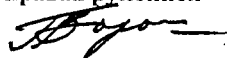


На правах рукописи



003457984

**Ворошилов Георгий Александрович**

**ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УКЛОНОВ  
АВТОДОРОГ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НАГОРНО-  
ГЛУБИННЫХ КАРЬЕРОВ**

Специальность 25.00.22 - "Геотехнология  
(подземная, открытая и строительная)"

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

15 ДЕК 2008

Екатеринбург, 2008

Работа выполнена в ГОУ ВПО  
«Уральский государственный горный университет»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор технических наук, профессор  
Лель Юрий Иванович


ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
ГАЛЬЯНОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ


кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
ШАРИН ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Институт горного дела УрО РАН

Защита состоится « 29 » декабря 2008 г. в 12.00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.280.02 при Уральском государственном горном университете по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП-126, ул. Куйбышева, 30, 2-е уч. зд., ауд. 2142 .

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского государственного горного университета

Автореферат диссертации разослан  «  » ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор  В. К. Багазеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из тенденций развития горной промышленности в нашей стране и за рубежом является усложнение топографических условий месторождений, вовлекаемых в разработку. Уже сейчас месторождения с гористым рельефом составляют на территории бывшего СССР 15-20 % всех разрабатываемых карьерами месторождений, и удельный вес их продолжает возрастать. В будущем предстоит освоение месторождений полезных ископаемых в труднодоступных районах Северного Урала, Тянь-Шаня, Памира, в обширных регионах Восточной Сибири, в том числе месторождений медных и титаномагнетитовых руд Чинейско-Удоканской группы.

Ведение открытых работ на нагорно-глубинных карьерах связано с рядом трудностей. К ним относится сложность подвода транспортных коммуникаций и проходки полутраншей на крутых обрывистых склонах; стесненность рабочего пространства из-за пересеченности рельефа и ограниченная протяженность рабочего фронта; нехватка удобных площадей для размещения вскрышных пород и отходов обогащения и т.п. Ввиду ряда преимуществ автомобильный транспорт является основным технологическим транспортом нагорно-глубинных карьеров. Эксплуатация автомобильного транспорта на нагорно-глубинных карьерах имеет ряд специфических особенностей и характеризуется значительной сложностью. Это, в первую очередь, обусловлено сложной конфигурацией трасс в профиле и плане, сочетающих движение груженых автосамосвалов на спуск и подъем горной массы, а также повышенными требованиями к безопасности движения.

Одним из основных технологических параметров автотранспорта является продольный уклон карьерных автодорог. Важным направлением повышения эффективности автотранспорта нагорно-глубинных карьеров является увеличение уклонов автодорог. В технологическом аспекте применение повышенных уклонов позволяет сократить дополнительный разнос бортов карьеров от размещения транспортных коммуникаций, в энергетическом – увеличение уклонов в определенном диапазоне позволяет повысить энергетическую эффективность автотранспорта при работе на подъем и спуск горной массы. В настоящее время уровень научного обеспечения проектных и производственных решений в данном вопросе отстал от потребностей промышленности. Отсутствует методика определения оптимальных уклонов автодорог в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации. Проектными институтами уклоны принимаются согласно рекомендациям устаревших СНиП без учета технического прогресса в большегрузном автомобилестроении, типа трансмиссии и условий эксплуатации. В связи с этим исследование обоснования оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров является весьма актуальным.

**Целью работы** является разработка методики оптимизации уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров.

**Основная идея** исследования заключается в комплексном использовании физических (удельные энергозатраты на подъем и спуск горной массы, время движения и удельное действие) и экономических (сумма дисконтированных капитальных вложений и эксплуатационных затрат) критериев, а также технических ограничений, позволяющих установить оптимальные значения уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров.

**Объектами исследования** являются нагорно-глубинные карьеры с применением технологического автомобильного транспорта, **предметом исследования** – эксплуатационные показатели технологического автотранспорта при работе на различных уклонах карьерных автодорог.

В соответствии с поставленной целью в диссертации сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ условий, особенностей и технико-экономических показателей работы автосамосвалов на нагорно-глубинных карьерах.

2. Обоснованы физические критерии выбора оптимальных уклонов автодорог при работе на подъем и спуск горной массы, получены экспериментально-аналитические формулы для их расчета.

3. Установлены технические ограничения уклонов автодорог при эксплуатации автотранспорта на нагорно-глубинных карьерах.

4. Разработана методика технико-экономического обоснования уклонов карьерных автодорог

5. Проведено обоснование уклонов автодорог в условиях Чинейского ГОКа.

**Методы исследования:** анализ и обобщение опыта разработки нагорно-глубинных карьеров; регрессионный анализ при исследовании зависимостей эксплуатационных показателей автосамосвалов от суммарного сопротивления движению; геоинформационное моделирование транспортных коммуникаций; методы дифференциального и интегрального анализа при выводе формул оптимальных значений уклонов по физическим критериям; экономико-математическое моделирование при разработке методики технико-экономического обоснования оптимальных уклонов автодорог.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Оптимальные значения уклонов карьерных автодорог по физическим критериям определяются изменением коэффициентов полезного действия трансмиссии, скоростей движения и удельного расхода топлива автосамосвалами в зависимости от суммарного сопротивления движению на уклонах.

2. При ухудшении качества дорожного покрытия значения оптимальных уклонов, установленных по физическим критериям, смещаются в сторону увеличения, что согласуется с принципом Ле Шателье–Брауна, описывающим поведение физических систем в состоянии устойчивого равновесия.

3. Оптимальные значения уклонов по экономическим критериям следует устанавливать с учетом их влияния на технологические параметры карьеров в диапазоне, ограниченном физическими критериями и техническими предела-

ми. Увеличение глубины разработки предопределяет смещение оптимальных уклонов в сторону технических пределов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** диссертации подтверждается исходными предпосылками, основанными на фундаментальных положениях теории открытой разработки и теории формирования транспортных систем карьеров; результатами анализа горно-геологических и горнотехнических условий разработки нагорно-глубинных карьеров и технико-экономических показателей работы технологического автотранспорта; корректным применением методов статистической обработки наблюдений по методикам Госстандарта РФ; сходимостью результатов теоретических исследований и моделирования с результатами опытно-промышленных испытаний.

**Научная новизна результатов исследования** заключается в следующем:

– впервые предложены и обоснованы физические критерии (удельные энергозатраты на подъем и спуск горной массы, время движения и удельное действие) выбора оптимальных уклонов автодорог для автосамосвалов с различным типом трансмиссии при работе в условиях нагорно-глубинных карьеров;

– установлены зависимости изменения оптимальных уклонов автодорог от качества дорожного покрытия;

– установлены технические ограничения уклонов автодорог по условию нагрева тягового электрооборудования для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией;

– обоснованы технологические схемы и метод расчета глубины перехода на повышенные уклоны при разработке нагорно-глубинных карьеров;

– разработана комплексная методика оптимизации уклонов автодорог с учетом технологических параметров разработки нагорно-глубинных карьеров.

**Научное значение исследования** заключается в разработке методики обоснования оптимальных уклонов автодорог, обеспечение которых позволит повысить эффективность горных работ на нагорно-глубинных карьерах, что является вкладом в теорию формирования транспортных систем карьеров – научное направление физико-технической геотехнологии\*.

**Практическая ценность работы.** Использование результатов исследований позволяет:

– сократить затраты на транспортирование горной массы и вскрышные работы за счет оптимизации уклонов карьерных автодорог;

---

\* Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли /РАН, АГН, РАЕН, МИА; под ред. К. Н. Трубецкого. – М.: Изд-во Академии горных наук. 1997. – 478 с.

– принимать научно обоснованные решения на стадии проектирования, обеспечивающие эффективную эксплуатацию технологического автотранспорта нагорно-глубинных карьеров.

#### **Личный вклад автора:**

– теоретическое обоснование физических критериев выбора оптимальных уклонов карьерных автодорог для автосамосвалов с различным типом привода;

– установление зависимостей изменения эксплуатационных и технико-экономических показателей автотранспорта от величины продольного уклона автодорог;

– разработка методики выбора оптимального уклона автодорог для карьеров нагорно-глубинного типа;

– обоснование оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинного карьера Чинейского ГОКа.

**Реализация результатов работы.** Результаты исследований послужили теоретической основой выбора оптимального уклона автодорог при проектировании транспортной системы Чинейского ГОКа (ОАО «Институт Уралгипроруда»). Рекомендации по техническим ограничениям уклонов автодорог для дизель-электрических автосамосвалов внедрены на комбинате «Магнезит» при доработке Карагайского карьера. Основные результаты диссертационной работы используются при чтении лекций и проведении лабораторных занятий по курсам: «Энергетическая оценка процессов и технологий», «Процессы открытых горных работ», «Взаимодействие процессов открытых горных работ», «Проектирование карьеров» для студентов специальности 130403 – «Открытые горные работы» направления 130400 – «Горное дело».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и ее отдельные результаты обсуждены и одобрены на международных конференциях «Проблемы разработки месторождений глубокими карьерами» (г. Челябинск, 1996 г.) и «Проблемы геотехнологии и недроведения» (г. Екатеринбург, 1998 г.), на Международном семинаре «Энергосбережение на карьерном автомобильном транспорте» (г. Екатеринбург, 2003 г.), на Международной научно-технической конференции руководителей горнодобывающего комплекса (г. Жодино, ПО «БелАЗ», 2002 г.), на Республиканской научно-технической конференции «Модернизация промышленного транспорта – 2003» (г. Москва, 2003 г., Ассоциация предприятий промышленного транспорта АСПРОМТРАНС), на VII Международной научно-практической конференции «Проблемы карьерного транспорта» (г. Екатеринбург, 2005 г.), на Республиканской научно-технической конференции «Компьютерные технологии в горном деле» (г. Екатеринбург, 2002 г.), на Международной научно-технической конференции «Проблемы открытой разработки месторождений полезных ископаемых (Хохряковские чтения)» (г. Екатеринбург, 2007 г.), в Институте горного дела УрО РАН, комбинате «Магнезит» и других горнодобывающих предприятиях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ. Основное содержание диссертации отражено в 13 работах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 124 страницах машинописного текста, включает 32 рисунка, 28 таблиц, список литературы из 127 наименований и 3 приложения.

Работа выполнена в рамках исследований по следующей тематике: «Разработка методики оптимизации уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров» (задание Федерального агентства по образованию, 2005 г.), «Исследование энергетической эффективности транспортных систем глубоких карьеров» (задание Федерального агентства по образованию, 2008-2010 гг.).

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам лаборатории транспортных систем и геотехники Института горного дела УрО РАН, сотрудникам и преподавателям кафедры разработки месторождений открытым способом УГТУ за оказанную методическую помощь и ценные советы при формировании и обсуждении работы, а также считает своим долгом выразить искреннюю признательность канд. техн. наук, доц. Э. В. Горшкову и инженерам Т. Л. Буддик и Г. И. Егоренковой за практическую помощь в проведении исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируются горно-геологические и горнотехнические условия разработки нагорно-глубинных карьеров; условия, особенности и технико-экономические показатели работы автосамосвалов в транспортных схемах нагорно-глубинных карьеров; состояние изученности вопросов эксплуатации автосамосвалов при повышенных уклонах автодорог.

Анализ перспектив развития проектируемых ОАО «Институт Уралгипроруда» горнодобывающих предприятий Урала, Сибири, а также Республики Казахстан показывает, что новые месторождения будут осваиваться в объективно более сложных природных условиях, особенно топографических. Подтверждением этой тенденции служат осваиваемые или подлежащие освоению нагорные месторождения: Шемурское, Ново-Шемурское медноколчеданные и Центральное по добыче хромитовых руд на Полярном Урале, Чинейское железорудное, Удоканское меднорудное, Саяновское и Молодежное асбестовые, Савинское магнетитовое и другие перспективные месторождения Сибири.

По данным ИГД УрО РАН, в 1995 г. на нагорно-глубинных карьерах добывалось 1,2 % железных руд, в 2005 г. – 10,6 %, а к 2010 г. эта доля увеличится до 15-17 %.

С начала 60-х годов прошлого века нагорно-глубинными карьерами мира накоплен значительный опыт ведения работ. Однако он слабо отражен в технической литературе. Распространено мнение о том, что к ним без труда при-

менимы технологические рекомендации, выработанные для месторождений с равнинной поверхностью.

Между тем открытая разработка в горах имеет ряд существенных особенностей. К ним в первую очередь относятся сложность вскрытия месторождений при прокладке наземных транспортных коммуникаций на крутых склонах, стесненность рабочего пространства и необходимость удаления больших объемов вскрышных пород в начальный период разработки; дефицит площадей, пригодных для размещения отвалов и хвостохранилищ; трудности работы людей и оборудования на открытом разряженном воздухе в условиях высокогорья; наличие лавинной, селевой опасности, низких температур и многое другое, а также имеется возможность *полезно использовать силы гравитации для доставки полезного ископаемого к перерабатывающему комплексу у подножья возвышенности с рекуперацией электроэнергии в сети.*

Условия эксплуатации автомобильного транспорта на нагорно-глубинных карьерах характеризуются рядом особенностей:

- пункты складирования полезного ископаемого и вскрышных пород располагаются, как правило, в нижней части карьера, что предопределяет направления грузопотоков как снизу вверх, так и сверху вниз под уклон;

- величина продольного уклона автодорог достигает 12-18 %, а количество поворотов на трассе 5-7;

- средневзвешенный уклон постоянных карьерных автодорог составляет 7-8 %, при этом длина участков с уклонами 10-18 % достигает 30-35 % от общей протяженности трасс.

В научно-технической литературе изучению условий эффективной эксплуатации большегрузного автотранспорта на карьерах уделяется большое внимание. Основные научные положения по технологии открытых горных работ с применением автомобильного транспорта изложены в трудах академиков Н. В. Мельникова и В. В. Ржевского, член-корр. В. Л. Яковлева, профессоров М. В. Васильева, М. Г. Новожилова, В. С. Хохрякова, Б. А. Симкина, П. И. Томакова, М. Г. Потапова, К. Н. Трубецкого, А. Н. Шилина, В. А. Михайлова, З. Л. Сироткина, В. П. Смирнова, В. А. Галкина, Ю. И. Анистратова, А. М. Макарова, И. В. Зырянова, Ю. И. Леля, А. С. Довженка.

Вопросы эксплуатации автомобильного транспорта на нагорно-глубинных карьерах нашли отражение в исследованиях профессоров И. З. Лысенко, С. А. Ильина, кандидатов технических наук Е. П. Дороненко, В. И. Белозерова, А. С. Тыренко, Э. В. Горшкова и др.

Вместе с тем обзор научно-технической литературы свидетельствует о недостаточной изученности комплекса вопросов, связанных с условиями и особенностями эксплуатации технологического автотранспорта на нагорно-глубинных карьерах. Актуальными остаются вопросы обоснования оптимальных уклонов автодорог, в значительной степени определяющих *эффективность* не только транспортного процесса, но и открытого способа разработки в целом.



Во второй главе диссертационной работы исследуются технические ограничения уклонов автодорог при эксплуатации автосамосвалов на нагорно-глубинных карьерах. Технические ограничения уклонов автодорог определяются тягово-динамическими характеристиками автотранспортных средств, условиями безопасности, устойчивостью автосамосвалов, нагрузками на автошины и тепловыми режимами тягового электрооборудования (для автосамосвалов с ЭМТ). При этом для автосамосвалов, работающих на подъем горной массы, определяющее значение имеют ограничения по тягово-динамическим качествам и нагреву тягового электрооборудования, а для автосамосвалов, работающих на спуск горной массы, – по условиям безопасности и нагрузок на автошины. В табл. 1 приведены технические ограничения уклонов для автосамосвалов БелАЗ с колесной формулой 4×2.

Таблица 1 – Технические ограничения уклонов автодорог при работе на различных схемах нагорно-глубинных карьеров

Ограничения	Максимальный уклон на автодорогах со щебеночным покрытием ( $\omega_0 = 0,002 + 0,025$ ), %	
	при работе на подъем горной массы	при работе на спуск горной массы
Тягово-динамические качества и условия безопасности.....	10 – 12	10 – 14
Устойчивость автосамосвалов.....	23,6 – 38,3	22,4 – 36,8
Нагрузки на автошины.....	16 – 20	9 – 17
Нагрев тягового электрооборудования (автосамосвалы с ЭМТ).....	Ограничивается высота подъема горной массы и время движения по уклону	

Технические ограничения уклонов автодорог нашли достаточно полное отражение в исследованиях канд. техн. наук Э. В. Горшкова. Вместе с тем остается актуальным вопрос расчета предельных параметров трасс по условию допустимого нагрева тягового электрооборудования для автосамосвалов с ЭМТ. На основе обработки экспериментальных данных по токовым нагрузкам тягового электрооборудования автосамосвалов БелАЗ (рис. 1) в диссертации разработан метод расчета предельных параметров трасс, основанный на сравнении среднеквадратичных токов за один транспортный цикл с допустимыми их значениями.

Установлено, что допустимая (предельная) высота подъема горной массы ( $H_n$ ) определяется следующими факторами: допустимыми длительными токами тягового электрооборудования ( $I_n$ , А), качеством дорожного покрытия ( $\omega_0$ ), руководящим ( $i_p$ , %) и средневзвешенным ( $i_{ср}$ , %) уклонами автодорог, коэффициентом использования грузоподъемности ( $k_r$ ), продолжительностью погрузки ( $t_n$ , мин) и ожидания (остановок) в транспортном цикле ( $t_0$ , мин), характеристиками системы вентиляции и коэффициентами снижения теплоотдачи при работе электродвигателя на различных режимах ( $\mu_r$ ) (рис. 2).

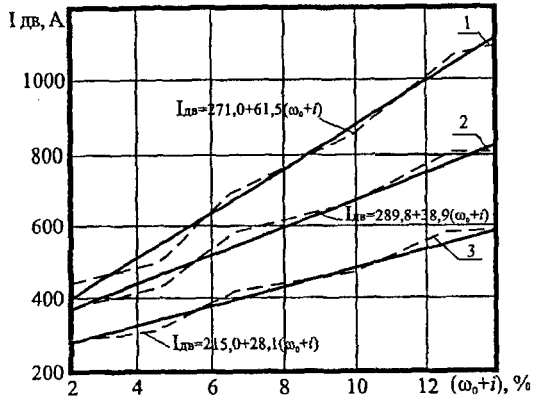


Рис. 1 – Зависимость силы тока тяговых электродвигателей груженых автосамосвалов ( $I_{дв}$ ) от суммарного сопротивления движению ( $\omega_0 + i$ ):  
 1 – БелАЗ-7521 (170 т); 2 – БелАЗ-7519 (110 т); 3 – БелАЗ-7549 (80 т)

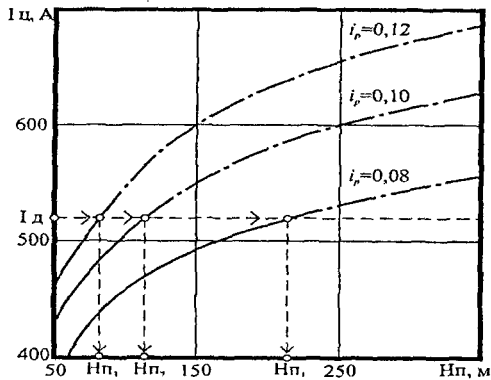


Рис. 2 – Зависимость средневекторного тока тяговых электродвигателей БелАЗ-7519 ( $I_{ц}$ ) от высоты подъема ( $H_{п}$ ) и руководящего уклона ( $i_{п}$ ) (щебеночное покрытие):

$I_{д}$  – допустимый (длительный) ток тяговых электродвигателей;  $H_{п1}$ ,  $H_{п2}$ ,  $H_{п3}$  – допустимая высота подъема горной массы соответственно при  $i_{п} = 0,08$ ,  $i_{п} = 0,10$ ,  $i_{п} = 0,12$

Перегрузочные способности тяговых электродвигателей позволяют использовать автосамосвалы с ЭМТ на повышенных уклонах при ограниченной высоте подъема горной массы. Так, во избежание перегрева тягового электрооборудования на уклоне 8 % высота подъема горной массы автосамосвалами БелАЗ-7519 не должна превышать 220-230 м, а на уклоне 10 % – 120-130 м, на уклоне 12 % – 70-80 м. С внедрением нового поколения тяговых электродвигателей и генераторов на автосамосвалах БелАЗ-7512, БелАЗ-7513 и БелАЗ-7514

указанные пределы удалось увеличить в 1,7-1,8 раза. Вместе с тем для уклонов 10-12 % вопрос остается актуальным.

Следует отметить, что установленные технические ограничения уклонов не являются постоянными величинами. Совершенствование конструкций автосамосвалов и автошин, систем электродинамического торможения будет способствовать увеличению предельных уклонов. Так, внедрение полноприводных автосамосвалов с колесной формулой 4×4 и 6×6 позволяет увеличить предельный уклон при работе на подъем горной массы до 16-18 %.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена оптимизации уклонов карьерных автодорог по физическим критериям. Исходя из основных функций автотранспорта нагорно-глубинных карьеров в качестве физических критериев приняты:

- величина удельных затрат энергии на подъем (спуск) 1 т горной массы на 1 м (г/т·м);
- суммарное время движения по уклону в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м (с);
- удельное действие – комплексный критерий, представляющий собой произведение количества энергии, расходуемой на перемещение горной массы по уклону, и времени ее перемещения (г·с/т·м).

В физике известен **принцип наименьшего действия** (принцип Гамильтона), который с определенными допущениями можно распространить на транспортные системы карьеров. В последнее время указанный принцип широко применяется для решения прикладных задач механики и термодинамики\*.

Удельный расход дизтоплива автосамосвалами при работе на подъеме горной массы ( $P$ , г/т·м)

$$P = \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n (k_T + 1) \left( \frac{\omega_o}{i} + 1 \right)}{\eta_a} + \frac{g_x}{1000 i G v_{п_i}}, \quad (1)$$

где  $g_n$  – удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя, г/кВт·ч;

$k_T$  – коэффициент тары автосамосвала;

$\omega_o$  – коэффициент сопротивления качению;

$i$  – уклон автодороги, доля ед.;

$\eta_a$  – к.п.д. трансмиссии автосамосвала;

$g_x$  – удельный расход топлива при движении порожних автосамосвалов в тормозном режиме, г/ч;

$G$  – грузоподъемность автосамосвала, т;

$v_{п_i}$  – скорость порожнего автосамосвала на спуске с уклоном  $i$ , км/ч.

При работе на спуск горной массы

\* Веретенников В. Г., Синицын В. А. Метод переменного действия. – 2-е изд., исправл. и доп. – М.: Физматлит, 2005. – 272 с.

$$P = \frac{2,725 \cdot 10^{-3} g_n k_T \left( \frac{\omega_0}{i} + 1 \right)}{\eta_a} + \frac{g'_x}{1000 i G v_{r_i}}, \quad (2)$$

где  $g'_x$  – удельный расход топлива при движении груженых автосамосвалов в тормозном режиме, г/ч;

$v_{r_i}$  – скорость груженого автосамосвала на спуске с уклоном  $i$ , км/ч.

В выражениях (1) и (2) для автосамосвалов с электромеханической трансмиссией  $\eta_a$  является величиной переменной, зависящей в тяговом режиме от силы тока (нагрузки) и определяющейся соотношением электрических, магнитных и механических потерь в генераторе и тяговых электродвигателях мотор-колес (рис. 3, а).

$$\eta_a = \eta_b \eta_r \eta_d \eta_p. \quad (3)$$

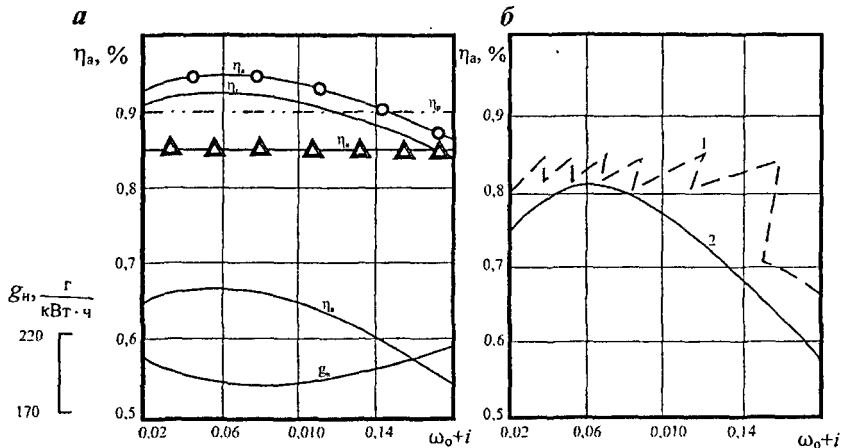


Рис. 3 – Зависимости эксплуатационных показателей автосамосвалов с различным типом привода от суммарного сопротивления движению ( $\omega_0 + i$ ):

а – БелАЗ-7519 (110 т) – экспериментальные данные; б – зарубежные автосамосвалы; 1 – автосамосвал САТ-785 (130 т) с многоступенчатой ГМТ; 2 – автосамосвал грузоподъемностью 120 т с ЭМТ;  $\eta_a$  – к.п.д. трансмиссии;  $\eta_b$  – потери мощности на вспомогательное оборудование;  $\eta_r$ ,  $\eta_p$ ,  $\eta_d$  – к.п.д. соответственно генератора, редуктора мотор-колеса, тягового электродвигателя;  $g_n$  – удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя

Ввиду сложности аналитического описания в расчетах рекомендуется использовать экспериментальные зависимости  $\eta_a$  от суммарного сопротивления движению, имеющие вид

$$\eta_a = k_T [A(\omega_0 + i)^2 + B(\omega_0 + i) + C], \quad (4)$$

где  $k_T$  – коэффициент, учитывающий изношенность трансмиссии ( $k_T = 0,87 \pm 1,0$ );  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – эмпирические коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты для определения к.п.д. трансмиссии груженых автосамосвалов с ЭМТ ( $\eta_a$ ) при движении на подъем

Модель и грузоподъемность автосамосвала, т	Эмпирические коэффициенты		
	A	B	C
БелАЗ-75491 (80)	-24,723	3,091	0,526
БелАЗ-75145 (120)	-51,669	7,649	0,394
БелАЗ-7513 (130)	-45,992	7,035	0,599
БелАЗ-75215 (180)	-14,642	2,386	0,507
БелАЗ-75303 (200)	-11,490	1,182	0,551
БелАЗ-75306 (220)	-40,068	6,513	0,411

К.п.д. трансмиссии автосамосвалов с многоступенчатой гидромеханической передачей остается практически постоянным в широком диапазоне преодолеваемых уклонов ( $i = 2 \div 14 \%$ ) (см. рис. 3, б).

Удельный расход топлива при номинальной нагрузке двигателя ( $g_n$ ) также можно описать эмпирической зависимостью  $g_n = f(\omega_0 + i)$ . Таким образом, используя зависимости  $\eta_a$ ,  $g_n$  и скоростей  $V_n$  и  $V_r$  от суммарного сопротивления движению ( $\omega_0 + i$ ), было установлено изменение удельного расхода топлива на подъем (спуск) горной массы ( $P$ , г/т·м), суммарного времени движения ( $T$ , с) и удельного действия ( $D$ , г·с/т·м) от уклона ( $i$ ) и качества дорожного покрытия ( $\omega_0$ ) (рис. 4). Оптимальные значения уклонов по критерию энергозатрат для автосамосвалов БелАЗ-7519 при работе на подъем горной массы приведены в табл. 3.

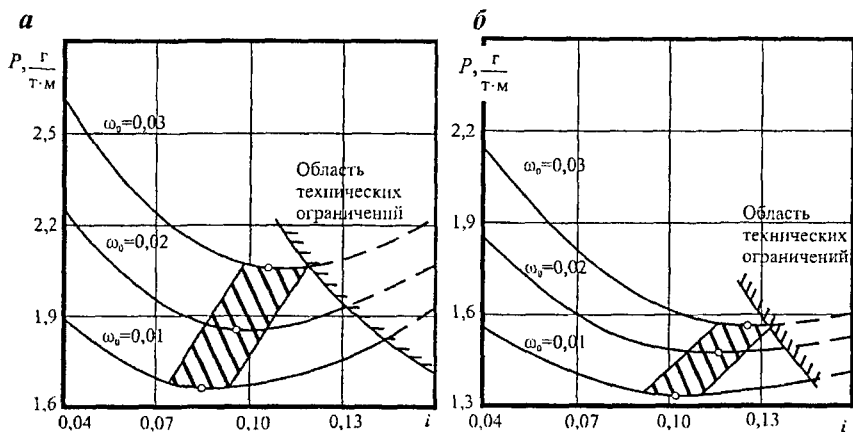


Рис. 4 – Зависимости удельного расхода дизтоплива автосамосвалами при работе на подъем горной массы ( $P$ ) от уклона автодороги ( $i$ ) и коэффициента сопротивления качению ( $\omega_0$ ):

а – БелАЗ-7519 (110 т); б – САТ-785 (130 т) с многоступенчатой ГМТ;


 – области минимальных значений  $P$

Таблица 3 – Оптимальные значения уклонов автодорог ( $i_{\text{опт}}$ ) по энергетическому критерию для автосамосвалов БелАЗ-7519

Тип щебеночного покрытия	$i_{\text{опт}}$
Асфальтобетонное ( $\omega_0 = 0,010 \div 0,015$ ).....	0,08 – 0,10
Щебеночное ( $\omega_0 = 0,020 \div 0,025$ ).....	0,09 – 0,11
Автодороги без покрытия на скальном основании ( $\omega_0 = 0,030 \div 0,040$ ).....	0,10 – 0,12

Величина  $i_{\text{опт}}$  возрастает с ухудшением дорожного покрытия. Установленные зависимости подтверждаются экспериментально и полностью согласуются с одним из важнейших принципов физики – принципом Ле Шателье – Брауна, описывающим поведение физических систем, находящихся в устойчивом равновесии.

Зависимости изменения удельного расхода топлива от уклона для автосамосвалов с гидромеханической трансмиссией имеют менее выраженный экстремальный характер, а оптимальные уклоны по энергетическому критерию на 15-20 % выше, чем у автосамосвалов с ЭМТ. Это преимущество в наибольшей степени проявляется в глубоких карьерах при работе автосамосвалов в качестве магистрального транспорта (рис. 4, а, б).

Оптимальные уклоны по времени движения (производительности) на 18-20 % превышают значения оптимальных уклонов по критерию удельных энергозатрат (табл. 4). При работе автосамосвалов на спуск горной массы оптимальные уклоны по критериям энергозатрат и удельного действия находятся в зоне технических ограничений. Оптимальный продольный уклон по физическим критериям следует рассматривать как частный оптимум и нижний предел уклона, который рекомендуется принимать при проектировании транспортных систем. Окончательное решение по руководящим уклонам следует принимать на основе экономических критериев, учитывающих влияние уклона на технологические параметры горных работ.

Таблица 4 – Оптимальные значения уклонов автодорог по физическим критериям

Тип трансмиссии автосамосвалов	Оптимальный уклон (%) по критерию		
	удельных энергозатрат	времени движения	удельного действия
<i>Работа на подъем горной массы</i>			
Электромеханическая	8 – 12	10 – 14	8 – 12
Гидромеханическая	10 – 14	12 – 14	10 – 13
<i>Работа на спуск горной массы</i>			
Электромеханическая	Определяется техническими ограничениями	10 – 14	Определяется техническими ограничениями
Гидромеханическая	То же	12 – 14	То же

В четвертой главе изложена методика технико-экономического обоснования оптимальных уклонов при разработке нагорно-глубинных карьеров.

Технико-экономическое обоснование величины продольного уклона карьерных автодорог является динамической оптимизационной задачей, включающей:

- учет изменения капитальных и эксплуатационных затрат на технологический автотранспорт в зависимости от величины уклона автодорог в динамике развития карьера;
- учет дополнительного разноса бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций;
- экологическую оценку применения повышенных уклонов.

В качестве основного экономического критерия выбора оптимального уклона целесообразно использовать сумму дисконтированных капитальных затрат и эксплуатационных расходов на технологический автотранспорт и выемку вскрыши за полный срок отработки карьера или за период оптимизации, составляющий 10-15 лет. При этом рассматриваемые уклоны при оптимизации ( $i$ ) должны находиться в следующем диапазоне:

$$i_{\text{опт}}^{\Phi} \leq i < i_{\text{пред}}, \quad (5)$$

где  $i_{\text{опт}}^{\Phi}$  – оптимальное значение уклона по физическим критериям;

$i_{\text{пред}}$  – предельное значение уклона, соответствующее техническим ограничениям.

Проблема дополнительного разноса бортов карьеров для размещения вскрывающих выработок является одной из наиболее актуальных проблем разработки глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых открытым способом. Объемы дополнительного разноса бортов на нагорно-глубинных карьерах составляет миллиона и десятки миллионов кубометров вскрышных пород. Это обусловлено тем, что размещение вскрывающих выработок ведет к выполаживанию бортов карьера по сравнению с их устойчивыми значениями. Особенно это характерно для карьеров с небольшой длиной дна, в которых уменьшение протяженности уступов с глубиной происходит наиболее интенсивно. Увеличение уклонов автодорог позволяет сократить дополнительной разнос бортов от размещения транспортных коммуникаций и повысить экономические показатели открытого способа разработки. В диссертационной работе проведен анализ современных методов расчета дополнительного разноса бортов карьера при изменении уклона автодорог. Наиболее приемлемым из них является метод, разработанный канд. техн. наук Г. Г. Саканцевым (ИГД УрО РАН), учитывающий кривизну борта карьера. Вместе с тем указанный аналитический метод хоть и является универсальным, но характеризуется большой трудоемкостью и низкой точностью. При выполнении исследований строились объемные модели карьеров в системе AutoCAD с различным уклоном вскрывающих выработок, рассчитывались объемы вскрыши в конечных контурах карьера и производилось сравнение этих объемов. Так, при увеличении уклонов вскрывающих выработок с 8 % (проектный вариант) до 10 % на карьере «N» АК «АЛРОСА» при конечной глубине 300 м сокращение объемов вскры-

ши составляет 8,2 млн. м<sup>3</sup>, т. е. 13,4 % от общих объемов в контуре. Разница в погоризонтных объемах вскрыши изменяется от 0-3 % на нижних горизонтах до 10,3-20,3 % – на верхних и средних.

Установлено, что эффективность перехода на повышенные уклоны в значительной степени определяется технологической схемой перехода. В диссертационной работе рассмотрены две наиболее распространенные схемы (рис. 5).

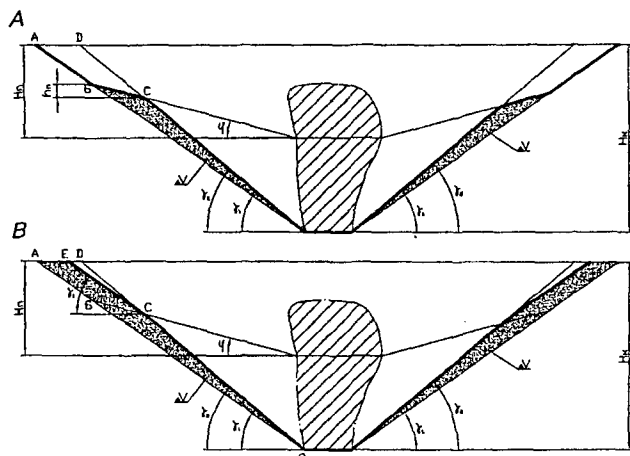


Рис. 5 – Технологические схемы перехода на повышенные уклоны автодорог:

$H_k$  – конечная (проектная) глубина карьера;  $\gamma_2, \gamma_1$  – угол откоса нерабочего борта карьера соответственно при уклоне вскрывающих выработок  $i_2$  и  $i_1$  ( $i_2 > i_1$ );  $H_n$  – глубина перехода на повышенный уклон  $i_2$ ;  $h_n$  – высота переходной зоны;  $\varphi$  – угол откоса рабочего борта;  $\Delta V$  – сокращение объема разноса бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций

При схеме А нерабочий борт карьера формируется под углом  $\gamma_1$ , соответствующим руководящему уклону вскрывающих выработок  $i_1$ . Положение нерабочего борта на конец разработки соответствует линии АВО. При достижении глубины карьера  $H_n$  мы принимаем решение о переходе на повышенный уклон  $i_2$  ( $i_2 > i_1$ ). Новое положение нерабочего борта АВСО будет соответствовать углу погашения  $\gamma_2$  ( $\gamma_2 > \gamma_1$ ). Образуется переходная зона ВС высотой  $h_n$ , которая представляет выложенный участок нерабочего борта.

Схема имеет недостаток, заключающийся в том, что объемы вскрыши, которые можно сократить при переходе на повышенный уклон  $i_2$ , резко падают с увеличением глубины перехода.

К достоинствам схемы можно отнести простоту ее реализации на практике, возможность принятия решения о переходе в любой период разработки



карьера, а также возможность организации внутреннего отвалообразования в переходной зоне при вывозке вскрышных пород с глубоких горизонтов.

При **схеме В** отсутствует переходная зона. Нерабочий борт формируется по линии ЕСО, причем верхняя часть нерабочего борта ЕС отстраивается под углом  $\gamma_1$ , соответствующим уклону  $i_1$ , а нижняя часть СО – под углом  $\gamma_2$ , соответствующим уклону  $i_2$ .

К **достоинствам** схемы можно отнести то, что с глубиной карьера (глубиной перехода на повышенный уклон) сокращаемые объемы вскрыши падают медленно, что позволяет получать ощутимый эффект даже при значительной глубине перехода.

К **недостаткам** схемы следует отнести ограниченность ее применения стадией проектирования или первоначальной стадией разработки, когда нерабочие борты карьера не вышли на предельный контур.

В работе проведено исследование влияния уклона вскрывающих выработок на интенсивность ведения открытых горных работ. Установлено, что увеличение уклона автодорог с 8 до 14 % позволяет увеличить возможную скорость углубки карьера в 1,18-1,33 раза.

На примере Чинейского ГОКа проведено технико-экономическое сравнение автомобильных трасс с уклонами 6, 8, 10 и 12 % для автосамосвалов БелАЗ-7512 (120 т) (перевозки руды) и БелАЗ-7530 (200 т) (транспортирование вскрыши) с электромеханической трансмиссией. Чинейское месторождение титаномагнетитовых ванадийсодержащих руд занимает территорию размером 3×2 км в сложных горных условиях с абсолютными отметками рельефа в пределах карьера от +1650 м до +2150 м. Косогорность рельефа на площади карьера колеблется от 7 до 45°.

Были рассмотрены следующие варианты трассы:

– на время сдачи карьера в эксплуатацию – трасса для перевозки руды от отметки +1998 м до перегрузочного пункта и трасса для транспортирования вскрышных пород в отвал № 2. Работа автосамосвалов осуществляется в основном на спуск;

– на период полного развития горных работ – трасса от гор. +1670 м. В этом случае работа автосамосвалов осуществляется на подъем (перевозки вскрыши) и на подъем-спуск (перевозки руды).

Установлено, что увеличение уклона с 7-8 % (проектный вариант) до 10-12 % позволит сократить дисконтированные затраты на 36-59,4 млн. руб., или на 6,7-11,0 % при сроке оптимизации 10 лет. Поскольку основная трасса Чинейского ГОКа сочетает движение груженых автосамосвалов на подъем и спуск, окончательно рекомендовано увеличение уклонов автодорог при движении груженых автосамосвалов на подъем до 10 %, на спуск – до 12 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано новое решение научно-практической задачи обоснования оптимальных уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров на основе комплексного использования технических ограничений, физических и экономических критериев, имеющее существенное значение для повышения эффективности открытого способа разработки месторождений.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Эксплуатация автомобильного транспорта на нагорно-глубинных карьерах имеет ряд специфических особенностей и характеризуется значительной сложностью. Это, в первую очередь, обусловлено сложной конфигурацией трасс в профиле и плане, сочетающих движение груженых автосамосвалов на подъем и спуск горной массы, а также повышенными требованиями к безопасности движения. Важным направлением повышения эффективности автотранспорта нагорно-глубинных карьеров является увеличение уклонов автодорог. В технологическом аспекте применение повышенных уклонов позволяет сократить дополнительный разнос бортов карьеров от размещения транспортных коммуникаций, в энергетическом – увеличение уклонов в определенном диапазоне позволяет повысить энергетическую эффективность автотранспорта при работе на подъем и спуск горной массы.

2. Технические ограничения уклонов автодорог при работе автотранспорта на нагорно-глубинных карьерах определяются тягово-динамическими характеристиками, условиями безопасности, устойчивостью автосамосвалов, нагрузками на автошины и тепловыми режимами тягового электрооборудования (для автосамосвалов с ЭМТ). Для отечественных автосамосвалов с колесной формулой 4×2 технические ограничения по различным факторам составляют от 9 до 38,3 %. Для автосамосвалов, работающих на подъем горной массы, определяющее значение имеют ограничения по тягово-динамическим качествам и нагреву тягового электрооборудования, а для автосамосвалов, работающих на спуск, – ограничения по условиям безопасности и нагрузок на автошины.

3. Установлено, что допустимая (предельная) высота подъема горной массы автосамосвалами с ЭМТ определяется следующими факторами: руководящим и средневзвешенным уклонами автодорог, коэффициентом использования грузоподъемности, продолжительностью погрузки и ожидания (остановок) в транспортном цикле, характеристиками систем вентиляции электрооборудования. Для различных моделей отечественных автосамосвалов допустимая высота подъема при руководящем уклоне 8 % составляет 350-400 м, при уклоне 10-12 % – 150-230 м. В диссертации разработан метод расчета предельной высоты подъема, основанный на геоинформационном моделировании автотранспортных коммуникаций, позволяющий производить корректировку трасс и выбирать рациональные горнотехнические и организационные условия работы автосамосвалов.

4. Теоретически обоснованы физические критерии оптимизации на нагорно-глубинных карьерах:

– удельные затраты дизтоплива на подъем (спуск) 1 т горной массы на 1 м (г/т·м);

– суммарное время движения по уклону в грузовом и порожняковом направлениях при подъеме (спуске) горной массы на 1 м (с);

– удельное действие, представляющее собой произведение количества энергии, расходуемой на перемещение горной массы по уклону, и времени ее перемещения (г·с/т·м).

Установлено, что оптимальные значения уклонов по физическим критериям определяются зависимостями изменения к.п.д. трансмиссии, скоростей движения и удельного расхода топлива автосамосвалами от суммарного сопротивления движению на уклонах.

5. Оптимальные значения уклонов по физическим критериям при ухудшении качества дорожного покрытия смещаются в сторону увеличения, что согласуется с физическим принципом Ле Шателье-Брауна.

6. Оптимальные уклоны по времени движения (производительности) на 18-20 % превышают значения оптимальных уклонов по критерию удельных энергозатрат. При работе автосамосвалов на спуск горной массы оптимальные уклоны по критериям энергозатрат и удельного действия находятся в зоне технических ограничений.

7. Разработанная методика технико-экономического обоснования оптимальных уклонов автодорог включает:

– учет изменения капитальных и эксплуатационных затрат на технологический автотранспорт в зависимости от величины уклона автодорог в динамике развития карьера;

– учет дополнительного разноса бортов карьера от размещения транспортных коммуникаций;

– экологическую оценку применения повышенных уклонов.

8. Эффективность перехода на повышенные уклоны в значительной степени определяется технологической схемой перехода. В диссертационной работе обоснованы две технологические схемы, отличающиеся динамикой сокращаемых объемов вскрыши, и установлены области их применения. Схему без переходной зоны рекомендуется применять на стадии проектирования, схему с переходной зоной – на стадии эксплуатации карьеров.

9. На примере Чинейского ГОКа проведено технико-экономическое сравнение автомобильных трасс с уклонами 6, 8, 10 12 % для автосамосвалов БелАЗ-7512 и БелАЗ-7530. Установлено, что увеличение уклона с 7-8 % (проектный вариант) до 10-12 % позволит сократить затраты на разработку на 6,7-11 %. Рекомендовано увеличение уклона автодорог при движении груженых автосамосвалов на подъем до 10 %, на спуск – до 12 %.

Результаты диссертационной работы используются в практике проектирования карьеров, на горнодобывающих предприятиях и в учебном процессе УГТУ.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК России:*

1. Яковлев В. Л. Проблемы освоения нагорных месторождений Полярного Урала /В. Л. Яковлев, С. И. Бурыкин, Г. А. Ворошилов //Горный журнал. – 2001. – № 10. – С. 47-50.
2. Секисов Г. В. Горнодобывающие предприятия нагорного типа Восточно-Российского региона /Г. В.Секисов, Ю. В. Мамаев, Г. А. Ворошилов //Горный журнал. – 2001. – № 10. – С. 59-62.
3. Ворошилов Г. А. Особенности эксплуатации горнотранспортного оборудования нагорно-глубинных карьеров /Г. А. Ворошилов //Изв. вузов. Горный журнал. – 2007. - № 7. – С. 3-8.

*Работы, опубликованные в других изданиях:*

4. Горно-геологические и горнотехнические условия разработки глубоких карьеров /Ю. И. Лель, И. Н. Сандригайло, Е. Ю. Терехин, Г. А. Ворошилов //Изв. Урал. гос. горно-геол. акад. Сер.: Горное дело. – 2000. – Вып. 11. – С. 77-85.
5. Ворошилов Г. А. Особенности формирования схемы вскрытия, транспорта и отвалообразования в сложных условиях горного рельефа Чинейско-Удоканской группы месторождений /Г. А. Ворошилов, В. Г. Поль, А. И. Каулько //Изв. Урал. гос. горно-геол. акад. Сер.: Горное дело. – 2000. – Вып. 11. – С. 85-90.
6. Ворошилов Г. А. Создание компьютерной технологии проектирования и планирования горных работ в ОАО «Институт Уралгипроруда» /Г. А. Ворошилов, В. Г. Поль //Изв. Урал. гос. горно-геол. акад. Сер.: Горное дело. – 2000. – Вып. 11. – С. 282-285.
7. Ворошилов Г. А. Построение электронной модели месторождения в программе DATAMINE /Г. А. Ворошилов, В. С. Примак, М. В. Осипов //Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. «Итоги и проблемы производства, науки и образования в сфере добычи полезных ископаемых открытым способом», 10-11 октября 2002 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – С. 224-230.
8. Ворошилов Г. А. Тенденции и перспективы применения карьерного автотранспорта на горнодобывающих предприятиях Уральского региона /Г. А. Ворошилов //Мат-лы науч.-практ. конф. «Карьерный транспорт 2002 г.» - Жодино: ПО «БелАЗ», 2002. – С. 50-52.
9. Методика оптимизации уклонов автодорог при разработке нагорно-глубинных карьеров /Ю. И. Лель, Г. А. Ворошилов, Т. Л. Ефимовских, С. А. Дементьев //Мат-лы Междунар. науч.-техн. семинара «Энергосбере-

- жение на карьерном автомобильном транспорте». 24-26 июня 2003 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2003. – С. 72-81.
10. К оценке энергетической эффективности транспортных систем карьеров в условиях рыночной экономики /В. С. Хохряков, Ю. И. Лель, Г. А. Ворошилов, Н. А. Николаев //Мат-лы VII Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы карьерного транспорта», 20-23 сентября 2005 г., г. Екатеринбург. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2005. – С. 18-25.
  11. Ворошилов Г. А. Проблемы освоения и дальнейшего совершенствования системы автоматизированного проектирования в ОАО «Институт Уралгипроруда» /Г. А. Ворошилов //Изв. УГГУ. Сер.: Горное дело. – 2005. – Вып. 21. – С. 125-129.
  12. Лель Ю. И. Методика энергетической оценки транспортных систем карьеров в условиях рыночной экономики /Ю. И. Лель, Г. А. Ворошилов //Изв. УГГУ. Сер.: Горное дело. – 2005. – Вып. 21. – С. 129-138.
  13. Лель Ю. И. Энергоемкость транспортных систем карьеров: оценка и перспективы /Ю. И. Лель, Г. А. Ворошилов //Горная техника – 2007: Каталог-справочник. – С.-Петербург: Изд-во ООО «Славутич», 2007. – С. 102-108.

Подписано в печать 27.11.2008

Бумага писчая

Печ. л. 1,0

Тираж 100

Формат 60×84 1/16

Печать на ризографе

Заказ № 189

---

Отпечатано в лаборатории множительной техники УГГУ  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30  
Уральский государственный горный университет