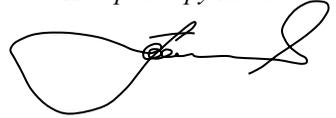


На правах рукописи



ПОЛИНОВ АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ
ОТКОСОВ ОТВАЛОВ И БОРТА КАРЬЕРА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ И ВЕТРОВОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность

2.8.8. Геотехнология, горные машины

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» на кафедре разработки месторождений полезных ископаемых

Научный руководитель доктор технических наук, профессор,
Пыгалев Иван Алексеевич

Официальные оппоненты: Качурин Николай Михайлович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики материалов и геотехнологий ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула,

Курчин Георгий Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры шахтного и подземного строительства, горно-геологического отделения, Института цветных металлов, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы" (РУДН), г. Москва

Защита диссертации состоится «25» сентября 2024 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.624.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова») по адресу: 455000, Челябинская область, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ им Г.И. Носова»: <https://magtu.ru>.

Автореферат разослан « 30 » июня 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Корнилов Сергей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие открытого способа добычи твердых полезных ископаемых в последние десятилетия в стране и мире является следствием одновременного роста спроса на минеральное сырье и повсеместного усложнения горно-геологических и горно-технических условий разработки месторождений, выражающихся в снижении содержания полезных компонентов, увеличении глубины ведения горных работ, коэффициента вскрыши, потребности в территориях для размещения отвалов вскрышных пород. Все это вынуждает горнодобывающие предприятия осуществлять постоянный поиск и проработку технических решений, направленных на повышение эффективности их функционирования, в том числе за счет целенаправленного использования пород вскрыши при строительстве техногенных емкостей для минимизации затрат на размещение отходов добычи и обогащения полезных ископаемых. В связи с постоянным ростом объемов переработки горной массы в рамках горно-обогачительного комбината особо актуальным становится вопрос поиска технических решений, направленных не только на снижение, но и компенсацию потребляемой энергии, в первую очередь электрическую.

В горной промышленности имеется положительный опыт строительства и эксплуатации солнечных и ветряных электростанций на территории горнодобывающего предприятия и разрабатываемых месторождений. Однако подавляющее большинство отечественных и зарубежных примеров сводится к реализации возможности установки солнечных панелей и ветрогенераторов на землях, нарушенных горными работами в рамках их рекультивации, или на отдельно отчуждаемых территориях. Отсутствие научно-методических рекомендаций и технологических решений по рациональному использованию выработанного пространства карьера и пород вскрыши для вовлечения в эксплуатацию источников возобновляемой энергии сдерживает целенаправленное формирование техногенных емкостей и ландшафта в качестве областей концентрации природной энергии и устройств, компенсирующих ее непостоянство.

В связи с этим создание и реализация условий использования возобновляемой энергии непосредственно в процессе добычи полезных ископаемых позволит повысить эффективность добычи, экологическую безопасность горнодобывающих предприятий и комплексность освоения участка недр при одновременной рекультивации нарушенных земель.

Поэтому обоснование параметров открытой геотехнологии с формированием отвалов и бортов карьера для использования возобновляемой энергии при учете направления и скорости ведения добычных, вскрышных и отвальных работ является актуальной научно-практической задачей.

Цель работы. Разработка методики обоснования конструкции и параметров откосов отвала и борта карьера, а также условий, обеспечивающих эффективное использование природной и техногенной возобновляемой энергии в ходе ведения горных работ и после их завершения, для повышения полноты и комплексности освоения участка недр.

Идея работы. Целенаправленное формирование верхних уступов карьера,

формы отвалов в плане и угла их откосов с заданными параметрами обеспечивает создание необходимых условий для концентрации солнечной и ветровой энергии в заданных областях горнотехнической системы, эффективное использование которой достигается за счет обоснования безопасных охранных зон применения буровзрывных работ.

Задачи исследования:

- анализ состояния, опыта и тенденций формирования и использования источников возобновляемой энергии при ведении открытых горных работ;
- систематизация факторов, определяющих условия использования природной возобновляемой энергии при открытом способе добычи;
- разработка способов управления конструкционными параметрами карьеров и отвалов при повышении эффективности использования солнечной и ветровой энергии в пределах формируемой горнотехнической системы;
- разработка алгоритма определения параметров верхних уступов карьера и отвалов вскрыши для концентрирования солнечной и ветровой энергии в заданной области горнотехнической системы;
- разработка методики обоснования параметров открытой геотехнологии при формировании горнотехнической системы с использованием солнечной и ветровой энергии;
- промышленная апробация рекомендаций и технико-экономическая оценка предлагаемых технологических решений.

Объект исследования: горнотехническая система открытой геотехнологии, предусматривающая создание и реализацию условий использования природной и техногенной возобновляемой энергии в ходе развития открытых горных работ.

Предмет исследования: параметры открытой геотехнологии при формировании отвалов и бортов карьера, обеспечивающих использование природной и техногенной возобновляемой энергии.

Методы исследования. В работе применен комплексный метод исследований, включающий: анализ литературных источников, патентов и научное обобщение положительного опыта освоения запасов месторождений открытым способом с целенаправленным формированием и использованием техногенных георесурсов, возобновляемых природных и техногенных источников энергии; математическое, каркасное и имитационное моделирование технологических процессов; симуляции физических процессов при проведении подтверждающих экспериментов в промышленных условиях с использованием инструментальных замеров; технико-экономический анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Изменение конструкции элементов горнотехнической системы обеспечивает создание условий концентрирования в заданных областях осваиваемого участка недр возобновляемой энергии, при этом ведение горных работ в соответствии с обоснованными параметрами открытой геотехнологии с учетом минимальных охраняемых зон и применения пород вскрыши для формирования аккумулирующих техногенных емкостей способствуют эффективному использованию солнечной и ветровой энергии.

2. Оптимальная конструкция откосов отвала и карьера одновременно обеспечивает минимум коэффициента инсоляции горнотехнической системы и максимум полезной площади инсоляции. Опережающая постановка верхних уступов

северного борта карьера с выполаживанием его результирующего угла на 10° и оформление южных откосов внешних отвалов под углом более 25° в условиях месторождений, расположенных в пределах $50-55^\circ$ северной широты, обеспечивает повышение концентрации солнечной энергии до 3 раз при совмещении рекультивационных работ и снижении сроков передачи восстановленных земель.

3. Увеличение высоты отвала в диапазоне от 50 до 150 м обеспечивает повышение скорости ветра на его поверхности при максимальном угле откоса до 1,6 раз и снижение до 2,5 раз необходимой вместимости аккумулирующей техногенной емкости, строительство ограждающих дамб которой осуществляется с использованием скальных пород вскрыши, а гидроизоляция их откосов – рыхлых пород вскрыши, удельный объем которых с ростом вместимости снижается соответственно до 5 и 8 раз.

Достоверность результатов обеспечивается: мировым опытом эксплуатации различных видов источников альтернативной энергетики; надежностью и представительным объемом исходных данных; использованием современных программных продуктов и комплексов при расчетах и компьютерном моделировании; подтверждается: согласованностью данных, полученных различными методами исследования, между собой и с данными промышленных испытаний; положительными результатами применения научно-методических положений диссертации в промышленных условиях и учебном процессе.

Научная новизна:

1. Стратегия обеспечения полноты и комплексности освоения участка недр при использовании возобновляемых источников энергии, заключающаяся в целенаправленном формировании горнотехнических сооружений с обоснованными параметрами, обеспечивающими эффективное использование солнечной и ветровой энергии.

2. Систематизация горнотехнических сооружений, обеспечивающих использование возобновляемой энергии, применение которой позволяет выбрать направление их формирования, обосновать конструкцию и параметры верхних уступов карьера, внешних отвалов и техногенных емкостей.

3. Коэффициент инсоляции горнотехнической системы, являющийся суммой коэффициентов инсоляции карьера и отвала, которые определяются отношением дополнительных объемов вскрыши при выполаживании откосов к создаваемой полезной площади инсоляции, и выступает в качестве критерия оценки эффективности изменения конструкции отвеса карьера и отвала.

Личный вклад автора состоит в: постановке цели и задач исследования; систематизации горнотехнических сооружений, обеспечивающих использование возобновляемой энергии; обосновании конструкции южного откоса отвала и верхних уступов северного борта для монтажа и эксплуатации солнечных панелей; создании алгоритма определения параметров горнотехнической системы при использовании солнечной и ветровой энергии; разработке методики обоснования параметров горнотехнической системы при использовании солнечной и ветровой энергии.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методических основ обоснования параметров открытой геотехнологии с формированием отвалов и бортов карьера для использования природной и техногенной возобновляемой энергии, обеспечивающих повышение полноты и комплексности освоения участка недр Земли.

Практическая значимость работы заключается в разработанных технологических схемах изменения результирующего угла откосов верхних уступов карьера и формирования внешних отвалов заданной конструкции и формы в плане, а также аккумулирующих техногенных емкостей, применение которых позволяет концентрировать в заданных областях горнотехнических сооружений солнечную и ветровую энергию с полной компенсацией их непостоянства; в обосновании рациональных параметров открытой геотехнологии с формированием отвалов и бортов карьера для использования природной и техногенной возобновляемой энергии для снижения негативного воздействия ведения горных работ при повышении их эффективности; рекомендациях по постановке верхних уступов карьера в предельное положение и совмещению во времени добычных работ и эксплуатацию установок по преобразованию солнечной и ветровой энергии, смонтированных на отвалах и верхних уступах карьера.

Эффективность разработанных технологических решений по использованию природной и техногенной возобновляемой энергии подтверждена актом внедрения результатов диссертационного исследования на Руднике ГОП ПАО «ММК» с достигнутым годовым экономическим эффектом 47,3 млн руб.

Реализация результатов исследования. Результаты и научно-практические рекомендации диссертационного исследования использованы в проектах разработки месторождений, являющихся минерально-сырьевой базой ПАО «ММК», расположенных в Челябинской области; при разработке основных технологических решений по формированию яруса отвала для монтажа солнечных панелей и ветрогенераторов на месторождении «Малый Куйбас». Материалы диссертации использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» по дисциплинам: «Процессы открытых горных работ», «Комплексное освоение недр», «Комплексная оценка технологических решений», «Применение ЭВМ при проектировании открытых горных работ» специальности 21.05.04.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XXIX Международном научном симпозиуме «Неделя горяка» (г. Москва, 2023 г.); XI Международной конференции «Комбинированная геотехнология» (г. Магнитогорск, 2023 г.); 81-й, 82-й Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2023, 2024 гг.); IV Всероссийской научно-практической конференции «Золото. Полиметаллы. XXI век» (г. Челябинск, 2024 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 12 научных работах. Из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ и входящих в международные базы цитирования Web of Science, 6 – в прочих изданиях, а также зарегистрировано 2 программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 159 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок, 24 таблицы, библиографический список из 142 наименований и 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ тенденции использования природной и техногенной возобновляемой энергии, способов и применяемого оборудования по преобразованию и накоплению энергии в ходе ведения открытых горных работ, а также научно-методической базы определения параметров открытой геотехнологии при комплексном освоении участка недр Земли.

В условиях постоянного роста объемов добычи твердых полезных ископаемых при повсеместной тенденции снижения их качества увеличивается потребность в электрической энергии на обогатительном переделе, в том числе и при складировании отвальных хвостов. Кроме того, ежегодно на 3% увеличивается потребность горно-перерабатывающих предприятий в территориях для размещения отвального и хвостового хозяйства, что требует дополнительных затрат на рекультивацию нарушенных земель. В последнее десятилетие одним из способов восстановления нарушенных территорий является использование поверхности отвалов и хвостохранилищ для установки устройств, обеспечивающих преобразование энергии солнца и ветра в электрическую. Анализ опыта использования современных солнечных панелей и ветрогенераторов, а также площади земель, занятых под открытыми горными работами, показал, что сегодня возможно получение электрической энергии в объемах, достаточных для обеспечения технологических процессов.

Данный подход определяет необходимость поиска технологических решений, направленных на формирование горнотехнической системы с учетом использования природной и техногенной возобновляемой энергии в ходе ведения горных работ.

Исследованиям в области определения параметров открытой геотехнологии, формирования техногенных георесурсов, комплексного освоения недр, а также повышения эффективности при разработке месторождений полезных ископаемых посвящены научные труды ведущих ученых: академиков М.И. Агошкова, Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, К. Н. Трубецкого, член-корреспондентов РАН Д.Р. Каплунова, В.Л. Яковлева, д.т.н. А.И. Арсентьева, С.Е. Гавришева, В.А. Галкина, Н.М. Качурина, И.А. Пыталева, М.В. Рыльниковой, Г.Г. Саканцева, Г.А. Холоднякова, В.С. Хохрякова и многих других ученых и инженеров, внесших значительный вклад в развитие науки и производства.

В отечественной практике открытых горных работ обоснование параметров геотехнологии при целенаправленном формировании отвалов и бортов карьера для обеспечения условий и использования природной и техногенной возобновляемой энергии на различных этапах разработки месторождений сдерживается отсутствием исследований влияния параметров горнотехнической системы на изменение показателей плотности энергии солнца и ветра в пределах ее границ, отсутствием проработанной методики обоснования параметров горнотехнической системы, учитывающих одновременное ведение добычных работ, монтаж и эксплуатацию устройств, обеспечивающих использование природной и техногенной возобновляемой энергии, а также физико-механические характеристики и тепловых свойств горных пород для формирования гидроаккумулирующих техногенных емкостей.

Во второй главе обоснована концепция ведения открытых горных работ,

способствующих эффективному использованию солнечной и ветровой энергии, методика определения размера охранной зоны ведения БВР, предложен способ регулирования режима горных работ при выполаживании откоса северного борта карьера с целью монтажа солнечных панелей и определения целесообразности параллельной рекультивации земель для перевода их в земли энергетики.

С целью повышения эффективности ведения открытых горных работ, с учетом современных достижений в области альтернативной энергетики, предложена концепция обеспечения полноты и комплексности освоения участка недр при использовании возобновляемых источников энергии (рисунок 1).

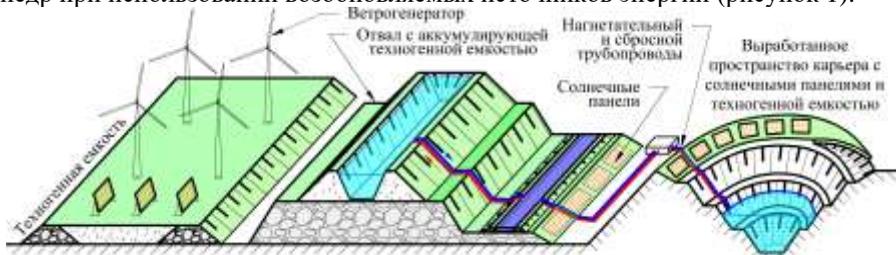


Рисунок 1 – Концепция комплексного освоения участка недр при формировании и использовании возобновляемых источников энергии

Проектирование горнотехнической системы, способствующей эффективному использованию солнечной и ветровой энергии, должно осуществляться на основе разработанной систематизации горнотехнических сооружений по их типу и способу формирования (таблица 1).

Таблица 1 – Систематизация горнотехнических сооружений, обеспечивающих использование возобновляемой энергии

Тип горнотехнического сооружения	По способу формирования	Вид источника энергии
Генерирующий	Отсыпка на поверхности и в выработанном пространстве карьера горных пород валовым способом	Потоки воздушных масс, солнечное излучение
	Выемка горных пород на заданных участках	Солнечное излучение
Аккумулирующий	Насыпные полнотелые	Потоки воздушных масс, солнечное излучение; техногенный массив из пород вскрыши
	Насыпные обвалованные	Солнечное излучение, геодезическая разность отметок
Комбинированный	Насыпь из горных пород, дифференцированных по физико-механическим свойствам	Потоки воздушных масс, солнечное излучение; техногенный массив из пород вскрыши; геодезическая разность отметок
	Выемка горных пород на определенных участках с заданной конструкцией борта	

С целью обеспечения минимальных сроков постановки в предельное положение северного борта карьера и ввода в эксплуатацию установленных на его откосах солнечных панелей, безопасности их монтажа и эксплуатации, без снижения производительности карьера по полезному ископаемому, проведены исследования параметров буровзрывной подготовки горных пород к выемке для безопасности охраняемых зон. При этом охраняемыми зонами являются верхние уступы карьера, подготавливаемые для монтажа и эксплуатации солнечных панелей. Определение размера охранной зоны базируется на первоначальной скорости полета куска горной массы.

Первоначальную скорость полета куска горной массы V_0 следует определять как

$$V_0 = \sqrt{\frac{R_{\max}^{\text{разл}} \cdot g}{\sin 2\alpha}}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; α – угол вылета куска, град.;

x_0 – расстояние от места взрыва до нижней бровки охраняемого уступа, м.

Расчет радиуса разлета кусков, с учетом охраняемой зоны $R_{\text{охран}}^{\text{разл}}$ при монтаже и эксплуатации солнечных панелей и ведения буровзрывных работ на одном или нижележащем горизонте, следует определять по формуле

$$R_{\text{охран}}^{\text{разл}} = \frac{V_0^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (\text{tg } \alpha - \text{tg } \gamma) + \sqrt{(\text{tg } \gamma - \text{tg } \alpha)^2 - \frac{2g}{V_0^2 \cdot \cos^2 \alpha} \cdot (x_0 \text{tg } \gamma + h_{\text{бвр}})}}{g}, \quad (2)$$

где γ – результирующий угол верхних уступов северного борта карьера, град.;

$h_{\text{бвр}}$ – разница высотных отметок нижней бровки охраняемого уступа и горизонта ведения БВР, м.

Разработана схема к расчету охраняемой зоны разлета кусков взрыва (рисунок 2, а). На основе предложенной методики расчета, установлена зависимость размера охранной зоны от результирующего угла откоса борта (рисунок 2, б).

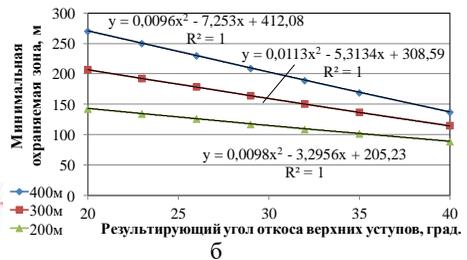
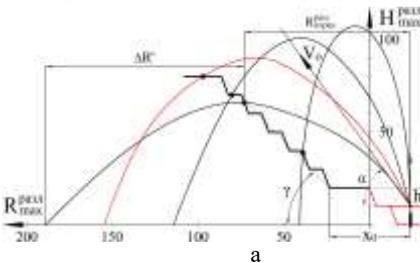


Рисунок 2 – Схема к расчету охраняемой зоны разлета кусков взрыва и зависимость ее размера от результирующего угла откоса

Формирование конструкции откоса верхних уступов северного борта карьера, способствующей эффективному использованию солнечной энергии и бесперебойной генерации электроэнергии путем использования аккумулирующей техногенной емкости (АТЕ), требует изменения режима горных работ и извлечения из недр дополнительных объемов горных пород. В работе обосновано два способа регулирования режима горных работ при реализации мероприятий по выполаживанию откоса борта для обеспечения оптимальной его конструкции и формирования АТЕ: последовательный – предусматривающий увеличение объемов вскрышных работ в период проектных сроков их ведения (рисунок 3, а), и параллельный – дополнительный объем вскрышных пород выполняется непосредственно в момент принятия решения по использованию природной возобновляемой энергии (рисунок 3, б).

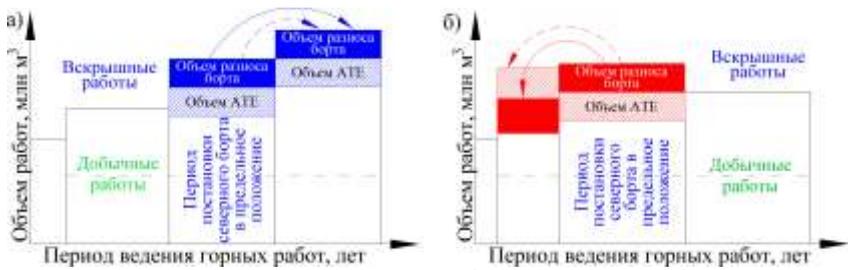


Рисунок 3 – Регулирование графика вскрышных работ при выполаживании северного борта карьера и формировании АТЕ

В результате моделирования вариантов реализации технических решений по подготовке откосов отвалов и борта карьера, а также формированию аккумулярующих емкостей установлено, что в процессе ведения горных работ возможно выполнение рекультивационных мероприятий. По мере ввода в эксплуатацию солнечных панелей и ветрогенераторов, устанавливаемых на откосах отвала и борта карьера, участки земли, на которых они расположены, могут быть переведены в категорию «земли энергетики», ставка налогообложения которых в 5 раз выше земель сельскохозяйственного назначения. Кроме того, в результате разработки месторождения твёрдых полезных ископаемых открытым способом и последующей рекультивации нарушенных земель происходит увеличение кадастровой стоимости земельных участков. На рисунке 4 представлена динамика суммы налогообложения единицы площади земли по проектному варианту рекультивации и предлагаемым решениям комплексного освоения участка недр на примере месторождения «Малый Куйбас».

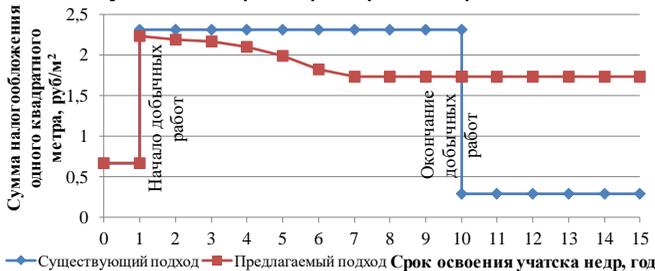


Рисунок 4 – Динамика суммы налогообложения за один квадратный метр в соответствии с проектным вариантом рекультивации земель и предлагаемой концепцией

В результате экономико-математического моделирования установлено, что на момент отработки балансовых запасов и окончания работ по рекультивации нарушенных земель размер отчислений в местный бюджет увеличится по сравнению с проектным вариантом в шесть раз.

В третьей главе исследовано влияние конструкции и параметров откоса отвала и борта карьера на объемы горных работ при установке на них солнечных панелей и ветрогенераторов, необходимых объемов аккумуляющей техногенной емкости и способов ее формирования; разработан алгоритм обоснования параметров открытых горных работ при использовании солнечной и ветровой энергии, предложена номограмма определения объемов горных пород при различных вариантах конструкции откоса борта карьера.

Эффективность использования солнечного излучения в рамках горнотехнической системы определяется не только расположением месторождения относительно экватора, обуславливающим инсоляцию, но и расстоянием между верхней бровкой северного и южного бортов карьера, которое обуславливает оптимальную высоту для установки солнечных панелей. В работе предложена схема и методика расчета параметров северного борта карьера и южного откоса отвалов для монтажа и обслуживания солнечных панелей с учетом главных параметров карьера и его месторасположения (рисунок 5).

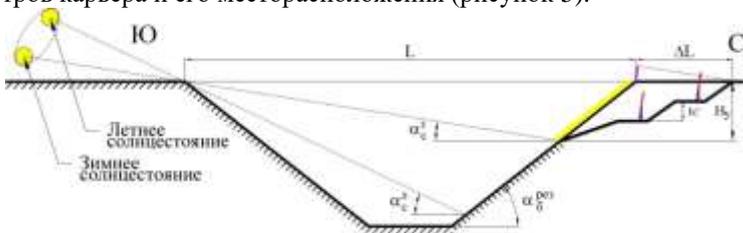


Рисунок 5 – Общая схема к определению параметров и профиля верхних уступов северного борта карьера и южных откосов отвалов при обеспечении их максимальной инсоляции:

Ю, С – части света, соответственно, юг и север; L – расстояние между верхней бровкой карьера северного и южного бортов, м; H_y – высота откоса северного борта с максимальной инсоляцией в зимний период, м; α_c^3 – солнечный азимутный угол зимой, град; α_c^l – солнечный азимутный угол летом, град; α_6^{pe3} – результирующий угол северного борта карьера, град

Высоту участка северного борта карьера с учетом результирующего его угла и солнечного азимутного угла следует определять по формуле

$$\begin{aligned}
 H_y = & \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{L \frac{\sin \alpha_c^3}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L \frac{\sin \alpha_6^{pe3}}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})}}{2}}}{L} \dots \\
 & \frac{\sqrt{\frac{L \frac{\sin \alpha_c^3}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L \frac{\sin \alpha_6^{pe3}}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L - L \frac{\sin \alpha_c^3}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})}}{2}}}{L} \dots \\
 & \frac{\sqrt{\frac{L \frac{\sin \alpha_c^3}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L \frac{\sin \alpha_6^{pe3}}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L - L \frac{\sin \alpha_6^{pe3}}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})}}{2}}}{L} \dots \\
 & \frac{\sqrt{\frac{L \frac{\sin \alpha_c^3}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L \frac{\sin \alpha_6^{pe3}}{\sin(180^\circ - \alpha_c^3 - \alpha_6^{pe3})} + L - L}{2}}}{L} \dots
 \end{aligned} \tag{3}$$

С целью исследования изменения площади инсоляции поверхностей объектов горнотехнической системы разработана схема к определению конструкции профиля и расчету параметров верхних откосов отвала и верхних уступов северного борта карьера (рисунок 6).

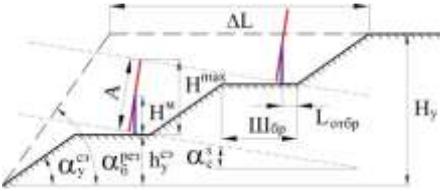


Рисунок 6 – Схема к определению конструкции профиля и расчету параметров верхних откосов отвала и верхних уступов северного борта карьера:

A – полезная площадь инсоляции при установке солнечных панелей (СП);
 ΔL – величина разноса верхней бровки при выполаживании уступа для монтажа СП, м;
 H^M – высота мачты, м; H^{\max} – максимальная высота мачты с установленной СП, м;
 α_y^{c3} – угол откоса подуступа, град; h_y^{c3} – высота подуступа, м; $\text{Ш}_{бр}$ – ширина бермы, м;
 $L_{отбр}$ – расстояние оси мачты от нижней бровки подуступа, м

Расчет размера области для эффективной установки солнечных панелей осуществляется по формуле

$$A = (h_y^{c3} + (\text{Ш}_{бр} + h_y^{c3} \cdot \text{ctg} \alpha_y^{c3}) \text{tg} \alpha_c^3) \cdot \cos \alpha_c^3. \quad (4)$$

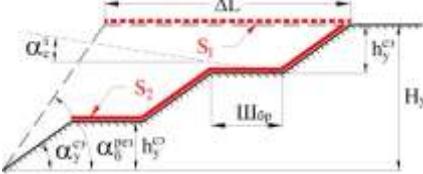
Высота мачты для монтажа солнечных панелей рассчитывается как

$$H^M = \frac{A}{2 \cos \alpha_c^3} + L_{отбр} \text{tg} \alpha_c^3. \quad (5)$$

Максимальная высота мачты с учетом установленных солнечных панелей рассчитывается по формуле

$$H^{\max} = H^M + \frac{A}{2} \cos \alpha_c^3. \quad (6)$$

Поскольку при выполаживании результирующего угла верхних уступов северного борта карьера для установки солнечных панелей происходит смещение верхней бровки в сторону горного массива, необходимо исследовать изменение площади поверхности откосов и рельефа. С целью исследования изменения площади инсоляции на поверхностях горнотехнической системы разработана схема для расчета их площади (рисунок 7).



S_1 – площадь дневной поверхности в пределах разноса верхней бровки при выполаживании верхних уступов северного борта карьера, м²; S_2 – площадь поверхности откосов уступа северного борта карьера при его выполаживании, м²

Рисунок 7 – Схема для расчета площади поверхности выполаживаемого откоса

Определение площади инсоляции для проектной формы откоса и при его выполаживании следует осуществлять по формулам:

$$S_1 = \Delta L = H_y (\text{ctg} \alpha_{\text{рез}}^{c3} - \text{ctg} \alpha_6^{\text{pe3}}), \quad (7)$$

$$S_2 = (n_y - 1) \cdot \left(\text{Ш}_{бр} + \frac{h_y^{c3}}{\sin \alpha_y^{c3}} \right), \quad (8)$$

где n_y – количество подуступов при разноте северного борта карьера.

Объем пород при выполаживании откоса следует определять по формуле

$$V = \frac{H_y \cdot \Delta L}{2} = \frac{(n_y \cdot h_y^{c3})^2 \cdot (\text{ctg} \alpha_{\text{рез}}^{c3} - \text{ctg} \alpha_6^{\text{pe3}})}{2}. \quad (9)$$

С целью установки солнечных панелей разработана конструкция транс-

портной бермы, обеспечивающая возможность их монтажа и обслуживания при соблюдении требований промышленной безопасности (рисунок 8).



Рисунок 8 – Конструкция горизонтальной транспортной бермы для монтажа:

P_n – ширина проезжей части, м; P_k – ширина кювета по верху, м;
 P_b – ширина предохранительного вала, м; b – ширина водоотводной канавки, м;
 h_b – высота предохранительного вала, м; P_m – ширина площадки под матчу, м;
 P_o – расстояние от проезжей части до ограждающего вал

Исследование изменения полезной площади инсоляции и дополнительных объемов горных пород при выколаживании откосов карьера и отвала проводилось для условного месторождения, расположенного на параллели 50°С.Ш., высоте откоса – 30 м, ширине бермы – 7,5 м, угле откоса подступа – 30°, расстоянии до матчи от нижней бровки подступа – 1,5 м, при проектном угле откоса верхних уступов – 45°, для вариантов высоты подступов от 2,5 до 10 м с шагом 2,5 м, представлены на рисунке 9.

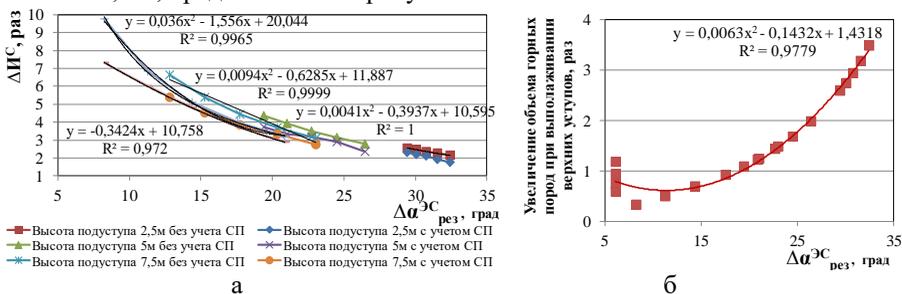


Рисунок 9 – Зависимость изменения инсоляции ΔI_C на поверхности откоса северного борта карьера (а) и объема дополнительно извлекаемых горных пород от величины угла его выколаживания $\Delta \alpha_{рез}^C$ (б)

С целью определения эффективности выполнения горных работ при обеспечении требуемой конструкции откоса отвала и северного борта карьера предложен коэффициент инсоляции горнотехнической системы, являющийся отношением дополнительных объемов вскрыши при выколаживании откоса к создаваемой полезной площади инсоляции.

Коэффициент инсоляции горнотехнической системы является суммой коэффициента инсоляции карьера и коэффициента инсоляции отвала:

$$k_{ин}^{ГТС} = k_{ин}^K + k_{ин}^{ОТВ} = \frac{V_0^K}{S_0^K} + \frac{V_0^{ОТВ}}{S_0^{ОТВ}} = \frac{V_0^K}{A \cdot (n_y - 1)} + \frac{V_0^{ОТВ}}{A \cdot (n_y + 1)}, \quad (10)$$

где $k_{ин}^K$ и $k_{ин}^{OTB}$ – соответственно коэффициент инсоляции карьера и отвала;
 V_0^K – объем дополнительно вынимаемых горных пород при выполаживании участка северного борта карьера, $м^3$;
 V_0^{OTB} – объем вскрышных пород, переносимый в тело отвала при выполаживании участка южного откоса отвала, $м^3$;
 S_0^K – суммарная площадь откоса участка северного борта карьера при его разном для монтажа солнечной электростанции, $м^2$;
 S_0^{OTB} – суммарная площадь откоса участка южного откоса отвала при его выполаживании для монтажа солнечной электростанции, $м^2$.

В работе проведены исследования коэффициента инсоляции карьера для различных вариантов конструкции откоса отвала и борта карьера для условий месторождений, расположенных между параллелями 50° и 60° северной широты (рисунок 10).

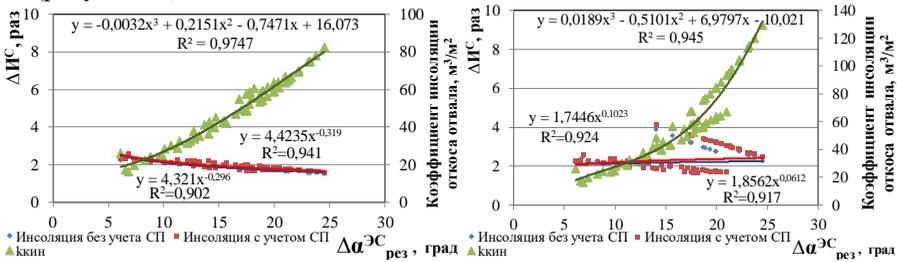


Рисунок 10 – Совмещенные зависимости усредненных значений изменения инсоляции $\Delta И^С$ и коэффициента инсоляции отвала от величины угла его выполаживания $\Delta\alpha^{\text{ЭС}}$ для месторождений: а – 50°С.Ш. ; б – 60°С.Ш.

С целью определения оптимальной конструкции южного откоса отвала и северного борта карьера разработана математическая оптимизационная модель, системой целевых функций которой является минимизация коэффициента инсоляции при максимизации полезной площади инсоляции с учетом наличия системы ограничений, включающих технологическое обеспечение монтажа и обслуживания установок по преобразованию солнечного излучения в электроэнергию, количество и высоту ярусов/подступов и площадь инсоляции откосов карьера и отвала

$$\begin{cases} k_{ин}^{\text{ГТС}} = k_{ин}^K + k_{ин}^{OTB} \rightarrow \min; \\ A + A_0 \rightarrow \max, \\ V_0^K = \frac{(n_y \cdot h_y^{c3})^2 \cdot (\text{ctg } \alpha_{\text{рез}}^{c3} - \text{ctg } \alpha_6^{\text{рез}})}{2}; \\ V_0^{OTB} = \frac{(n_y \cdot h_{y0}^{c3})^2 \cdot (\text{ctg } \alpha_{\text{рез}}^{c30} - \text{ctg } \alpha_0^{\text{рез}})}{2}; \\ A = (h_y^{c3} + (\text{Ш}_{\text{бр}} + h_y^{c3} \cdot \text{ctg } \alpha_y^{c3}) \text{tg } \alpha_c^3) \cdot \cos \alpha_c^3; \\ A_0 = (h_{y0}^{c3} + (\text{Ш}_{\text{бр}} + h_{y0}^{c3} \cdot \text{ctg } \alpha_{y0}^{c3}) \text{tg } \alpha_c^3) \cdot \cos \alpha_c^3; \end{cases} \quad (11)$$

где $n_{я}$ – количество ярусов отвала, шт.;

$h_{yo}^{сэ}$ – высота яруса отвала, град;

$\alpha_{yo}^{сэ}$ – угол откоса яруса отвала, град.;

$\alpha_{рез}^{сэ0}$ – результирующий угол откоса отвала при выколаживании, град.;

$ctg \alpha_o^{рез}$ – проектный угол южного откоса отвала, град.;

A_o – полезная площадь инсоляции при установке солнечных панелей на откосе отвала, м².

В результате выколаживания откоса образуются дополнительные объемы вскрышных пород, которые необходимо разместить на ограниченной площади, отведенной под отвал. В работе предлагается осуществлять наращивание высоты отвала для размещения дополнительных объемов вскрыши.

В отличие от карьера, поверхность отвала может быть эффективно использована не только для преобразования солнечного излучения, но и ветровой энергии. В работе, с целью исследования влияния конструкции и параметров внешнего отвала на повышение эффективности преобразования ветровой энергии в электрическую, разработана методика моделирования параметров отвала с целью оценки их влияния на воздушные потоки в пределах осваиваемого участка недр. Верификация модели проведена с учетом натурных исследований скорости ветра на месторождениях «Малый Куйбас» и «Агаповское».

В работе предложены технические решения по размещению ветрогенераторов непосредственно на откосах отвала с подветренной стороны и на его поверхности. С целью определения влияния параметров горнотехнической системы на энергетический потенциал потоков воздушных масс разработана методика компьютерного аэродинамического моделирования конструкции и параметров отвала и оценки их влияния на изменение скорости ветра (рисунок 11). Для этого использовались три типа программных комплексов систем автоматизированного проектирования (САПР):

- горно-геологические информационные системы (ГГИС);
- трёхмерные системы автоматизированного проектирования и черчения (CAD);
- система компьютерного проектирования, технического анализа и подготовки изделий к производству любой сложности (CAE).

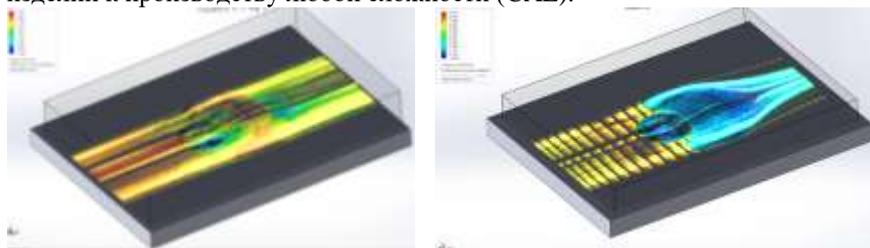


Рисунок 11 – Визуализация результатов аэродинамического моделирования ГТС

В соответствии с разработанной методикой моделирования были проведены исследования различных форм и параметров отвалов с учетом величины результирующего угла откоса 12, 25 и 35° при высоте отвала до 140 м (рисунок 12).

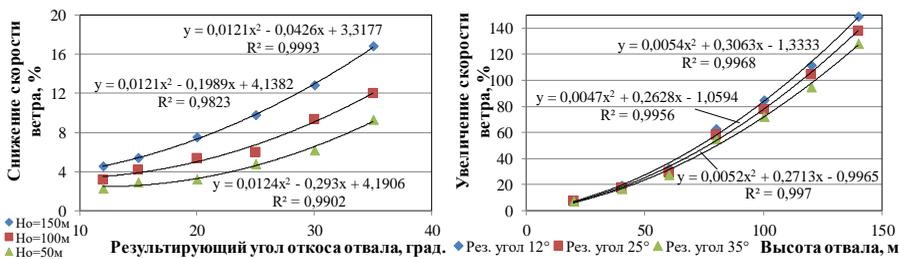


Рисунок 12 – Зависимость изменения скорости ветра от высоты отвала и его результирующего угла для условий рассекающей преграды

На этапе проектирования горнотехнической системы необходимо предусмотреть геотехнологические решения, обеспечивающие повышение эффективности использования солнечной и ветровой энергии. Для этого предлагается формирование и эксплуатация аккумулирующей техногенной емкости, функционирующей с использованием карьерной воды.

В работе предложены технологические схемы формирования аккумулирующей емкости с использованием пород вскрыши и обоснована методика определения объемов резервуара, материалов, необходимых для строительства ограждающей дамбы и создания гидроизоляции. Исследования объемов пород вскрыши, необходимых для ее формирования при заданной площади основания, проводились для условий ограниченной площади поверхности отвала от 5 до 36 га и полезной глубине прудка до 16 м (рисунок 13).

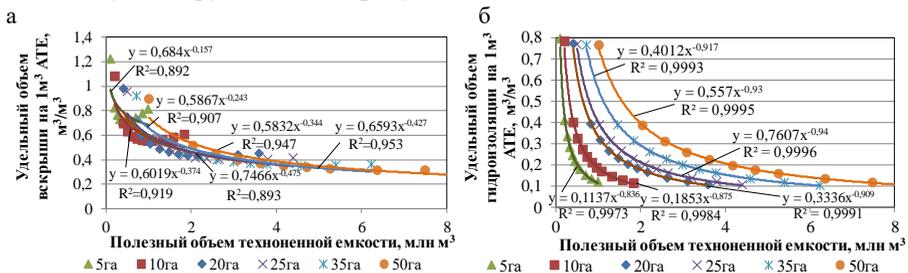


Рисунок 13 – Зависимость удельного объема пород вскрыши (а) и удельного объема гидроизоляционного материала (б) для создания 1 м³ полезного пространства техногенной емкости от ее вместимости

На основе выполненных исследований влияния конструкционных, технических, технологических и экономических факторов на параметры открытой геотехнологии разработан алгоритм определения параметров горнотехнической системы (ГТС) и комплексного освоения участка недр при использовании солнечной (СЭС) и ветровой (ВЭС) энергии (рисунок 14).

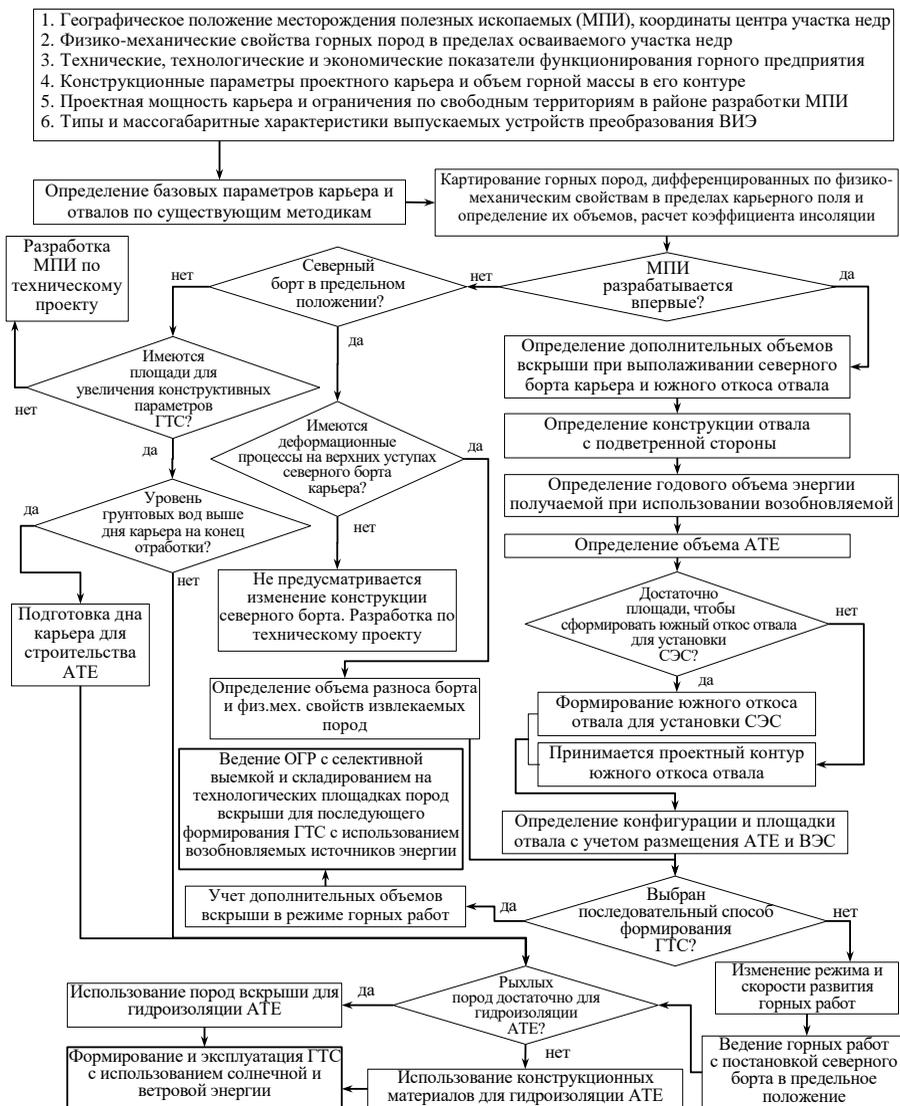


Рисунок 14 – Алгоритм определения параметров горнотехнической системы при использовании солнечной и ветровой энергии

Таким образом, определение конструкции и оптимальных параметров откоса отвала и борта карьера, способствующих использованию солнечной и ветровой энергии, обеспечивает при разработке месторождения одновременно ведение горных работ и рекультивационных мероприятий, повышая эффективность горнодобывающих предприятий и полностью комплексного освоения участка недр.

В четвертой главе проведено экономическое обоснование эффективности выполнения откосов отвалов и его поверхности для установки солнечных панелей и ветрогенераторов. Выполнен расчет экономической эффективности внедрения рекомендаций на месторождении «Малый Куйбас».

Разработанные технические решения целенаправленного формирования дополнительного яруса отвала с заданными параметрами его южного откоса для монтажа и обслуживания солнечных панелей, а поверхности - для установки ветрогенераторов, обеспечивают одновременное создание техногенного георесурса, ведение горных работ и выполнение мероприятий по рекультивации нарушенных земель. Для рассмотренных условий месторождений, расположенных на параллели 53°С.Ш., эффективность всех обоснованных технических решений подтверждается расчетным сроком окупаемости: для солнечных панелей – до 1 года, для ветрогенераторов – до 4 лет. На основе предложенной в работе методики обоснования конструкции и параметров откоса отвала и верхних уступов карьера оценены затраты на формирование дополнительного яруса на южном отвале карьера «Малый Куйбас» для установки 30 солнечных панелей и 58 ветрогенераторов. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение затрат на освоение участка недр

Эффект от реализации	Значение, тыс. руб./год	Затраты на мероприятия	Значение, тыс. руб./год	Экономический эффект от внедрения мероприятий, тыс. руб./год
Сокращение затрат на рекультивацию	74 112	Транспортирование	30 108,00	82 285,11
Доход от ВГ	48 470,83	Бульдозерные работы	9 154,00	С учетом коэффициента экономической эффективности капложений 0,15 тыс. руб./год
Доход от солнечных панелей	680,28	Обслуживание и прочие расходы	1 716,00	47 317,79

Таким образом, ведение горных работ при формировании южного откоса отвала и верхних уступов северного борта карьера в соответствии с обоснованной конструкцией, способствующей использованию солнечной и ветровой энергии, обеспечивает совмещение добычных работ и мероприятий по рекультивации нарушенных земель, рост эффективности горнодобывающих предприятий и налоговых отчислений с отчуждаемых территорий до 6 раз при повышении полноты и комплексности освоения участка недр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, дано новое решение актуальной научно-практической задачи обоснования параметров открытой геотехнологии, обеспечивающей формирование южных откосов отвалов и верхних уступов северного борта карьера с целью концентрации солнечной и ветровой энергии в ходе развития горных работ для повышения полноты и комплексности освоения участка недр, имеющее важное значение для развития горнодобывающего комплекса России.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. На основе проведенного анализа мирового опыта использования возобновляемых источников энергии и их применения при рекультивации земель, нарушенных горными работами, установлена необходимость обоснования параметров горнотехнической системы для формирования карьеров и отвалов, обеспечивающих условия использования солнечной и ветровой энергии.

2. В работе обоснованы способы повышения эффективности функционирования горнодобывающего предприятия за счет опережающей постановки верхних уступов северного борта карьера в предельное положение и придания внешним отвалам соответствующей конструкции и формы в плане с целью использования солнечной и ветровой энергии в ходе ведения горных работ, что обеспечивает снижение затрат на аренду земель в период добычи полезных ископаемых за счет их параллельной рекультивации с повышением кадастровой стоимости до 6 раз.

3. Систематизированы горнотехнические сооружения, возводимые для использования природной и техногенной возобновляемой энергии, по способу формирования и осваиваемому источнику энергии и установлены требования к конструкции и параметрам верхних уступов карьера, внешних отвалов и техногенных емкостей.

4. Разработаны рекомендации по определению конструкции отвала, его формы в плане и порядка формирования с учетом розы ветров, применение которых обеспечивает концентрирование ветровых потоков в заданных областях и позволяет выбрать рациональный тип ветрогенератора с целью максимального использования энергии ветра.

5. Доказано, что безопасность ведения добычных работ при их совмещении с монтажом и эксплуатацией солнечных панелей на верхних уступах карьера обеспечивается размером охраняемой зоны, величина которой определится с учетом первоначальной скорости вылета кусков горных пород при взрыве и составляет не более 200 м в плане, что достигается обоснованием параметров буровзрывных работ по предложенной методике.

6. Установлено, что оптимальное соотношение коэффициента инсоляции и количественного значения инсоляции достигается при выполаживании результирующего угла откоса в диапазоне $7-12^\circ$ для условий месторождений, расположенных между параллелями 50 и 60° С.Ш. Разработан коэффициент инсоляции горнотехнической системы, который предложено использовать в качестве критерия оценки эффективности изменения конструкции откоса карьера и отвала.

7. Установлена зависимость объема техногенной емкости, формируемой в качестве гидроаккумулятора из пород вскрыши, необходимых для ее строительства, от размеров верхних уступов северного борта карьера и параметров отвалов. Определено, что при увеличении вместимости аккумулирующей техногенной емкости в 3 раза снижается необходимый объем гидроизоляционного материала до 8 раз, а строительных материалов до 5 раз.

8. Разработан алгоритм определения параметров верхних уступов карьера и отвалов вскрыши для концентрирования солнечной и ветровой энергии в заданной области горнотехнической системы и предложена номограмма определения угла откосов, высоты верхних уступов северного борта карьера и изменения объема вскрышных пород, дополнительно извлекаемых из недр при его выполаживании для использования техногенной возобновляемой энергии.

9. Экономически обоснована эффективность формирования верхних откосов северного борта карьера и отвалов вскрышных пород для монтажа солнечных панелей, ветрогенераторов и гидроаккумулирующей техногенной емкости с целью использования природной и техногенной возобновляемой энергии в условиях месторождений Рудника ГОП ПАО «ММК», подтвержденный актами внедрения эффект составил 47,3 млн руб. в год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Основы перехода к комплексному освоению участка недр при открытом способе разработки месторождений твердых полезных ископаемых и формировании возобновляемых источников энергии / И. А. Пыталев, **А. А. Полинов** // Маркшейдерия и недропользование. – 2023. – № 5(127). – С. 17-23.
2. Обоснование ударно-воздушной волновой безопасности промышленных взрывов больших блоков в каскадах / Д. В. Доможиров, В. Х. Пергамент, **А. А. Полинов**, И. А. Пыталев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 1. – С. 413-426.
3. Влияние рельефа на ударно-воздушный волновой эффект при взрывных работах в карьере / Д. В. Доможиров, В. Х. Пергамент, **А. А. Полинов**, И. А. Пыталев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 2. – С. 147-157.
4. Обоснование системы разработки с внутренним отвалообразованием при освоении крутопадающего месторождения Курасан / И. А. Пыталев, В. В. Якшина, А. А. Козловский, **А. А. Полинов** // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 4(66). – С. 34-38.

Патенты РФ и охраняемые документы

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612477. Программа расчета КЗУ откосов борта карьера и отвалов / **А. А. Полинов**, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Оpubл. 01.02.2024.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612706. Программа расчета суммарного и удельного расхода топлива автосамосвалов с учетом направляющего уклона карьерных автодорог / **А. А. Полинов**, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; правообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова». Оpubл. 07.02.2023.

В прочих изданиях

1. Концепция комплексного освоения участка недр с формированием новых источников энергии при разработке месторождений твердых полезных ископаемых / А. А. Козловский, **А. А. Полинов**, И. А. Пыталев, В. В. Якшина // Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. – С. 55-57.
2. Обоснование возможности формирования солнечного пруда в процессе разработки месторождения твердых полезных ископаемых открытым способом / И. А. Пыталев, В. В. Якшина, А. А. Козловский, **А. А. Полинов** // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 23–24 ноября 2023 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. – С. 165-169.
3. Целенаправленное формирование техногенных георесурсов как способ одновременной рекультивации нарушенных земель и повышения их кадастровой стоимости в процессе ведения открытых горных работ / И. А. Пыталев, **А. А. Полинов**, В. В. Якшина [и др.] // Недропользование и транспортные системы. – 2023. – Т. 13, № 1. – С. 39-47.
4. Имитационное моделирование работы экскаваторно-автомобильного комплекса карьера / И. А. Пыталев, А. А. Козловский, **А. А. Полинов** [и др.] // Недропользование и транспортные системы. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 62-73.
5. Полинов, А. А. Геотехнологические способы обеспечения требуемых углов откосов уступов верхних горизонтов карьера для монтажа на них солнечных батарей / **А. А. Полинов** // Современные достижения университетских научных школ: сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 23–24 ноября 2023 года. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. – С. 160-164.
6. 利用开放式可再生能源开采和形成方法综合开发地下区域的基本原理 / I. A. Pytalev, **A. A. Polinov**, I. S. Turkin, V. V. Yakshina // 联合创新-联合发展 : 国际外国科学会议, 哈尔滨 中国, 24 октября 2023 года. – 哈尔滨 中国: HNRI "National development", 2023. – P. 47-50. (Основы комплексного освоения участка недр при открытом способе добычи и формировании возобновляемых источников энергии)

Подписано в печать 28.06.2024. Формат 60x84/16. Бумага тип. №1.
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100 экз. Заказ 116.

Участок оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38