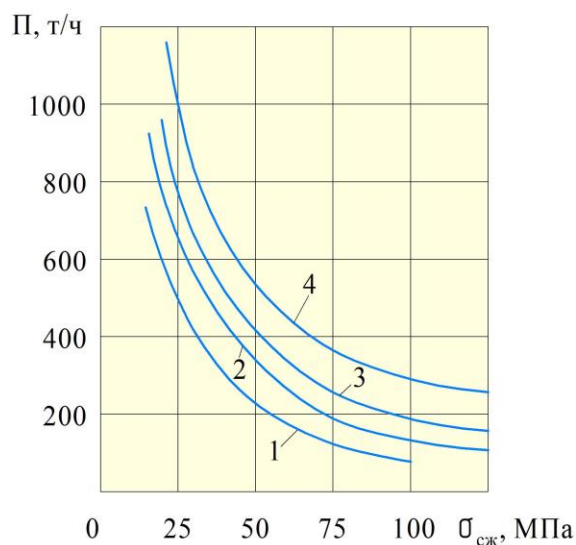


Рис. 12. Зависимости технической производительности комбайнов от прочности горных пород на сжатие: 1 – комбайн Wirtgen 2100SM; 2 – комбайн Wirtgen 2600SM; 3 – комбайн Wirtgen 2200SM; 4 – комбайн Wirtgen 2500SM

Так по данным исследований д.т.н. Рыльниковой М.В. и к.т.н. Швабенланд Е.Е., выполненных применительно к Ошурковскому месторождению апатитов, техническая производительность карьерного комбайна Wirtgen 2500SM при разработке руд различной прочности может отличаться более чем в четыре раза. При послойной отработке комбайном

участков руд относительно высокой прочности это приводит к повышенным нагрузкам на рабочее оборудование комбайна, значительному снижению его производительности, а также к простоям автосамосвалов в ожидании погрузки.

С учетом проведенных исследований предлагается адаптивная технология, обеспечивающая возможность эффективного массового послойного механического рыхления сложноструктурных массивов, сложенных породами существенно различающимися по прочности, включая легко разрабатываемые скальные породы прочностью на сжатие до 80...100 МПа, с применением усовершенствованной машины послойного фрезерования, снабженной устройством для нарезания в приповерхностном слое руд относительно высокой прочности щелей, с подачей в них через форсунки раствора ПАВ для предварительного разупрочнения массива (рис. 13), тип ПАВ определяется вещественным составом руд. После пропитки массива ведется выемка разупрочненного верхнего слоя с одновременным нарезанием щелей и подачей раствора ПАВ в нижележащий слой. При отработке участков руд невысокой прочности нарезание щелей и подача раствора ПАВ в массив не производится. Отбитая разносортная рудная масса через транспортно-сортировочный агрегат подается в открытую траншею, откуда селективно извлекается одноковшовым погрузчиком. При этом на транспортно-сортировочном агрегате выделяется рудная мелочь с повышенным содержанием полезного компонента, в том числе и продуктивная мелкая фракция из некондиционной рудной массы.

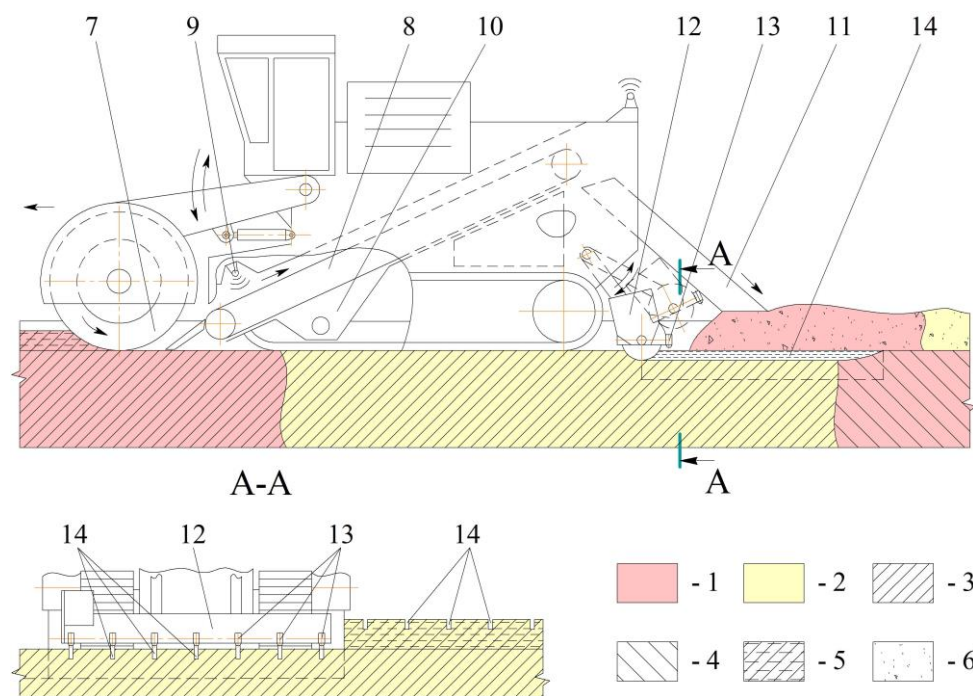


Рис. 13. Схема разработки сложноструктурного рудного массива усовершенствованной машиной послойного фрезерования: 1 – кондиционная руда; 2 – некондиционная руда; 3 – руда относительно высокой прочности; 4 – руда невысокой прочности; 5 – разупрочненный верхний слой;

6 – отбитая рудная масса; 7 – фрезерный рабочий орган; 8 – транспортно-сортировочный агрегат; 9 – датчик контроля содержания полезного компонента в руде; 10 – накопитель; 11 – лоток; 12 – устройство для нарезания щелей; 13 – форсунки для подачи ПАВ в щели; 14 – щели

Автором были проведены технико-экономические расчеты технологических схем по разработке руд Ошурковского месторождения с применением комбайна Wirtgen 2500SM без подготовки участков относительно прочных руд (прочность на сжатие 93,6МПа) к выемке и с подготовкой путем их разупрочнения раствором ПАВ, при снижении прочности руд на 35 % производительность комбайна увеличится в 1,5...1,7 раза, что позволит существенно снизить себестоимость добычных работ.

Также предлагаемое оборудование для нарезания щелей и подачи раствора ПАВ может быть установлено и на серийно выпускаемые карьерные комбайны, в частности комбайны фирмы Wirtgen, которые достаточно широко используются при освоении сложноструктурных месторождений в России. Наибольший эффект от применения машин послыного фрезерования, обеспечивающих селективную выемку, возможно получить при разработке сложноструктурных пластов угля, фосфоритов, известняков и некоторых других полезных ископаемых, что позволяет стабилизировать качество добываемого минерального сырья перед направлением его на переработку.

Сформулированные академиком РАН Трубецким К.Н. направления совершенствования современных технологий предполагают обеспечение малоотходности, ресурсосбережения и комплексного использования извлекаемого из недр минерального сырья. Так ископаемые угли являются не только энергетическим и технологическим сырьем, но и источником многих высокоценных сопутствующих компонентов, включая редкоземельные металлы, в повышенных концентрациях, при этом в некоторых случаях стоимость высокоценных металлов превышает стоимость угля. Распределение высокоценных элементов в массиве угольных месторождений неравномерно, зачастую они концентрируются в тонких контактовых зонах угольных пластов. Прочность прослоев пустых пород в сложноструктурных пластах обычно многократно превышает прочность угля, это затрудняет их механическую выемку карьерными комбайнами, при этом зачастую пласты имеют пологое или наклонное залегание, что приведет к стеканию раствора ПАВ под уклон в случае разупрочнения прослоев согласно схеме, приведенной на рис.13.

Диссертантом обосновано технико-технологическое решение по безвзрывной разработке пологих сложноструктурных пластов, включающих прочные породные прослойки. Основной объем сложноструктурных пластов обычно представлен породами невысокой прочности, механическое рыхление которых посредством фрезерного рабочего органа не вызывает затруднений. При обнажении в процессе выемки усовершенствованным карьерным комбайном угольного пропластка прочного породного прослоя в работу включается устройство для формирования прерывистых щелей в виде последовательности сегментов, которые через форсунки заполняются раствором ПАВ (рис. 14).

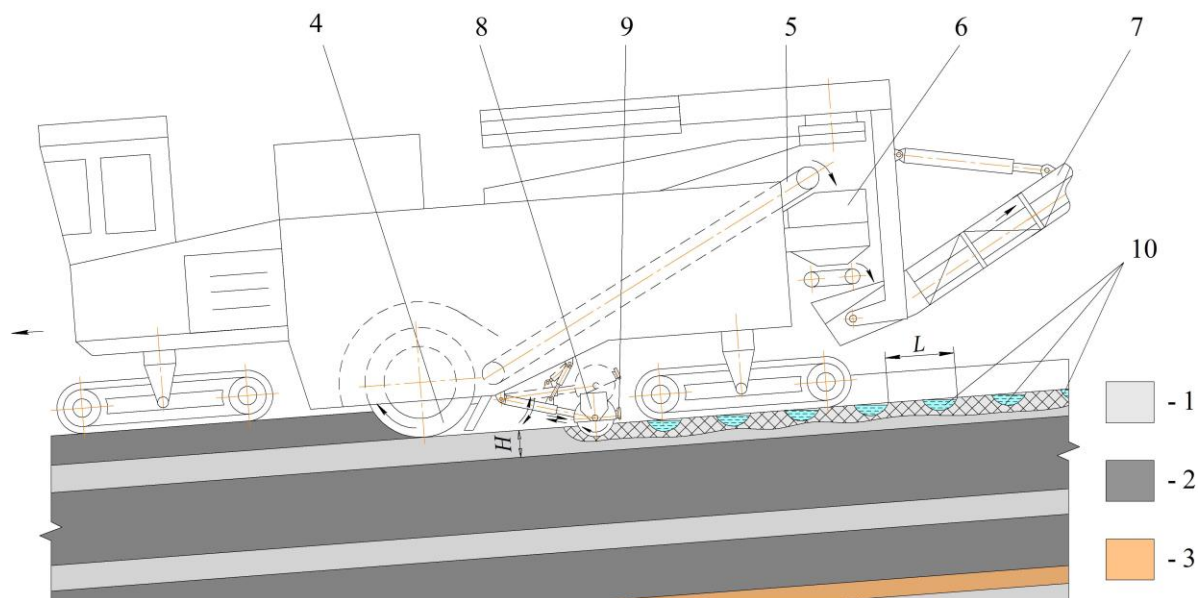


Рис. 14. Схема разработки пологого сложноструктурного угольного пласта с применением модернизированного карьерного комбайна: 1 – прочные породные прослои; 2 – угольные пропластки; 3 – пропласток обогащенный высокоценными компонентами; 4 – фрезерный рабочий орган; 5 – перегрузочный транспортер; 6 – промежуточный бункер с питателем; 7 – разгрузочный конвейер; 8 – устройство для нарезания прерывистых щелей; 9 – форсунки; 10 – сегменты прерывистых щелей

Наличие целиков в прерывистой щели исключает стекание раствора ПАВ под уклон с разливом по поверхности рабочей площадки и испарением, раствор ПАВ остается в сегментах и постепенно поглощается через стенки, обеспечивая равномерное разупрочнение слоя относительно прочных пород. В это время модернизированным карьерным комбайном отрабатываются смежные полосы угольного пропластка с аналогичной пропиткой прочного породного прослоя. Затем производится механическое рыхление и выемка разупрочненного породного прослоя. Ширина щелей для заливки необходимого объема раствора ПАВ может быть определена по формуле:

$$b = \frac{HBLV k_n}{Sn}, \quad (5)$$

где H , B - соответственно, мощность и ширина разупрочняемого слоя, м; L - шаг нарезания сегментов прерывистых щелей, м; δ - удельный расход раствора ПАВ на пропитку массива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; k_n - эмпирический коэффициент, учитывающий частичное поглощение раствора ПАВ непосредственно при заливке из-за наличия трещиноватости и пористости массива; S - полезная площадь сегмента прерывистой щели, м; n - число одновременно нарезаемых прерывистых щелей.

Для повышения эксплуатационной производительности за счет снижения простоев при замене автосамосвалов под погрузкой усовершенствованный

карьерный комбайн снабжен промежуточным бункером с питателем для временного аккумулирования горной массы при безостановочном фрезеровании. Расчеты показывают, что использование промежуточного бункера позволит в среднем увеличить эксплуатационную производительность карьерного комбайна на 12-15 %.

Таким образом доказано, что *безвзрывное рыхление при разработке месторождений, характеризующихся высокой изменчивостью качественных и прочностных параметров участков залежей, представленных минеральными образованиями преимущественно невысокой прочности с наличием относительно прочных включений, целесообразно вести с их предварительным физико-химическим разупрочнением, что позволит увеличить производительность механического рыхления в 1,5-1,7 раза.*

Пятая глава диссертации посвящена вопросам повышения эффективности разработки сложноструктурных россыпных месторождений путем обоснования технико-технологических решений с применением усовершенствованных колесных скреперов, а также другого оборудования.

Несмотря на увеличение доли рудного золота в общем объеме добычи, россыпные месторождения продолжают оставаться перспективными объектами разработки. В последние десятилетия в связи с интенсивной отработкой качество минерально-сырьевой базы россыпных месторождений золота неуклонно снижается. Уменьшаются содержания металла в песках, растет доля мелкого и дисперсного золота, что ведет к увеличению потерь при переработке песков традиционными способами. Обеспечить повышение извлечения полезного компонента возможно путем повышения уровня селекции при выемке песков и гибкого применения различных схем переработки, учитывающих содержание полезного компонента в песках, коэффициент выхода металла, крупность и формы золота, а также другие параметры. Длительная практика разработки россыпей дает множество примеров их ярко выраженного зонального строения, в связи с чем в большинстве случаев сгущение разведочной сети увеличивает количество выявленных гнезд с богатой минеральной массой при одновременном уменьшении их площади. Малая мощность обогащенных зон затрудняет качественную селективную выемку богатых песков имеющимся оборудованием.

Диссертантом обоснован ряд технико-технологических решений позволяющих повысить эффективность освоения россыпных месторождений, имеющих сложные горнотехнические условия, в частности разработана комбинированная технология для открытой отработки сложноструктурных россыпных месторождений, которая предполагает уточнение контуров богатых зон путем локального сгущения сети скважин после проведения вскрышных работ в случае

выявления в ходе эксплуатационной разведки включений песков с содержанием металла выше рядовых значений (рис. 15).

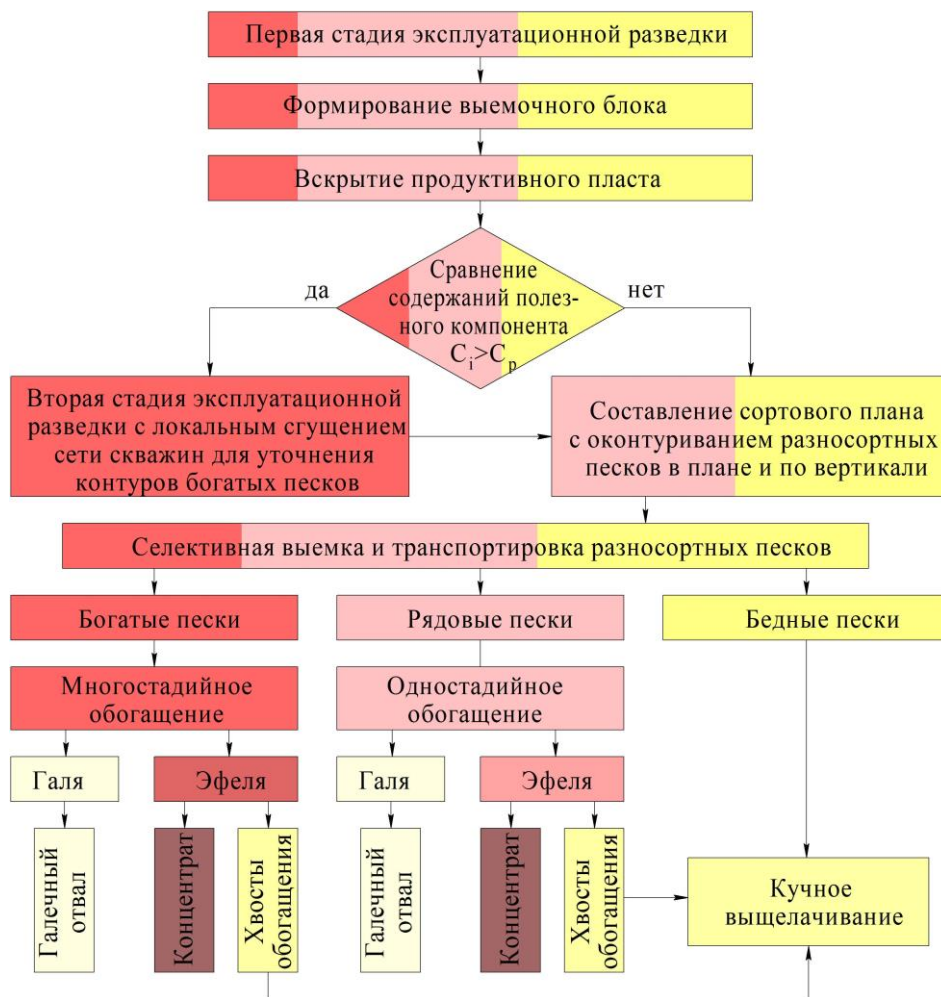


Рис. 15. Схема добычи и переработки золотосодержащих песков сложноструктурного выемочного блока: C_i – содержание металла в i -й пробе; C_p – верхнее граничное содержание металла в рядовых песках

На основании данных эксплуатационной разведки формируется сортовой план с оконтуриванием богатых (при наличии), рядовых, бедных песков в плане и по вертикали. Осуществляется селективное извлечение разноразных песков, при этом выемка и транспортировка рядовых и бедных песков, составляющих основную часть блока, ведется высокопроизводительными бульдозерами тяжелого класса. Рядовые пески перемещаются к промывочному прибору, находящемуся на границе выемочного блока, а бедные пески – за границу выемочного блока в ранее выработанное пространство, где из них формируется штабель для проведения в дальнейшем кучного выщелачивания. Выемка относительно небольших по объему включений богатых песков ведется усовершенствованным колесным скрепером с комбинированным оборудованием с последующим их перемещением к комплексу многостадийного обогащения, богатые пески поступают с нескольких добычных участков на расстояние до 3...5 км, что обеспечивает высокопроизводительную работу комплекса при относительно небольших эксплуатационных затратах. Хвосты обогащения, образовавшиеся в процессе переработки эфелей богатых и рядовых песков, перемещают в штабель для выщелачивания совместного с бедными песками.

Границы выделяемых сортов песков определяются технологическими режимами и параметрами их переработки с применением критерия оценки эф-

фактивности комбинированной технологии добычи и переработки песков сложноструктурного россыпного месторождения, в качестве которого автор предлагает использовать максимум получаемой прибыли в ходе отработки выемочного блока. Критерий оценки эффективности также учитывает возможность последующей переработки хвостов обогащения богатых и рядовых песков:

$$\begin{aligned}
 \Pi = & Q^B c^B k_n^B k_o^{mn} k_m (C - 3^B) + Q^P c^P k_n^P k_o^{od} k_m (C - 3^P) + \\
 & + Q^\delta c^\delta k_n^\delta (1 - k^{np}) k_e (C - 3^\delta) + (Q^{xB} c^{xB} + Q^{xP} c^{xP}) (1 - k^{np}) k_e (C - 3^x) \rightarrow \max \quad (6)
 \end{aligned}$$

где $Q^B, Q^P, Q^\delta, Q^{xB}, Q^{xP}$ – соответственно количество богатых, рядовых и бедных песков, а также хвостов обогащения богатых и рядовых песков; $c^B, c^P, c^\delta, c^{xB}, c^{xP}$ – содержание полезного компонента, соответственно в богатых, рядовых и бедных песках, а также хвостах обогащения богатых и рядовых песков; k_n^B, k_n^P, k_n^δ – коэффициент извлечения из недр, соответственно богатых, рядовых и бедных песков; k_o^{mn}, k_o^{od} – средневзвешенный коэффициент извлечения полезного компонента при обогащении, соответственно с применением многостадийной и одностадийной технологий с учетом ситового анализа золота; k_m – коэффициент извлечения полезного компонента при металлургическом переделе; C – цена полезного компонента; $3^B, 3^P, 3^\delta$ – затраты на полный технологический цикл по добыче песков и извлечению полезного компонента, с учетом эксплуатационной разведки, выемки вскрыши и отвалообразования, соответственно для богатых, рядовых, бедных песков; 3^x – затраты на полный технологический цикл по извлечению полезного компонента из хвостов обогащения богатых и рядовых песков, с учетом перемещения минеральной массы и формирования штабеля; k^{np} – коэффициент, учитывающий долю золота пробностью ниже 800 в бедных песках и хвостах обогащения богатых и рядовых песков; k_e – коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании бедных песков и хвостов обогащения богатых и рядовых песков.

Усовершенствованный колесный скрепер с комбинированным оборудованием осуществляет предварительное рыхление песков при движении холостым ходом и последующую загрузку разрыхленной минеральной массы в ковш с использованием промежуточной подгребающей стенки (ППС). Диссертантом выявлена функциональная зависимость по определению рациональной длины ковша, оборудованного ППС, для чего было определено изменение массы M_i скрепера, в зависимости от коэффициента удлинения ковша l_i (рис. 16). Также выявлено изменение вместимости ковша V_i и удельной массы скрепера

M_i/V_i от l_i . Составлена целевая функция, определяющая изменение эксплуатационной производительности $\Pi_{iЭ}$ и удельной себестоимости работ C_i в зависимости от l_i при заданной дальности транспортировки песков, которая принималась пошагово в интервале от 100 до 3000 м. Решение целевой функции для каждого конкретного скрепера дает возможность выявить оптимальную длину ковша, при которой себестоимость работ достигает минимального значения.

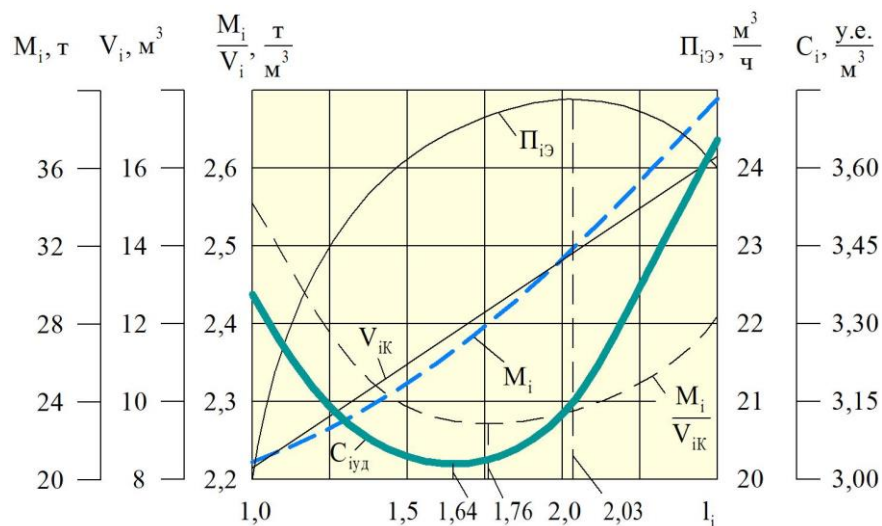


Рис. 16. Зависимости технико-экономических показателей модернизированного скрепера ДЗ-11П при дальности транспортировки песков 2000 м

Данные исследования проводились для скреперов ДЗ-87-1,

ДЗ-11П и ДЗ-113, выпускаемых в Российской Федерации и Республике Беларусь. Автором были проведены исследования по загрузке и разгрузке моделей ковшей скреперов традиционного исполнения, а также моделей удлиненных ковшей, оборудованных интенсификатором загрузки в виде ППС. В цели экспериментальных исследований входило: определение величин сопротивления движению ППС по установленной траектории; получение качественной картины процесса загрузки минеральной массы при движении ППС; изучение влияния работы ППС на изменение сопротивления копанью ковша скрепера; получение фактических данных для сравнения процесса наполнения удлиненных ковшей скреперов, оборудованных ППС, и без интенсификатора.

Экспериментальные исследования загрузки моделей удлиненных ковшей скреперов, оборудованных ППС, проводились в лабораторных условиях на экспериментальном стенде по копанью грунтов. В процессе экспериментальных исследований на моделях ковшей скреперов были определены контуры минеральной массы (песков) в ковше в зависимости от ее связности, типоразмера ковша, его длины, а также способа заполнения ковша, а именно, или за счет тягового усилия, или с помощью ППС и тягового усилия.

Сопротивление копанью F_k моделью ковша скрепера (рис. 17) зависит от расположения задней стенки, т.е. удлинения ковша. При копании легкопромывистой минеральной массы (слабосвязных песков) сопротивление копанью снижается на 9...14 %, на средне- и труднопромывистой минеральной массе (связных песках) — на 15...26 %. Снижение сопротивления обусловлено удлинением ковша, поскольку

ку задняя стенка удалена настолько, что стружка, проникающая внутрь ковша, практически не воздействует на нее. При включении в работу ППС (точка А, рис. 17 а, кривая 3) сопротивление копанию некоторое время продолжает расти (стенка движется вниз, а минеральная масса продолжает поступать в ковш) и достигает первого максимума значений F_k (точка Б, рис. 17 а). После этого значение F_k резко снижается, так как ППС освобождает переднюю часть ковша.

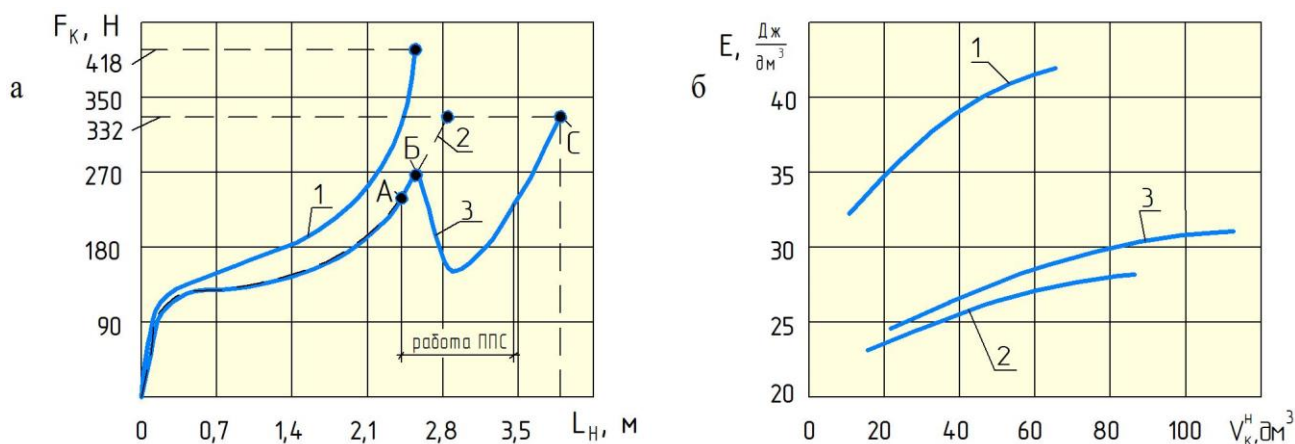


Рис. 17. Копание среднепромывистой минеральной массы моделями ковша скрепера ДЗ-11П: а – изменение сопротивления копания F_k от пути набора минеральной массы L_H ; б – изменение удельной энергоёмкости E заполнения модели ковша от ее вместимости V_k^H ; 1- модель существующего ковша; 2- модель удлиненного ковша; 3- модель удлиненного ковша, оборудованного ППС

Затем по мере поступления минеральной массы в ковш F_k вновь начинает возрастать, достигая максимальных значений (точка С). По данным экспериментальных исследований рассчитана удельная энергоёмкость E процесса наполнения моделей ковшей скреперов. С увеличением вместимости ковша E , отнесенная к V_k^H , на всех типах минеральной массы возрастает. Удельная энергоёмкость заполнения удлиненного ковша, оборудованного ППС, меньше, чем у существующего ковша равной вместимости при работе на слабосвязных песках - на 12,5...19,7 %, при работе в связных песках - на 24,7...35,4 % (рис. 17 б).

Произведен расчет себестоимости работ, а также величины удельных потерь богатых песков при их выемке и транспортировке различными вариантами оборудования (табл. 3) с применением бульдозера Т-11.02 с полусферическим отвалом вместимостью 5,6 м³, скрепера ДЗ-11П с геометрической емкостью ковша 8,3 м³ и модернизированного скрепера ДЗ-11П с удлиненным ковшом геометрической емкостью 11,8 м³ и ППС. Вариант I – бульдозер Т-11.02 с выемкой и штабелированием богатых песков с их перемещением на 20м с последующей погрузкой песков из штабеля в автотранспорт; вариант II – выемка и транспортировка богатых песков скрепером ДЗ-11П; вариант III – выемка и транспортировка богатых песков модернизированным скрепером ДЗ-11П с комбинированным рабочим оборудованием.

Таблица 3. Показатели выемки богатых песков различным горным оборудованием

Показатель	Вариант		
	I	II	III
Коэффициент наполнения рабочего органа	1,0	0,85	1,1
Объем песков в рабочем органе, м ³	5,6	7,1	13,0
Удельные потери богатых песков при их примешивании к рядовым пескам через боковой валик, м ³ /м ³	0,071	0,056	0,048
Себестоимость выемки и транспортировки песков на расстояние 2000 м, у.е.	100	93,2	84,1

Преимуществами модернизированного колесного скрепера при селективной выемке локальных зон богатых песков в сравнении с бульдозером и колесным скрепером традиционной конструкции являются меньший уровень пересортицы за счет более низких удельных потерь ценного минерального сырья в боковом валике, а также меньшая себестоимость работ.

Для разработки *сложноструктурного пласта глубокозалегающей россыли* предлагается адаптивная технология, включающая эксплуатационную разведку путем бурения скважин с заглублением в плотик, выявление зон богатых, рядовых и бедных песков, а также обогащенных зон с рудным золотом в плотике. Богатые пески, содержащие крупное золото, извлекаются с применением средств механической выемки и скважинного гидроразмыва пласта; рядовые и бедные пески – с использованием технологии скважинного выщелачивания с подачей растворителя через закачные скважины, фильтрацией его по пласту песков и откачки продуктивных растворов на поверхность (рис. 18).

Механическую выемку богатых песков возможно вести буровыми установками типа Вауег. Для увеличения объема извлекаемых богатых песков шнек для расширения скважин на буровой установке заменяется на выемочный модуль предлагаемой автором конструкции для повторного расширения скважины на уровне продуктивного пласта (рис. 18). Повторное расширение скважины производится тонкими вертикальными слоями, толщина которых определяется из условия заполнения накопителя при расширении скважины на высоту в пределах мощности продуктивного пласта:

$$b_i = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4V_n}{\pi H_i K_p} + D_i^2} - D_i \right), \quad (7)$$

где V_n - объем накопителя, м³; H_i - высота участка расширяемой скважины с учетом геометрии перемещения ножей агрегата, м; D_i - текущий диаметр расширяемой скважины, м; K_p - коэффициент разрыхления песков.

Поднимаемые в накопителе на поверхность пески контролируются по содержанию и крупности полезного компонента с последующей подачей на гравитационное обогащение.

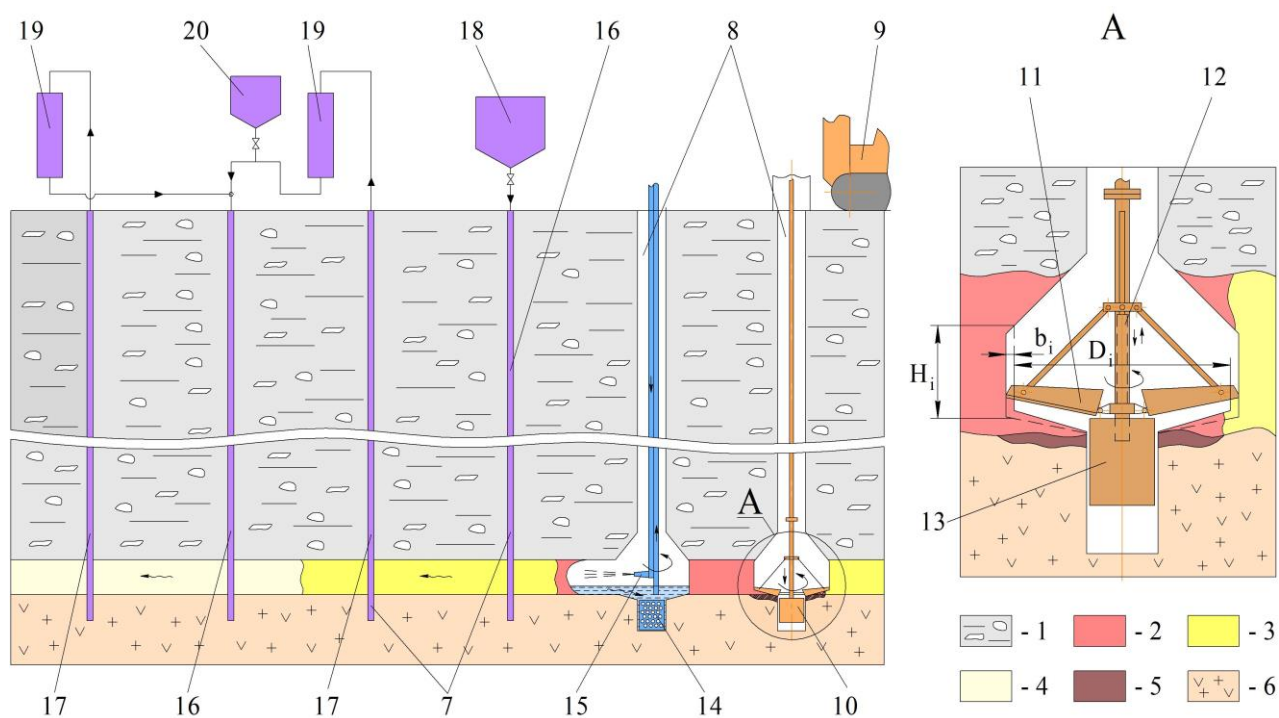


Рис. 18. Схема адаптивной технологии разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей: 1 - торфа; 2, 3, 4 – зоны, соответственно, богатых, рядовых и бедных песков; 5 – зона плотика обогащенная золотом; 6 – плотик; 7 – разведочные скважины; 8 – расширенные скважины; 9 – буровая установка; 10 – выемочный модуль; 11 – режущие элементы; 12 – гидроцилиндр поворота режущих элементов; 13 – накопитель; 14 – коллектор; 15 – погружной гидромонитор; 16 – закачные скважины; 17 – откачные скважины; 18 – емкость с раствором повышенной концентрации; 19 – сорбционные колонны; 20 – емкость с комплексообразователем

Для выемки оставшихся богатых песков в ранее сформированных полостях размещают коллекторы с перфорированными стенками, а также погружные гидромониторы и водными струями перемещают минеральную массу богатых песков с осаждением и накоплением внутри коллекторов крупнозернистого золота и шлиховых материалов. Коллекторы периодически поднимают на поверхность для извлечения крупнозернистого золота. Поднятая на поверхность гидросмесь направляется на обогащение, после чего хвосты обогащения направляют в сформированные полости пласта песков.

Для повышения эффективности скважинного выщелачивания при обработке участков рядовых песков, содержащих преимущественно среднеразмерное и мелкое золото, через закачные скважины подается нахлороженный раствор с повышенной концентрацией комплексообразователей для золота. А для выщелачивания участков бедных песков, содержащих преимущественно мелкое, «тонкое» и дисперсное золото, предлагается использовать маточный раствор доукрепленный комплексообразователем. Исследования по выщелачиванию золотосодержащих песков активированными бесцианидными экологоза-

дьящими растворами, проведенные с участием автора, показали возможность существенного повышения извлечения металла (на 17...20 %) за счет интенсивного окисления минеральных матриц, содержащих инкапсулированное и дисперсное золото (рис. 19).

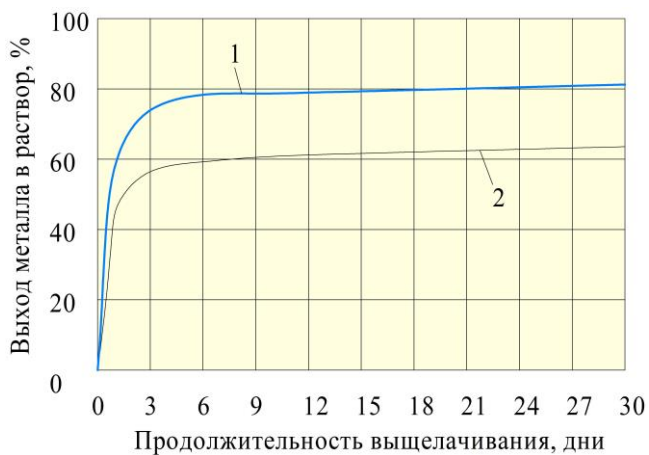


Рис. 19. Извлечение металла песков в раствор: 1 - гипохлоритно-хлоридный раствор, полученный в электрофотохимическом реакторе; 2 - хлоридный раствор

Применение предлагаемых адаптивных технологий разработки россыпных месторождений с селективной выемкой и последующей отдельной переработкой разноразных песков, а также использование физико-химических геотехнологий для глубокозалегающих участков и переработки хвостов гравитационного обогащения, обеспечит повышение сквозного извлечения металла на 5-14 % в сравнении с традиционными технологиями освоения россыпей.

Таким образом обосновано, что *разработку сложноструктурных россыпных месторождений целесообразно осуществлять с применением технологий, предусматривающих районирование полигона и выделение в продуктивном пласте выемочных слоев для селективного извлечения богатых песков усовершенствованными горными машинами циклического действия, обеспечивающими внутрисортную селекцию при одновременном усреднении качественных показателей при выемке.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые научно обоснованные технологические решения по развитию геотехнологий разработки сложноструктурных месторождений, внедрение которых вносит существенный вклад в повышение эффективности их освоения.

Основные научные и практические результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

1. Обоснована система показателей оценки сложности внутренней структуры рудных включений, учитывающих условия залегания рудных тел, физико-механические свойства горных пород, содержание полезного компонента, соотношение площадей или объемов, ориентировки контуров внутренних включений относительно контуров рудной зоны их абсолютных и относительных

размеров с учетом широкого спектра средств механизации и требований технологического цикла переработки.

2. Предложен критерий оценки эффективности разработки сложноструктурного рудного месторождения с использованием комбинированных схем переработки, позволяющий определять оптимальные границы содержания полезного компонента для выделения технологических свойств руд и представляющий собой суммарный максимальный чистый дисконтированный доход, получаемый за весь период эксплуатации месторождения с учетом возможности последующей переработки хвостов обогащения и кеков металлургического передела богатых руд.

3. Научно обоснованы и экономически оценены технологические схемы добычи и рудоподготовки, предполагающие выделение из общей рудной массы составляющих повышенной и пониженной ценности, для их последующей переработки по различным технологиям совместно с сортами руд соответственно более высокого или более низкого качества при обеспечении их технологической совместимости, что позволит повысить извлечение металла при переработке руды на 4-10 %.

4. Разработаны блок-схемы алгоритмов выбора последовательности разработки рудных и россыпных сложноструктурных месторождений с учетом таких параметров как коэффициент вскрыши, мощность залежи, содержание полезного компонента, прочность руды и возможность ее дезинтеграции, размеры богатых включений, крупность рудных минералов и др.

5. Обоснована адаптивная технология выемки руд сложноструктурного месторождения штокверкового типа с уточнением в плане и по вертикали контуров включений богатых руд, их предварительное разупрочнение с применением раствора ПАВ со снижением прочности на одноосное сжатие на 21-42 % и одноосное растяжение на 26-41 % с переводом в класс легко разрушаемых скальных пород с последующим рыхлением гидромолотом и выемкой грейферным оборудованием.

6. Определены область и границы эффективного применения адаптивных технологий разработки (доработки) маломощных рудных тел, а также предложены технико-технологические решения по внутрисортовой селекции особо ценного минерального сырья из обогащенных зон залежей, позволяющие снизить пересортицу руд и повысить сквозное извлечение полезного компонента на 4-7 %.

7. Обоснована возможность повышения производительности открытых горных работ при механической выемке пород сложноструктурных месторождений с прочными включениями за счет применения адаптивной технологии при использовании усовершенствованной машины послыного фрезерования, снабженной оборудованием для нарезания щелей и пропитки нижележащего слоя массива раствором ПАВ для его предварительного разупрочнения, что

обеспечивает повышение технической производительности оборудования при выемке прочных включений на 50...70 %.

8. Предложено технико-технологическое решение по оснащению карьерного комбайна накопительным бункером, устанавливаемым между перегрузочным транспортером и разгрузочным конвейером, обеспечивающее безостановочную работу комбайна при обмене автосамосвалов под погрузкой и увеличение производительности выемки в среднем на 12-15 %.

9. Обоснована технология открытой разработки россыпных месторождений с селективной выемкой и отдельной переработкой разносортных песков, обеспечивающая увеличение извлечения металла на 5...14 %. Опережающая селективная выемка богатых песков ведется усовершенствованным колесным скрепером, обеспечивающим уменьшение пересортицы богатых и рядовых песков, а также снижение себестоимости выемочно-транспортных работ.

10. Научно обоснованы параметры усовершенствованных колесных скреперов с удлиненным в 1,57...1,83 раза ковшом, оборудованным интенсификатором загрузки в виде промежуточной подгребающей стенки, обеспечивающим повышение коэффициента заполнения ковша песками. Предложены схемы к определению сопротивления перемещению интенсификатора при загрузке ковша скрепера.

11. Предложена адаптивная технология разработки глубокозалегающих россыпей с применением опережающей выемки богатых песков агрегатом для расширения скважин и дифференцированного скважинного выщелачивания участков рядовых и бедных песков растворами с различными концентрациями, обеспечивающая увеличение сквозного извлечения металла на 8-12 % в сравнении с технологиями скважинной гидродобычи и скважинного выщелачивания. Установлено, что выщелачивание песков нахлороженным хлоридным раствором позволяет увеличить выход металла в раствор на 17-20 % в сравнении с традиционным хлоридным раствором.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Рассказов, И. Ю. Повышение эффективности разработки сложноструктурных месторождений при опережающей выемке особо богатых руд / И. Ю. Рассказов, А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 5-19.

2. Секисов, Г. В. Малоотходная технология освоения сложноструктурных месторождений с применением комбинированных схем выемки и переработки руд / Г. В. Секисов, **А. Ю. Чебан** // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 6. – С. 110-118.

3. Рассказов, И. Ю. Разработка технологии комбинированной выемки руд сложноструктурных месторождений / И. Ю. Рассказов, А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 4. – С. 485-496.
4. Совершенствование схем добычи и переработки руд при освоении сложноструктурных месторождений / И. Ю. Рассказов, **А. Ю. Чебан**, Н. М. Литвинова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 2. – С. 57-67.
5. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование схем добычи и переработки песков при освоении сложноструктурных золотороссыпных месторождений / А. Ю. Чебан // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 3. – С. 88-98.
6. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование технологии разработки сложноструктурных карбонатных месторождений с применением модернизированных карьерных комбайнов / А. Ю. Чебан // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – №7-1. – С. 15-24.
7. Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительного физико-химического разупрочнения / **А. Ю. Чебан**, А. Г. Секисов, М. И. Рассказов [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 29-41.
8. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением машин послыйного фрезерования / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 2. – С. 357-367.
9. Секисов, Г. В. Система основных категорий комплексной оценки горных технологий / Г. В. Секисов, **А. Ю. Чебан**, А. А. Соболев, А. А. Якимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 187-198.
10. **Чебан, А. Ю.** Обоснование необходимости модернизации карьерных комбайнов для увеличения их эксплуатационной производительности / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 2. – С. 387-398.
11. **Чебан, А. Ю.** Технология ведения отвалообразования с применением усовершенствованного отвального перегружателя / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 3. – С. 210-219.
12. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование технологии разработки жильных золоторудных месторождений с использованием средств селективной механизированной выемки / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов, А. Г. Секисов, Н. П. Хрунина // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 36-39.
13. **Чебан, А. Ю.** Технология освоения золоторудных месторождений с переработкой продуктивных фракций некондиционных руд / А. Ю. Чебан // Из-

вестия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – № 1. – С. 692-702.

14. **Чебан, А. Ю.** Способ доработки крутонаклонных рудных тел малой мощности / А. Ю. Чебан, Г. А. Курсакин, С. И. Корнеева, А. А. Фаткулин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №8. – С. 14-20.

15. **Чебан, А.Ю.** Повышение эффективности разработки россыпей, содержащих большое количество мелкого золота / А. Ю. Чебан // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. – № 3. – С. 388-397.

16. Секисов, А. Г. Технология разработки кимберлитов с применением скрепера, оснащенного комбинированным оборудованием / А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 1. – С. 328-337.

17. Шемякин, С. А. Повышение эффективности послойно-полосовой технологии открытых горных работ с применением выемочных машин фрезерного типа и скреперов / С. А. Шемякин, **А. Ю. Чебан**, Е. С. Клигунов // Горный журнал. – 2003. – № 4-5. – С. 48-50.

18. Рассказов, И. Ю. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области / И. Ю. Рассказов, **А. Ю. Чебан**, В. С. Литвинцев // Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 30-34.

19. **Чебан, А. Ю.** Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота / А. Ю. Чебан, А. Г. Секисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2023. – Т. 21. – № 1. – С. 24-31.

20. Секисов, А. Г. Совершенствование технологии взрывного рыхления тонких жил путем применения специальных скважинных зарядов / А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан**, Г. В. Секисов // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 4. – С. 35-37.

21. **Чебан, А. Ю.** Усовершенствованная технология освоения сложноструктурных россыпей с отдельной выемкой и переработкой песков / А. Ю. Чебан // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22. – № 4. – С. 15-22.

22. **Чебан, А. Ю.** Карьерный экскаватор с рабочим оборудованием для отделения обогащенной рудной мелочи / А. Ю. Чебан, А. Г. Секисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 16-22.

23. **Чебан, А. Ю.** Обоснование параметров скреперов с подгребающим устройством внутри ковша / А. Ю. Чебан, С. А. Шемякин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 2. – С. 338-343.

24. **Чебан, А. Ю.** Использование горного оборудования для механического разрушения скальных и полускальных пород / А. Ю. Чебан, Н. П. Хрунина // Горная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 104-107.

25. **Чебан, А. Ю.** Анализ парка машин горнодобывающих предприятий Амурской области / А. Ю. Чебан, И. Ю. Рассказов, В. С. Литвинцев // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 2. – С. 41-50.

26. **Чебан, А. Ю.** Анализ эффективности применения выемочно-транспортирующих машин на предприятиях Хабаровского края, разрабатывающих россыпные месторождения / А. Ю. Чебан, И. Ю. Рассказов, С. А. Шемякин, С. И. Корнеева // Маркшейдерия и недропользование. – 2012. – № 5. – С. 34-37.

27. **Чебан, А. Ю.** О целесообразности внедрения послойно-полосовых технологий при разработке месторождений цементного сырья в Дальневосточном регионе / А. Ю. Чебан // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 10. – С. 53-58.

28. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование технологии разработки сложноструктурных месторождений с применением комбинированной выемки руд / А. Ю. Чебан, А. Г. Секисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20. – № 3. – С. 35-44.

29. **Чебан, А. Ю.** Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18. – № 3. – С. 4-12.

Монографии:

30. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование техники и технологий безвзрывной разработки горных пород / А. Ю. Чебан. – Хабаровск : ИГД ДВО РАН, 2017. – 260 с.

31. Шемякин, С. А. Техничко-технологические решения разработки мерзлых и крепких пород в горном деле и строительстве / С. А. Шемякин, Ю. А. Гамоля, **А. Ю. Чебан.** – Хабаровск : ДВГУПС, 2017. – 188 с.

Патенты РФ:

32. Патент на изобретение 2602636 РФ. Способ комплексного освоения карбонатных месторождений / **А. Ю. Чебан**, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина. – Оpubл. 20.11.2016. – Бюл. № 32.

33. Патент на изобретение 2683288 РФ. Способ разработки рудных месторождений с селективной взрывной подготовкой и выемкой / Г. В. Секисов, И. Ю. Рассказов, **А. Ю. Чебан.** – Оpubл. 27.03.2019. – Бюл. № 9.

34. Патент на изобретение 2687724 РФ. Способ разработки крутопадающих месторождений твердых полезных ископаемых / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 15.05.2019. – Бюл. № 14.

35. Патент на изобретение № 2714418 РФ. Способ разработки месторождений твердых полезных ископаемых / **А. Ю. Чебан**, А. Г. Секисов, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина. – Оpubл. 14.02.2020. – Бюл. № 5.

36. Патент на изобретение № 2741979 РФ. Способ разработки сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 01.02.2021. – Бюл. № 4.

37. Патент на изобретение № 2764528 РФ. Способ разработки тонких рудных жил / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 18.01.2022. – Бюл. № 2.

38. Патент на изобретение № 2783027 РФ. Способ разработки месторождений твердых полезных ископаемых с комбинированной подготовкой горных пород к выемке / А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 08.11.2022. – Бюл. № 31.

39. Патент на изобретение № 2789769 РФ. Способ формирования отвалов с отделением обогащенной мелкой фракции / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 09.02.2023. – Бюл. № 4.

40. Патент на изобретение № 2792623 РФ. Способ комбинированной разработки сложноструктурных месторождений / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 22.03.2023. – Бюл. № 9.

41. Патент на изобретение № 2793491 РФ. Способ разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей / **А. Ю. Чебан**, Н. П. Хрунина, Ю. И. Рубцов. – Оpubл. 04.04.2023. – Бюл. № 10.

42. Патент на изобретение № 2809406 РФ. Способ формирования отвалов с выделением обогащенной мелкой фракций / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 11.12.2023. – Бюл. № 35.

43. Патент на изобретение № 2834737 РФ. Способ освоения сложноструктурных золотосодержащих россыпей с селективной выемкой и отдельной переработкой песков / **А. Ю. Чебан**. – Оpubл. 13.02.2025. – Бюл. № 5.

В прочих изданиях

44. **Чебан, А. Ю.** Повышение эффективности освоения золоторудных месторождений путем применения гибкой системы управления качеством руд при их транспортировке / А. Ю. Чебан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 7. – С. 116-124.

45. **Чебан, А. Ю.** Технология разработки сложноструктурного месторождения апатитов и выемочно-сортировочный комплекс для ее осуществления / А. Ю. Чебан // Записки Горного института. – 2019. – Т. 238. – С. 399-404.

46. **Чебан, А. Ю.** Технология разработки сложноструктурных угольных пластов карьерными комбайнами с комбинированным рабочим оборудованием / А. Ю. Чебан, Н. П. Хрунина // Уголь. – 2024. – № 4. – С. 79-82.
47. **Чебан, А. Ю.** Систематизация способов выемки и переработки руд маломасштабных месторождений / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26. – № 5. – С. 13-20.
48. **Чебан, А. Ю.** Сложноструктурные рудные блоки и их систематизация / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2020. – Т. 26. – № 6. – С. 43-53.
49. **Чебан, А. Ю.** К вопросу об определении производительности карьерных комбайнов в различных условиях эксплуатации / А. Ю. Чебан // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 3. – С. 145-148.
50. **Чебан, А. Ю.** Классификация конструкций карьерных комбайнов / А. Ю. Чебан // Недропользование XXI век. – 2015. – № 5. – С. 64-69.
51. **Чебан, А. Ю.** Классификация технологических схем применения карьерных комбайнов / А. Ю. Чебан // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 2. – С. 159-163.
52. Структура рабочего времени карьерных комбайнов при разработке месторождений известняков / **А. Ю. Чебан**, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № S4-20. – С. 40-48.
53. **Cheban A. Yu.** and Khrunina N. P. Intensification of Open Mining Operations with a Small Distance of Transportation of Rock Mass // International Journal of Engineering Research in Africa. – 2018. – Vol. 38. – pp. 100-114.
54. Рассказов, И. Ю. Совершенствование технологий селективной выемки разнородных руд при освоении месторождений высокоценного минерального сырья / И. Ю. Рассказов, А. Г. Секисов, **А. Ю. Чебан** // «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения недр»: материалы VI конф. Междунар. науч. школы акад. РАН К. Н. Трубецкого. – Москва : ИПКОН РАН, 2024. – С. 21-24.
55. **Чебан, А. Ю.** Совершенствование технологии комбинированной выемки руд при разработке сложноструктурных месторождений / А. Ю. Чебан // «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения недр»: материалы V конф. Междунар. науч. школы акад. РАН К. Н. Трубецкого. – Москва : ИПКОН РАН, 2022. – С. 236-239.
56. **Чебан, А. Ю.** Технология доработки сложноструктурных рудных тел малой мощности при освоении прибортовых запасов карьеров / А. Ю. Чебан // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2024. – Т. 11. – № 2. – С. 91-96.
57. **Cheban, A.** Technology of extraction and primary processing of low-grade and off-balance ores / В сборнике: E3S WEB OF CONFERENCES. – 2020. – С. 01010.