

*На правах рукописи*



Швабенланд Елена Егоровна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКОЛОГИЧЕСКИ  
СБАЛАНСИРОВАННОЙ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКИ  
СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
АПАТИТОВЫХ РУД**

Специальность

25.00.22 – «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского в Отделе методических основ оценки проектной и технической документации на разработку месторождений твердых полезных ископаемых

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук  
**Рыльникова Марина Владимировна**,  
заведующий отделом теории проектирования  
освоения недр ИПКОН РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
**Пикалов Вячеслав Анатольевич**,  
начальник отдела методического обеспечения  
ООО «НТЦ-Геотехнология», г. Челябинск

кандидат технических наук, доцент  
**Мальский Кирилл Сергеевич**,  
декан факультета геологии и геофизики нефти  
и газа ФГБОУ ВО МГРИ, г. Москва

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 21 октября 2020 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в диссертационном совете и на сайте ИПКОН РАН <http://ипконран.рф>

Автореферат разослан «12» августа 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
профессор, доктор технических наук



И.Ф. Жариков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В мировой практике горного производства сложилась устойчивая тенденция к повышению требований экологической безопасности при экономически эффективной и рациональной разработке месторождений, комплексному извлечению ценных компонентов при первичной переработке минерального сырья, что обуславливает необходимость разработки новых и расширения области применения существующих технико-технологических решений на основе ресурсосберегающих технологий и оборудования. Особенно трудно выполнять такие требования при разработке сложноструктурных месторождений с относительно невысоким содержанием ценных компонентов, расположенных в зонах с особым экологическим режимом. Примером такого месторождения является месторождение апатитовых руд Ошурковское, расположенное в охранной зоне реки Селенга, питающей озеро Байкал. Почти полное отсутствие вскрыши и низкая стоимость товарной продукции определяют открытый способ разработки месторождения, однако проведение буровзрывных и иных работ, связанных с интенсивным выделением пыли и газов, в охранной зоне запрещено.

В условиях Ошурковского месторождения для выемки апатитовых руд и вмещающих пород предложено использование фрезерных комбайнов, способных осуществлять основные процессы горного производства – выемку пород без предварительной подготовки (без применения БВР), измельчение до необходимой фракции и погрузку в транспортное средство. Минимизация воздействия технологических процессов на окружающую среду обеспечивает экологическую сбалансированность геотехнологии.

Основная область применения комбайнов фрезерного типа – разработка месторождений полезных ископаемых с пластообразными залежами относительно выдержанного строения. В настоящее время фрезерные комбайны широко используют при разработке месторождений угля, доломита, фосфорита и т. д. Такие месторождения имеют, как правило, значительные размеры в плане и слоистое строение с визуально различимыми границами полезных ископаемых и вмещающих пород. Особенностью Ошурковского месторождения является наличие рудных тел, визуально не отличающихся друг от друга, но имеющих различные качественные характеристики. Кроме того, месторождение бедное по содержанию  $P_2O_5$  при относительно небольшом различии между содержаниями в кондиционной и некондиционной руде.

В связи с этим выполнение условий обеспечения качества добытой рудной массы при разработке сложноструктурного месторождения предусматривает селективную выемку руд и вмещающих пород и формирование рудопотоков определенного качества на основе оперативного контроля характеристик добываемого сырья. Контроль качества добываемого минерального сырья

сложноструктурного месторождения имеет принципиальное значение, так как даже незначительные отклонения от требований перерабатывающих производств могут привести к отрицательным экономическим результатам освоения всего месторождения. Решающим условием формирования рудопотоков определенного качества является наличие метода, позволяющего с высокой степенью надежности разделять рудную массу на единичные выемочные порции с оперативным определением в них содержания ценных компонентов. В данном случае идет речь об определении содержания ценного компонента в каждом загруженном автосамосвале. Поэтому разработка открытой геотехнологии с порционной выемкой руд, параметры которой обеспечивали бы оперативный контроль качественных характеристик добытой рудной массы и формирование в процессе погрузочных работ рудопотоков, соответствующих требованиям потребителей, является актуальной научно-практической задачей.

**Цель работы** – обоснование параметров эффективной, экологически сбалансированной горнотехнической системы открытой разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд с обеспечением заданных качественных характеристик добытой рудной массы.

**Идея работы** заключается в обеспечении эффективного и экологически безопасного освоения сложноструктурного месторождения апатитовых руд в экологически охранной зоне на основе применения открытой геотехнологии с использованием фрезерных комбайнов для послойно-порционной выемки и управления качеством добытого сырья в процессе загрузки в транспортные средства путем контроля содержания элемента-спутника радиометрическим методом.

Достижение поставленной цели и реализация идеи обеспечены решением **научно-практических задач**:

- обобщение опыта и систематизация технологических решений по геотехнологии открытой разработки сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа;
- установление закономерностей изменения качества рудопотоков минерального сырья в зависимости от параметров геотехнологии;
- разработка технологии, режима и параметров разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд в экологически охранной зоне с обеспечением заданных технологических свойств рудной массы;
- обоснование методов и средств контроля качества апатитовых руд;
- обоснование критериев эффективности технологических решений при разработке сложноструктурных месторождений апатитовых руд;
- разработка методики определения потерь и разубоживания при разработке сложноструктурных месторождений.

**Методы исследований** включают сбор, обобщение и анализ результатов научных исследований и практического опыта в области разработки сложноструктурных месторождений, моделирование геологического строения месторождения, технологии его разработки фрезерными комбайнами и технологической схемы послонно-порционной выемки, экспериментальные исследования по радиометрическому контролю качества минерального сырья по содержанию элемента-спутника, аналитические и графоаналитические исследования, статистическую обработку результатов, научное обобщение, технико-экономические расчеты.

**Защищаемые научные положения:**

1. Эффективность разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд при ограничении техногенной нагрузки на окружающую среду обеспечивается применением открытой геотехнологии с послонно-порционной выемкой горной массы фрезерными комбайнами и разделением потоков на кондиционные руды, направляемые на переработку, некондиционные руды – на временный склад и пустую породу – в отвал.

2. Разделение горной массы на потоки следует вести по результатам дискретного экспресс-анализа содержания элемента-спутника стронция в апатите и оценкой содержания  $P_2O_5$  в загружаемом транспортном сосуде.

3. Критерием эффективности горнотехнической системы освоения сложноструктурного месторождения апатитовых руд открытым способом с применением послонно-порционной выемки рудной массы является минимум в отработываемом слое месторождения некондиционной руды, направляемой на временный склад, обеспечивающийся выбором направления развития горных работ в соответствии с построенной геолого-структурной моделью месторождения и оптимальной грузоподъемностью автосамосвала независимо от глубины и ширины отработываемого слоя.

**Обоснованность и достоверность** научных выводов подтверждены результатами исследований технологии послонно-порционной выемки полезного ископаемого и управления качеством рудопотоков при открытой разработке месторождений, оценкой результатов по критерию технико-экономической эффективности применения послонно-порционной выемки рудной массы.

**Научная новизна работы** – в разработанной методике контроля качественных характеристик рудной массы, загружаемой в транспортный сосуд, отличающейся формированием в процессе погрузочных работ потоков минерального сырья с качественными характеристиками, контролируемые на основе установленной прямолинейной корреляционной связи содержания апатита от содержания сопутствующего стронция в выемочной порции рудной массы.

**Практическое значение** работы – в разработке геолого-структурной 3D-модели Ошурковского месторождения, на основе которой обоснованы технические и технологические параметры эффективной и экологически сбалансированной горнотехнической системы для освоения сложноструктурного месторождения Ошурковское в экологически защищенной зоне.

**Реализация выводов и рекомендаций.** Комплекс технических и технологических решений использован при разработке технического проекта освоения Ошурковского месторождения, что подтверждено актом о внедрении.

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах, научно-технических советах, международных конференциях ОАО «Сибгипрошахт» (г. Новосибирск, 2012 г.), ФГУП «Всероссийский институт минерального сырья им. Федоровского» (г. Москва, 2013–2019 гг.), ИГД СО РАН (г. Новосибирск, 2015 г.), ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (г. Магнитогорск, 2015 г., 2019 г.), Министерства природных ресурсов и экологии РФ (г. Москва, 2015–2019 гг.), ИПКОН РАН (г. Москва, 2019 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ, 10 из которых в изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из четырех глав, введения и заключения, изложенных на 151 странице машинописного текста, содержит 67 рисунков, 17 таблиц, 1 приложения, списка используемой литературы из 107 наименований.

#### **Основное содержание работы**

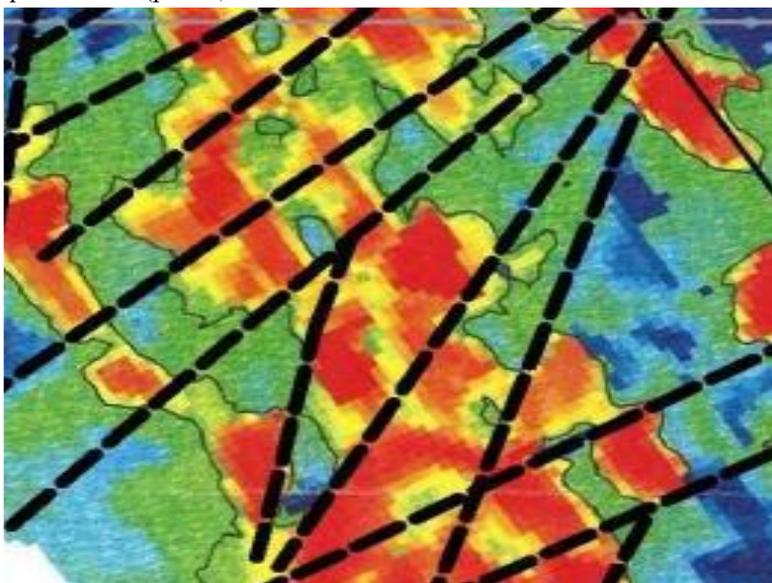
Первая глава посвящена анализу технологических решений при разработке сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых.

Выполнено обобщение особенностей геологического строения сложноструктурных месторождений, систематизация технологических решений по их освоению позволила установить перспективность и условия применения безвзрывной геотехнологии при разработке месторождения апатитовых руд Ошурковское, расположенного в экологически охранной зоне реки Селенга, питающей озеро Байкал.

Значительный вклад в научное обоснование технологических решений по разработке сложноструктурных месторождений внесен в работах отечественных ученых: академиков М.И. Агошкова, Н.В. Мельникова, Н.Н. Мельникова, В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, членов-корреспондентов РАН Д.Р. Каплунова, А.А. Пешкова, В.Л. Яковлева, докторов технических наук Ю.И. и К.Ю. Анистратовых, А.И. Арсентьева, С.Е. Гавришева, В.А. Галкина, В.С. Коваленко, С.В. Корнилова, В.А. Пикалова, С.П. Решетняк, М.В. Рыльниковой, А.Г. Секисова, А.В. Соколовского, В.Н. Сытенкова,

П.И. Томакова, Г.А. Фисенко, С.И. Фомина, Г.А. Холоднякова, В.С. Хохрякова, А.Ю. Чебана, О.В. Шпанского, М.И. Щадова, Б.П. Юматова и многих других. Проведенные ранее исследования, практический опыт, анализ проектных и научных решений свидетельствуют, что общим направлением формирования вариантов технологий открытой разработки сложноструктурных месторождений является сохранение и, по возможности, улучшение экологических, экономических и социальных показателей освоения месторождений. При этом отсутствуют решения по разработке сложноструктурных месторождений в экологически охранных зонах, где исключена возможность применения буровзрывной подготовки массива.

Месторождение Ошурковское является типичным сложноструктурным месторождением (рис. 1).



**Рисунок 1.** Структура (план) Ошурковского месторождения:  
 – кондиционная апатитовая руда с содержанием  $P_2O_5$  более 4,5%;  
 – кондиционная апатитовая руда с содержанием  $4,5\% > P_2O_5 > 3,9\%$ ;  
 – кондиционная апатитовая руда с содержанием  $3,9\% > P_2O_5 > 3,5\%$ ;  
 – некондиционная руда с содержанием  $P_2O_5 < 3,5\%$  и пустая порода;  
 – безрудные дайки;  – геологические нарушения

Месторождение имеет следующие особенности:

- отсутствие видимых границ между пустой породой, некондиционными и кондиционными рудами;
- бессистемное чередование в рудных зонах участков пустой породы и некондиционной руды, наличие в породных зонах участков кондиционной и некондиционной руды;

- неравномерное распределение полезного компонента в массиве при низком содержании  $P_2O_5$ , что требует минимизации примешивания вмещающих пород при добыче;
- относительно небольшое различие между содержаниями  $P_2O_5$  в кондиционной и некондиционной руде;
- невозможность прямого оперативного измерения содержания  $P_2O_5$  в разрабатываемом массиве;
- наличие экологических ограничений, не допускающих ведение буровзрывных и иных работ, связанных с интенсивным пыле- и газовыделением.

В таких условиях применение фрезерных комбайнов является приоритетным технологическим решением. Основная область применения комбайнов – разработка пластовых месторождений с относительно выдержанными залежами слоистого строения. Такие месторождения имеют, как правило, значительные размеры в плане и визуально различимые границы слоев полезного ископаемого и пустых пород. При разработке сложноструктурных месторождений, таких как Ошурковское, качество рудопотоков обеспечивается селективной выемкой руды и породы по сортовому плану. Организовать такую выемку при использовании фрезерных комбайнов практически невозможно. Выемка в полосе фрезерования ведется валовым способом, без возможности разделения рудной массы по сортам, что влечет за собой перемешивание рудных и породных участков. Контроль качества добываемого минерального сырья Ошурковского месторождения именно в процессе добычи имеет принципиальное значение, так как даже незначительные отклонения качественных характеристик рудной массы от требований перерабатывающего производства могут привести к отрицательным экономическим результатам освоения всего месторождения. Решающим условием применения технологии разделения грузопотоков определенного технологического качества является наличие метода, позволяющего с высокой степенью надежности и с удовлетворительной погрешностью разделять рудную массу на единичные выемочные порции с оперативным определением в них содержания ценных компонентов и направлением для разгрузки на обогатительную фабрику, временный склад или в отвал пустых пород. В данном случае идет речь об определении содержания ценного компонента в каждом загруженном автосамосвале.

Анализ состояния изученности проблемы позволил сформулировать цель, задачи и определить методы исследований.

Во второй главе диссертации предложена технология послойно-порционной выемки горной массы фрезерными комбайнами, параметрами которой является:

– ширина полосы разрабатываемых пород – определяется размером рабочего органа применяемого фрезерного комбайна и в рассматриваемых условиях является величиной постоянной, зависящей от типа применяемого комбайна;

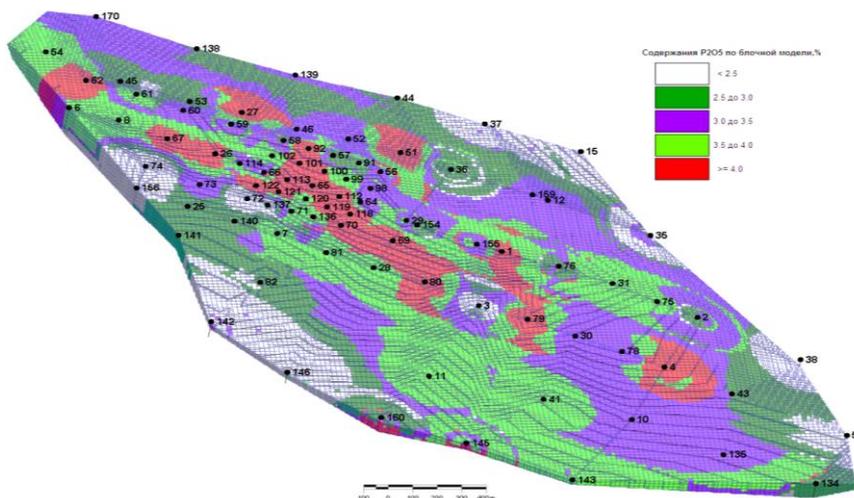
– толщина слоя фрезерования – зависит от физико-механических свойств разрабатываемых пород и для конкретных пород является также величиной постоянной;

– размер выемочной порции – зависит от принятой технологической схемы выемочно-погрузочных работ и системы контроля качества и ограничивается вместимостью кузова автосамосвала и его грузоподъемностью;

– емкость и/или грузоподъемность автосамосвала – определяется на основе оптимизационной экономико-математической модели с учетом закономерностей распределения качества сырья в объеме месторождения и затрат на погрузку, транспортирование, складирование и переработку сырья с учетом его ценности и ущерба от потерь и разубоживания рудной массы;

– техническая производительность комбайна – определяется горно-геологическими условиями разработки месторождения и параметрами выемочного оборудования.

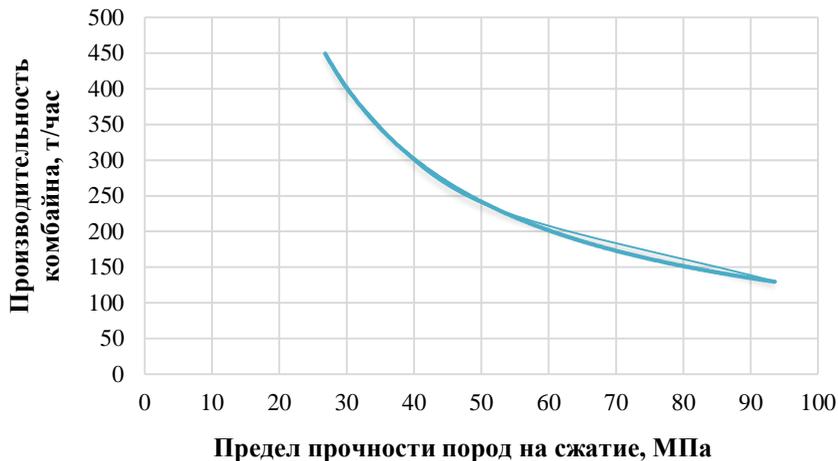
Разработана геолого-структурная 3D-модель Ошурковского месторождения, позволяющая картировать распределение и оценить содержание  $P_2O_5$  по объему всего массива (рис. 2).



**Рисунок 2.** Блочная 3D-модель Ошурковского месторождения

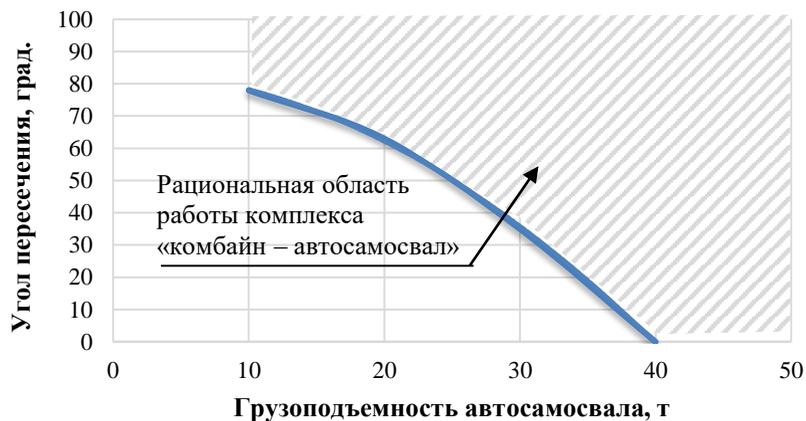
На основе анализа результатов расчетов определены типоразмер фрезерного комбайна, оптимальная грузоподъемность автосамосвала, зависимость производительности комбайна от прочности пород разрабатываемого массива (рис. 3), производительность погрузочно-

транспортного комплекса «комбайн – автосамосвал», а также рациональный угол пересечения между выемочной полосой и простираением залежей в условиях Ошурковского месторождения (рис. 4). Так, для автосамосвалов грузоподъемностью 40 т и более угол пересечения не имеет значения.



**Рисунок 3.** Зависимость производительности

фрезерного комбайна от прочностных свойств пород



**Рисунок 4.** Область рационального угла пересечения фрезерным комбайном линии «руда – порода» в зависимости от грузоподъемности автосамосвала

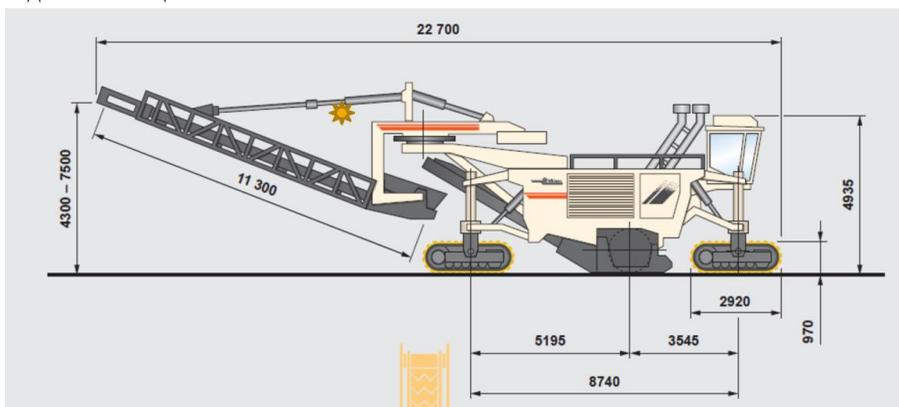
Определены требования к качеству минерально-сырьевых потоков и технологии их формирования при освоении Ошурковского месторождения апатитовых руд.

Третья глава посвящена выбору и обоснованию параметров и показателей разработки сложноструктурных месторождений. Обоснована методика

контроля качества минерально-сырьевых потоков с помощью радиометрического контрольно-измерительного комплекса. При этом доказано, что определение содержания апатита (С) в  $P_2O_5$  возможно лишь косвенным методом по выбранному элементу-спутнику – стронцию ( $C_{St}$ ), который является индикатором и находится с апатитом в установленной по результатам исследований корреляционной взаимосвязи:

$$C = 0,018C_{St} - 0,6, \% \quad (1)$$

Предложено место размещения РКС над конвейером фрезерного комбайна (рис. 5). При движении рудной массы по конвейеру ее поверхность циклично с помощью излучающего блока обрабатывается рентгеновскими лучами заданной мощности.

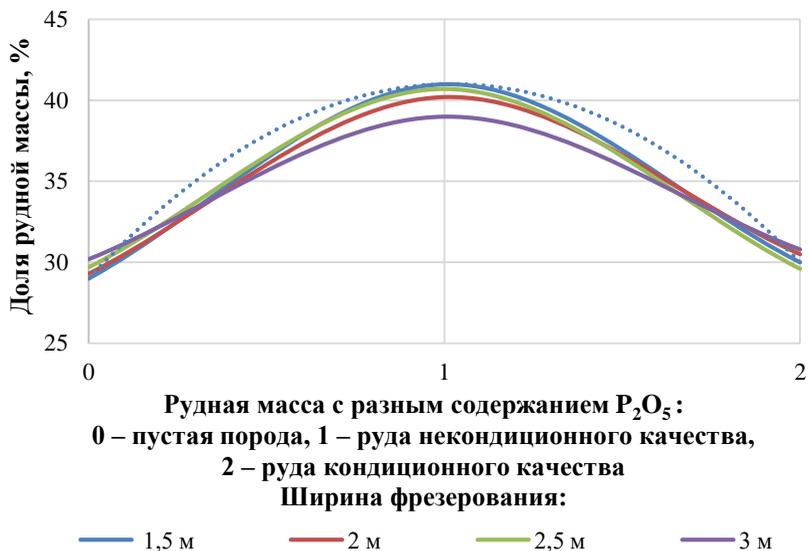


**Рисунок 5.** Схема размещения контрольно-измерительного комплекса (🔧) на фрезерном комбайне

Возникшее под их воздействием в элементе-индикаторе вторичное характеристическое излучение с использованием установленной зависимости (1) определяет содержание  $P_2O_5$  в измеряемой порции рудной массы равной 25–30 кг. При загрузке автосамосвала грузоподъемностью 30 т происходит в среднем 60 измерений с интервалом 5÷7 с. Каждое измерение характеризует содержание  $P_2O_5$  в 300–500 кг рудной массы. Измеренные порции рудной массы распределяются в кузове автосамосвала равномерно, обеспечивая достоверность определения среднего содержания  $P_2O_5$ , что и позволяет задать направление его дальнейшего движения – на фабрику, временный склад или в отвал.

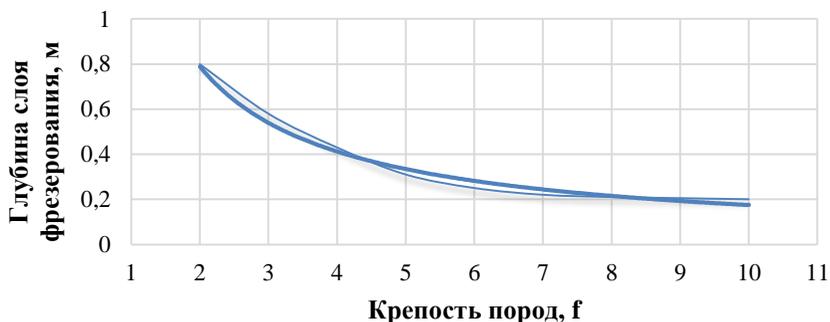
Анализ результатов выполненного моделирования с применением разработанной программы выбора оптимальных параметров разработки сложноструктурного Ошурковского месторождения апатитовых руд показал (рис. 6), что ширина заходки фрезерования не является значимым параметром, а следовательно, не может быть эффективно применена в качестве инструмента управления качеством рудопотоков и, соответственно, итоговым

распределением рудной массы между отвалом, промежуточным складом и обогатительной фабрикой.



**Рисунок 6.** Изменение доли рудной массы в зависимости от ее качества при различной ширине полосы фрезерования

Необходимо учитывать, что толщина слоя фрезерования влияет на производственную мощность и технико-экономические показатели ведения открытых горных работ и определяется с учетом крепости пород, вовлекаемых в отработку в конкретном слое с учетом рекомендаций предприятий-изготовителей (рис. 7).



**Рисунок 7.** Изменение глубины слоя фрезерования в зависимости от крепости пород

Установленная зависимость гиперболического вида глубины слоя фрезерования от крепости разрабатываемых пород может быть использована при выборе глубины слоя фрезерования.

Для оптимизации процесса управления распределением рудопотоков в качестве целевой функции следует принимать минимум объема руды некондиционного качества, направляемого на промежуточный склад для дальнейшей подготовки:

$$\mathcal{E}_{разр}(Q_{ac}; L_{mp}^p; L_{mp}^{np}; L_{mp}^n; t_{позр}; C_{mp}^p; C_{mp}^{np}; C_{mp}^n; C_{простой}^{комб}; C_{простой}^{a/c}; S_{загруз}^p; S_{загруз}^n; Q_{год}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

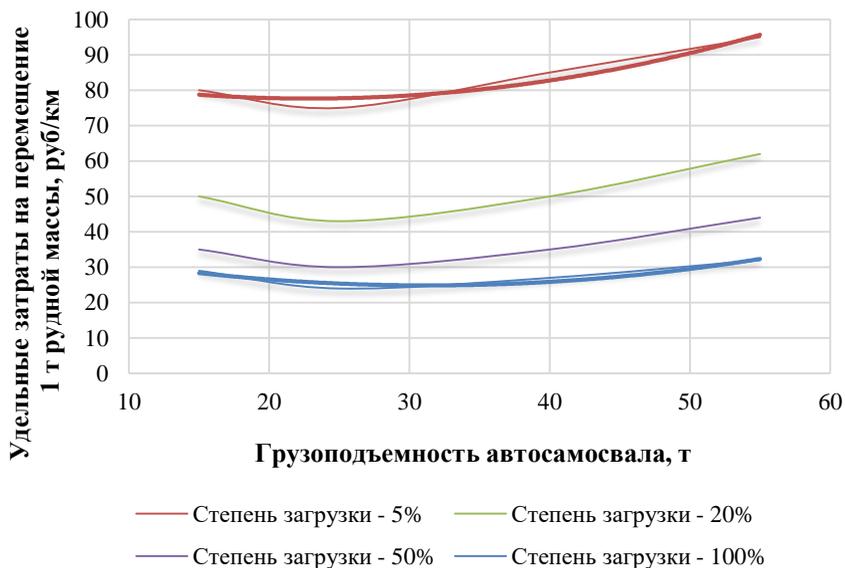
где  $Q_{ac}$  – масса загружаемой порции (грузоподъемности автосамосвала), т;  $L_{mp}^p$  – расстояние транспортирования руды от забоя до обогатительной фабрики, км;  $L_{mp}^{np}$  – расстояние транспортирования некондиционной руды от забоя до склада, км;  $L_{mp}^n$  – расстояние транспортирования породы от забоя до отвала, км;  $t_{позр}$  – время погрузки одного автосамосвала, мин.;  $C_{mp}^p$  – затраты на перевозку 1 т кондиционной руды, руб.;  $C_{mp}^{np}$  – затраты на перевозку 1 т некондиционной руды, руб.;  $C_{mp}^n$  – затраты на перевозку 1 т вскрыши, руб.;  $C_{простой}^{комб}$  – затраты от простоя одного часа комбайна, руб/час;  $C_{простой}^{a/c}$  – затраты от простоя одного часа автосамосвала, руб/час;  $S_{загруз}^p$  – минимально допустимая степень загрузки автосамосвала рудой, %;  $S_{загруз}^n$  – минимально допустимая степень загрузки автосамосвала породой, %;  $Q_{год}$  – годовой объем добычи полезных ископаемых, тыс. т.

При этом система ограничений имеет следующий вид:

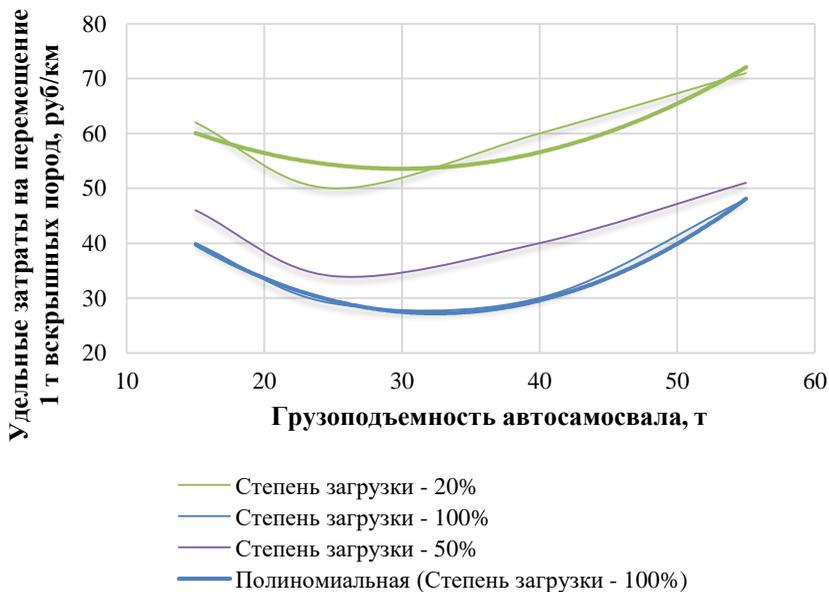
$$\begin{cases} N = Q_{см}/P_{ac}; \\ C_{mp}^p = L_{mp}^p \cdot Q_{ac} \cdot Z_{ac}^p; \\ C_{mp}^{np} = L_{mp}^{np} \cdot Q_{ac} \cdot Z_{ac}^{np}; \\ C_{mp}^n = L_{mp}^n \cdot Q_{ac} \cdot Z_{ac}^n; \\ S_{загруз}^p = 5 \div 100\%; \\ S_{загруз}^n = 20 \div 100\%, \end{cases} \quad (3)$$

где  $Q_{см}$  – сменная производительность карьера по горной массе, т/см;  $P_{ac}$  – сменная производительность автосамосвала, т/см;  $Z_{ac}^p$ ,  $Z_{ac}^{np}$ ,  $Z_{ac}^n$  – соответственно, стоимость перевозки кондиционной, некондиционной рудной массы и породы от забоя до места отгрузки, руб. т/км.

Результаты моделирования изменения удельных затрат на транспортирование рудной массы и вскрышных пород с учетом степени загрузки кузова автосамосвала представлены, соответственно, на рисунках 8 и 9. Анализируя зависимости, представленные на указанных рисунках, можно сделать вывод, что снижение степени загрузки автосамосвала рудной массой со 100 до 20% приводит к увеличению затрат на транспортировку рудной массы в 1,9 раза. При этом снижение степени загрузки автосамосвала при транспортировке пород вскрыши со 100 до 20% приводит к увеличению затрат на транспортировку в 1,5 раза.



**Рисунок 8.** Зависимость удельных затрат на транспортирование рудной массы от грузоподъемности автосамосвалов



**Рисунок 9.** Зависимость удельных затрат на транспортирование вскрышных пород от грузоподъемности автосамосвалов

Полученные зависимости имеют ярко выраженный экстремум, соответствующий области значений независимой переменной от 25 до 35 т, что

подтверждает для условий Ошурковского месторождения корректность выбора автосамосвала грузоподъемностью 30 т.

Доказано, что при выборе технологических параметров безвзрывной открытой геотехнологии разработки сложноструктурных месторождений с использованием фрезерных комбайнов следует исходить из установленных закономерностей:

- приоритетных порядка и последовательности развития горных работ в пределах карьерного поля при интенсификации отработки зон повышенного содержания ценного компонента, что повышает эффективность отработки месторождения;

- развитие горных работ зон с наибольшим содержанием ценного компонента обеспечивает возможность создания условий для снижения срока окупаемости проекта, гибкого управления объемами отбиваемой рудной массы и повышения производительности оборудования.

Схема формирования грузопотоков при разработке апатитового месторождения Ошурковское приведена на рисунке 10.



**Рисунок 10.** Схема формирования потоков минерального сырья с заданными качественными характеристиками при разработке месторождения Ошурковское

Особенностью представленной схемы формирования грузопотоков является определение в процессе выемочно-погрузочных работ содержаний

$P_2O_5$  в кузове каждого автосамосвала. Так, автосамосвал, загруженный рудной массой со средним содержанием полезного компонента выше бортового (3,5%), направляется на склад обогатительной фабрики для дальнейшей переработки, при содержании выше указанного значения, но ниже промышленного – на временный склад для последующего предварительного обогащения, а при меньшем содержании – в отвал, это пустая порода.

Таким образом, предложенная схема управления качественными характеристиками потоков горной массы при разработке Ошурковского месторождения позволяет:

- на основе разделения карьерного поля на природно-технологические зоны (рудную, рудно-породную и породную) дифференцированно определять проектные показатели извлечения полезного ископаемого из недр;
- уточнять технологические показатели и показатели извлечения полезного ископаемого из недр при планировании развития горных работ;
- разделять потоки фактически извлеченной горной массы на отдельные технологические сорта;
- получать в реальном времени технические отчеты об объемах добычи рудной массы раздельно по технологическим сортам и в целом по карьере;
- своевременно принимать управленческие решения по изменению режима работы выемочно-транспортного комплекса и характеристик грузопотоков.

Методика расчета потерь полезного ископаемого при добыче разработана на основе учета коэффициента рудоносности, находящегося в прямой зависимости от количества пересечений контакта «руда – порода», в том числе в породной зоне месторождения с участками руды кондиционного качества. При этом потери балансовых запасов адекватны изменению коэффициентов их извлечения из недр:

$$\Delta П = Б (K_n - K_{n0}), \text{ т}, \quad (4)$$

где  $Б$  – количество балансовых запасов, т;  $K_n$  и  $K_{n0}$  – коэффициенты извлечения балансовых запасов из недр с использованием и без использования радиометрического метода определения содержания в горной массе, доли ед.

Таким образом, в качестве основного показателя полноты извлечения балансовых запасов при добыче апатитовых руд может быть принят коэффициент извлечения из недр  $P_2O_5$ , равный отношению его количества в 1 т добытой рудной массы к количеству в 1 т балансовых запасов:

$$K_{\text{ркс}}^{\text{ц}} = \frac{D_{\text{рмс}}^{\text{ркс}} \cdot a_{\text{ркс}}}{Б \cdot \alpha_6}, \text{ дол. ед.}, \quad (5)$$

где  $D_{\text{рмс}}^{\text{ркс}}$  – количество добычи рудной массы с использованием сортировки радиометрическим методом, т;  $\alpha_6, a_{\text{ркс}}$  – содержание полезного компонента в балансовых запасах добытой рудной массы, %.

Установлено, что технология послойно-порционной выемки руды на примере Ошурковского сложноструктурного месторождения и методика разделения потока горной массы на основе радиометрического экспресс-метода позволяют в 1,13 раза повысить полноту извлечения полезного ископаемого из недр за счет снижения потерь при добыче и выемке кондиционной руды из участков вскрышных пород.

В четвертой главе на основании выполненных исследований предложены технические и технологические решения для освоения Ошурковского сложноструктурного месторождения апатитовых руд с обеспечением заданных качественных характеристик рудной массы при минимальном экологическом воздействии на окружающую среду. Выполненные технико-экономические расчеты показали, что предложенная геотехнология является финансово состоятельной и коммерчески эффективной. Так, при ставке дисконтирования 12% проект окупается за восемь лет, обеспечивая накопленный чистый дисконтированный доход в размере 1145 млн руб. за срок эксплуатации месторождения, равный 20 годам. Кроме того, отказ от рыхления массива буровзрывным способом исключает залповые выбросы в окружающую среду пылегазового облака в объеме 98,3 млн м<sup>3</sup> в год.

### **Заключение**

В диссертации, являющейся завершенной научно-квалификационной работой, изложено научно обоснованное техническое решение актуальной научно-практической задачи: разработана эффективная, экологически сбалансированная горнотехническая система открытой разработки сложноструктурных месторождений апатитовых руд, параметры которой обеспечивают оперативный контроль качественных характеристик добытой рудной массы и формирование в процессе погрузочных работ рудопотоков, соответствующих требованиям потребителей, что имеет важное значение для развития горнопромышленного комплекса России.

**Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:**

1. На основе установленных закономерностей изменения качества рудопотоков минерального сырья от параметров геотехнологии доказано, что разделение горной массы на потоки следует вести по результатам дискретного экспресс-анализа содержания апатита в извлеченной рудной массе по содержанию сопутствующего стронция, определяемого радиометрическим анализатором, установленным над конвейером фрезерного комбайна, с расчетом в режиме реального времени содержания Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> в рудной массе, загруженной в транспортный сосуд.
2. Установлены взаимосвязи производительности фрезерного комбайна с прочностными характеристиками разрабатываемых пород и параметрами

послойно-порционной технологической схемы выемки при разработке месторождения, на основе которых доказана технико-экономическая эффективность применения предложенной технологической схемы выемки руд в условиях Ошурковского апатитового месторождения, расположенного в регионе с ограниченной техногенной нагрузкой на окружающую среду.

3. Установлена гиперболическая зависимость производительности фрезерного комбайна от предела прочности пород на сжатие:

$$Q_{\text{фк}} = \frac{12\,000}{\sigma_{\text{сж}}}, \text{ т/час.}$$

4. Разработана методика обоснования параметров горнотехнической системы комбайновой выемки руд с учетом совокупности влияния всех значимых факторов, что позволяет определять рациональную грузоподъемность автосамосвала, типоразмер фрезерных комбайнов, значение угла между выемочной полосой и простиранием залежи и производительность фрезерного комбайна.

5. Разработана геолого-структурная 3D-модель месторождения, на основе которой в качестве критерия эффективности геотехнологии освоения сложноструктурного апатитового месторождения с использованием послойно-порционной технологии выемки руд фрезерными комбайнами принято минимальное количество в отрабатываемом слое месторождения некондиционной руды, направляемой на временный склад, что обеспечивается выбором направления развития горных и оптимальной грузоподъемностью автосамосвала, независимо от глубины и ширины отрабатываемого слоя.

6. Разработана методика разделения потока рудной массы на порции, качественные характеристики которых определяются радиометрическим экспресс-методом в процессе погрузочных работ. Установлена линейная зависимость содержания апатита С от содержания элемента-спутника стронция  $C_{\text{St}}$  в анализируемой порции горной массы:  $C = 0,018C_{\text{St}} - 0,6, \%$ .

7. Разработана методика определения потерь полезного ископаемого и разубоживания добытой рудной массы при послойно-порционной технологии выемки руд фрезерными комбайнами при разработке сложноструктурного месторождения, учитывающая коэффициент рудоносности и коэффициент извлечения кондиционной руды, находящейся в участках пустых пород. Показано, что технология послойной выемки руд на примере Ошурковского месторождения и методика разделения потока горной массы на основе радиометрического экспресс-метода позволяют в 1,13 раза повысить полноту извлечения полезного ископаемого из недр.

8. Разработанная экологически сбалансированная геотехнология освоения Ошурковского месторождения апатитовых руд является финансово состоятельной и коммерчески эффективной. При заданной ставке

дисконтирования 12% проект окупается за восемь лет, обеспечивая чистый дисконтированный доход в размере 1451 млн руб. за весь срок эксплуатации месторождения. Кроме того, разработанная геотехнология позволяет на 30% сократить эксплуатационные затраты горного производства, улучшить условия труда рабочих, уменьшить вредное воздействие горных работ на окружающую среду региона, исключив залповые выбросы пылегазового облака в объеме 98,3 млн м<sup>3</sup> в год.

**Основные научные и практические результаты диссертации изложены в следующих опубликованных работах автора Швабенланд Е.Е.:**

*В изданиях, рекомендуемых ВАК России:*

1. Швабенланд Е.Е. О потенциале фрезерных комбайнов непрерывного действия при разработке месторождений открытым способом // Рациональное освоение недр. – № 1. – 2014. С. 54–60.
2. Швабенланд Е.Е. Управление грузопотоками при послонно-порционной разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа // Рациональное освоение недр. – 2015. – № 3. С. 70–76.
3. Швабенланд Е.Е., Соколовский А.В., Пихлер М. Выбор параметров послонно-порционной технологии при разработке сложноструктурных месторождений комбайнами фрезерного типа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – № 2. С. 80–87.
4. Ордин А. А., Швабенланд Е.Е. Обоснование параметров технологии открытого способа добычи апатитового сырья фрезерными комбайнами // ФТПРПИ. – 2016. – № 2. С. 80–88.
5. Швабенланд Е.Е. Потенциал фрезерных комбайнов в повышении эффективности гидродобычи соли на месторождении Баскунчак // Рациональное освоение недр. 2016. – № 2–3. С. 58–65.
6. Пихлер М., Панкевич Ю.Б., Швабенланд Е.Е. Опыт применения комбайнов Wirtgen Surface Miner при разработке сложноструктурных угольных месторождений // Рациональное освоение недр. – 2016. – № 4. С. 42–55.
7. Швабенланд Е.Е. Применение послонно-порционной технологии добычи руды с использованием фрезерных комбайнов для рационального и комплексного освоения недр // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 1. С. 38–42.
8. Швабенланд Е.Е. Применение послонно-порционной технологии для открытой разработки сложноструктурных месторождений ТПИ // ГИАБ. – 2017. – № 5. С. 382–389.
9. Рьльникова М.В., Швабенланд Е.Е. Особенности управления качеством рудной массы при разработке сложноструктурных месторождений апатитовых руд с применением комбайновой выемки // Рациональное освоение недр. – 2019. – № 2–3. С. 80–86.

10. Швабенланд Е.Е. Применение наилучших доступных технологий для освоения сложноструктурных месторождений в районах с особым экологическим режимом // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. С. 349–358.

***В прочих изданиях:***

11. Швабенланд Е.Е. Область применения селективной послойно-порционной технологии разработки месторождений твердых полезных ископаемых // Сб. тезисов – Москва: ВИМС. – 2015. С. 70–75.

12. Федотенко В.С., Швабенланд Е.Е. Технологические параметры безвзрывной открытой геотехнологии отработки сложноструктурных месторождений с использованием комбайновой выемки // Сборник статей по результатам Международной конференции, г. Магнитогорск. МГТУ. – 2019. С. 175–182.