

УДК 622.271: 624.131

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛА ВСКРЫШНЫХ ПОРОД
ПРИ ЕГО ФОРМИРОВАНИИ С НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А. И. Барулин

*Производственная фирма “АГС”, E-mail: BarulinAI@mail.ru,
111500, г. Рудный, Республика Казахстан*

Исследована возможность разгрузки карьерных самосвалов небольшой грузоподъемности на отвале с наклонной в сторону откоса поверхности. Разработана математическая модель отвала для анализа его напряженного состояния методом конечных элементов, в которой применен оригинальный способ оценки устойчивости откоса. Доказана возможность безопасной разгрузки автосамосвалов типа Kamatsu MOXU в подобных условиях. Результаты исследований использованы при строительстве конвейерного подъема на Качарском карьере АО “Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения”.

Отвал, метод конечных элементов, автосамосвал, механика разрушения, линии скольжения, критерии оценки устойчивости

Исчерпание балансовых запасов Сарбайского и Соколовского карьеров Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения (АО “ССГПО”) и необходимость сохранения производительности предприятия требуют увеличения объемов добычи железной руды на Качарском карьере. Пропускная способность существующей автомобильно-железнодорожной транспортной схемы Качарского карьера для решения этой задачи недостаточна. Кроме того, железнодорожный вид транспорта в стесненных условиях карьерного путевого развития требует существенных затрат времени на устранение сходов поездов, блокирующих работу всего горного предприятия.

Для обеспечения ритмичной работы и повышения производительности Качарского карьера институтом ОАО “Гипроруда” (Россия) и фирмой Engang Group Mining Engineering Corporation (КНР) спроектирован конвейерный комплекс по транспортированию горной массы на земную поверхность. Конвейерный комплекс включает в себя: дробильную установку, которая необходима для обеспечения приемлемой для данного вида транспорта кусковатости материала, и две конвейерные линии для доставки горной массы на поверхность с глубины 220 м. Первая конвейерная линия транспортирует руду до штабелера, вдоль 700-метровой трассы штабелер формирует три склада. Руда из этих складов отгружается экскаваторами в железнодорожные составы для доставки на обогатительную фабрику. Породная конвейерная линия на дневной поверхности размещается на пионерной насыпи до отвала, где вскрышные породы при помощи перегружателя и передвижного поперечного конвейера непосредственно отсыплются в отвал.

Особенностью возведения данного инженерного сооружения является то, что применение используемой на карьере горной техники большой единичной мощности невозможно из-за недостаточных размеров рабочих зон в проектном положении уступов. Поэтому к строительству конвейерного комплекса была привлечена подрядная производственная фирма, имеющая маневренные карьерные машины средней мощности.

Оптимальным и безопасным вариантом производства работ признана послойная укладка скальной породы снизу вверх с последующим профилированием поверхности подъема бульдозерами, именно по такой схеме отсыпаны 4-й и 5-й уступы борта карьера, от которых расстояние до карьерных железнодорожных тупиков не превышало 2 км. Отсыпка самого нижнего (шестого) и трех верхних уступов по этой технологической схеме невозможна либо из-за отсутствия на них железнодорожных тупиков вследствие небольшой ширины транспортных берм, либо наклонного профиля основания отсыпки. Рассмотрен вариант строительства конвейерного съезда сверху вниз, но такая технологическая схема противоречит единым правилам безопасности [1], так как в них допускается разгрузка автосамосвалов на поверхности, имеющей уклон не менее 3.5° , обратный падению откоса.

Указанные правила ориентированы на карьерные автосамосвалы большой грузоподъемности с колесным расположением 2×4 , у которых $2/3$ общей массы при разгрузке приходится на ось заднего моста, приводящего к появлению момента силы, опрокидывающего машину под откос при существенной просадке колес заднего моста в породы отвала. Поскольку для выполнения данных работ предполагалось использовать карьерные автосамосвалы с колесным расположением 6×6 (Komatsu MOXU грузоподъемностью от 30 до 41 т), то необходимо было выполнить обоснование возможности их безопасной разгрузки непосредственно под откос с наклонной поверхности. Преимуществами машин средней мощности перед автосамосвалами большой грузоподъемности являются высокая маневренность за счет применения системы шарнирного сочленения, равномерное распределение нагрузки на каждое колесо и наличие задней двухосной тележки, увеличивающей площадь опоры при относительно небольшой транспортируемой горной массе.

При оценке безопасной разгрузки автосамосвала непосредственно под откос уделено большое внимание исследованию физико-механических свойств порфирита — горной породы, используемой для строительства верхней части конвейерного подъема. Исследование прочности порфирита нарушенной структуры выполнено на сдвиговом приборе БП-27 (рис. 1).

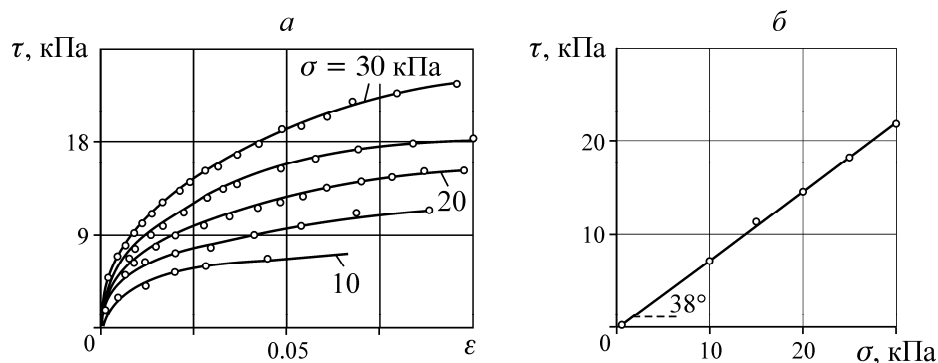


Рис. 1. Кривые деформирования (а) и паспорт прочности (б) порфирита нарушенной структуры

Анализ показывает, что паспорт прочности соответствует упругой горной породе, имеющей практически нулевое сцепление и угол внутреннего трения 38° , тогда как на кривых деформирования фиксируются зоны пластичности, позволяющие характеризовать эту породу как упруго-пластическую. Исследования проведены в интервале напряжений, действующих в реальном откосе. Практически все исследователи устойчивости откосов [2–4] используют модели сплошной среды, основанные на линейной интерпретации паспорта прочности породы. В этой задаче рассмотрена порода нарушенной структуры, для которой более адекватна модель сыпучей среды. В этом случае для расчетов численными методами более важен не паспорт прочности породы, а кривые ее деформирования.

Для оценки устойчивости откоса скальных пород в момент разгрузки автосамосвала с наклонного в сторону откоса основания использован метод конечных элементов. Математическая модель объекта отображает взаимодействие пород насыпного откоса с нагруженным автосамосвалом. На рис. 2 угол наклона отвала соответствует углу естественного откоса порфирита ($\alpha = 34^\circ$).

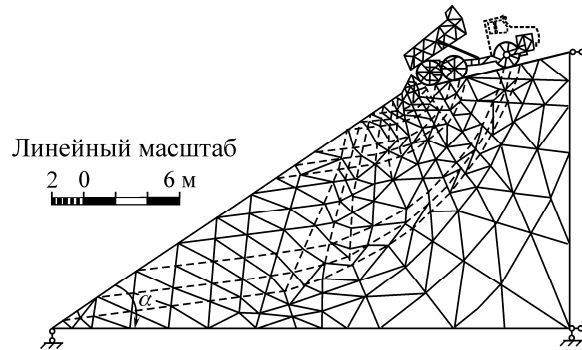


Рис. 2. Конечно-элементная модель объекта

Угол наклона конвейерного подъема принят 14° , высота отвала 17 м. Для расчета использовались параметры карьерного автосамосвала Komatsu MOXY MT41, имеющего наибольшую грузоподъемность в парке машин предприятия этого типа. Остальные автосамосвалы имеют геометрически тождественные параметры грузоподъемности [5]. Для получения более реальной картины взаимодействия колес автосамосвала с породами откоса были отображены его конструктивные особенности. Конечным элементам автосамосвала задавалась высокая жесткость и плотность, имитирующая его массу. Из-за незначительной массы кабины и системы управления они не учитывались в математической модели карьерного автосамосвала.

Решение ряда задач механики разрушения основано на введении в математические модели откосов элементов разрыва сплошности пород, имитируемых плоскими контакт-элементами. Их математическая модель описана в работе [2]. Для получения более объективного деформированного состояния откоса изотропных горных пород контакт-элементами моделируются поверхности скольжения [3, 6]. При этом контакт-элементам и конечным элементам назначаются одни и те же физико-механические свойства порфирита, различие заключается в том, что первые при определенных условиях могут деформироваться с нарушением сплошности породы, а вторые — не могут. Очертания наиболее напряженных поверхностей скольжения получены из решения дифференциальных уравнений статики сыпучей среды [3, 6]. На конечно-элементной модели объекта, приведенной на рис. 2, штриховыми линиями показаны очертания поверхностей первого и второго семейств скольжения. Чтобы избежать жесткой связи между породами конвейерного подъема и колесами автосамосвала, вдоль их контакта также размещались контакт-элементы.

Для расчетов использовалась разработанная автором компьютерная программа SW, описанная в работе [7], которая предназначена для решения плоских задач устойчивости открытых горных выработок. Размер расчетной области выбирался из соображений того, чтобы конвейерный подъем имел надлежащий коэффициент запаса устойчивости и деформации от массы автосамосвала в момент его разгрузки не должны распространяться до границ расчетной модели. Математическая модель оценки устойчивости объекта в момент разгрузки карьерного автосамосвала не включала исследование взаимодействия пород конвейерного подъема с горными породами борта карьера, на который они отсыпались. Это решение принято на основе заключения проекта института «Гипроруда» об устойчивости борта, на который отсыпается конвейерный подъем [4], выполненное в соответствии с действующими методическими указаниями [8].

Расчеты устойчивости откоса в момент разгрузки автосамосвала под откос методом конечных элементов выполнялись для плоской задачи механики горных пород. На первом этапе рассчитывалось деформированное состояние откоса без давления автосамосвала. Вычисленные смещения узлов конечных элементов использовались во всех последующих расчетах для получения деформаций пород отвала от действия только карьерного автосамосвала путем их вычитания. Упруго-пластическое решение находилось с помощью снижения физико-механических свойств порфирита на коэффициент запаса устойчивости [3, 8] до критического значения, соответствующего предельному состоянию пород под разгружающейся автомашиной.

Метод конечных элементов позволяет получать только упругое напряженно-деформированное состояние объекта, учет нелинейных свойств среды производится в программе SW способом переменных модулей [2], достоинством которого является возможность применения его к любым типам пород. Недостаток способа, проявляющийся в необходимости многократного вычисления элементов матрицы жесткости системы, при высокой производительности современных компьютеров не существен. В качестве критериев устойчивости нагруженного автосамосвалом откоса использовалась предельно допустимая величина просадки задних колес, которая не должна превышать 1/3 части их диаметра. Для автосамосвалов большой грузоподъемности это критическая просадка, приводящая к опрокидыванию машины, а для Komatsu MOXY — к невозможности самостоятельного выезда с места разгрузки. Однако многочисленными расчетами установлено, что предельное состояние горных пород откоса достаточно точно идентифицируется по факту невозможности подбора величин переменных модулей конечных и контакт-элементов математической модели объекта более чем за 100 итераций. К переменным модулям относятся: модуль Юнга — для конечных элементов, модули нормальной и касательной жесткости — для контакт-элементов. Используемый критерий свидетельствует о том, что равновесное состояние математической модели объекта для данных условий нагружения недостижимо. Оба критерия приводят к получению практически одинаковых предельных параметров нагруженных откосов, погрешность не превышает $\pm 1\%$ искомого параметра.

Для оценки устойчивости нагруженного автосамосвалом откоса методом конечных элементов использованы следующие исходные данные: скальная порода — модуль Юнга 32.4 кПа, коэффициент Пуассона 0.27, объемная плотность 1.7×10^3 кг/м³; контакт-элементы поверхностей скольжения — нормальная жесткость 3.8 кПа, касательная жесткость 48.9 кПа; контакты колес автомобиля с горной породой — нормальная жесткость 2.6 кПа, касательная жесткость 40.2 кПа; конструкция карьерного самосвала — модуль Юнга 2 МПа, коэффициент Пуассона 0.05, объемная плотность конструкции 0.49×10^3 кг/м³, объемная плотность груженого кузова 2.16×10^3 кг/м³.

Объемная плотность конструкции автосамосвала γ рассчитана по формуле

$$\gamma = \frac{P}{Sa}, \quad (1)$$

где $P = 29550$ — паспортная масса автомобиля, кг; $S = 17.517$ — площадь поперечного сечения математической модели автомобиля, м²; $a = 3.475$ — ширина его колеи, м.

Объемная плотность кузова автомобиля увеличивалась на величину, вычисленную по формуле (1), но для массы груза $P = 38000$ кг [5] и площади кузова $S = 6.532$ м².

Рассчитанный методом конечных элементов коэффициент запаса устойчивости отвала 17-метровой высоты при разгрузке карьерного автосамосвала Komatsu MOXY MT41 под откос с наклонной плоскости составил 1.26. Коэффициент запаса устойчивости ненагруженного откоса, рассчитанный методом многоугольника сил, в соответствии с требованиями методических указаний [8], составил 1.34. Расчет выполнен по программе, составленной в среде объектно-ориентированного программирования Microsoft Visual Basic 7, интерфейс пользователя которой для условий рассматриваемой задачи представлен на рис. 3. Компьютерная реализация метода многоугольника сил позволяет избавиться от погрешностей графических построений и автоматизировать работу исследователя.

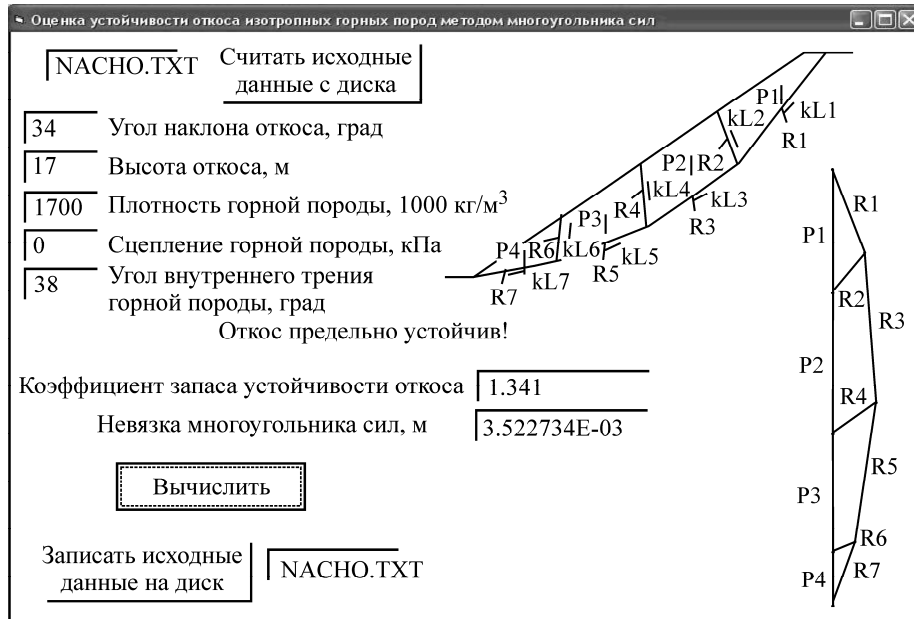


Рис. 3. Интерфейс пользователя программы оценки устойчивости откоса изотропных горных пород

Таким образом, снижение коэффициента запаса устойчивости откоса в момент разгрузки карьерного автосамосвала Komatsu MOXY MT41 составило 8%. Поскольку этот коэффициент превышает нормируемое значение в 1.2 раза [8], можно сделать вывод о возможности безопасной разгрузки карьерных автосамосвалов Komatsu MOXY грузоподъемностью, не превышающей 41 т, непосредственно под откос. Для подтверждения безопасной разгрузки машин меньшей грузоподъемности выполнены поверочные расчеты для самосвалов 30 и 35 т, которые привели к снижению коэффициента запаса устойчивости откоса на 10 и 8% соответственно. Более существенное влияние автосамосвала Komatsu MOXY MT30 на устойчивость откоса связано с меньшим размером площадки безопасности из-за сравнительно небольших геометрических размеров этой модели автомобиля. Спецификой примененного метода оценки возможности разгрузки самосвала под откос является учет особенностей конструкции машины, а не замена ее действия на отвал массой, приходящейся только на ее задний мост [8].

Для обоснования объективности полученных результатов выполнялись проверочные расчеты с изменением очертаний поверхностей скольжения. Установлено, что приведенные на рис. 2 очертания поверхностей скольжения являются оптимальными и соответствующими минимальному значению коэффициента запаса устойчивости откоса. Кроме того, проведены исследования по влиянию на точность расчетов числа поверхностей скольжения, возникающих в откосе. В расчетах призма возможного обрушения математической модели откоса как полностью покрывалась поверхностями скольжения, так и отображалась одиночными линиями [3]. Наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости откоса соответствует трем параллельным поверхностям скольжения первого семейства, возникающим под каждым из колес автосамосвала. Линий скольжения второго семейства должно быть также не менее трех, чтобы они делили образованную линией первого семейства скольжения и откосом призму возможного обрушения пополам. Линий скольжения второго семейства должно быть больше, чем первого, если обрушение происходит не по кругло-цилиндрической поверхности. Эти линии должны располагаться в местах сочленения криволинейных и прямолинейных участков линий скольжения первого семейства, в которых призма возможного обрушения неизбежно должна разрушиться при деформировании откоса. Дальнейшее увеличение числа поверхностей скольжения существенного влияния на точность расчетов устойчивости не оказывает.

В начальных расчетах плотность всех конечных элементов, имитирующих автосамосвал, принималась одинаковой, но вычисленные при горизонтальном положении автомобиля нагрузки под его колесами не совпадали с паспортными [5]. Для достижения соответствия изменен размер конечных элементов, имитирующих двигатель автосамосвала, принята нулевая плотность конечных элементов гидropодъемника кузова и увеличена масса кузова в соответствии с формулой (1). Установлено, что равномерное распределение массы по всем конечным элементам конструкции карьерного самосвала не соответствует действительности и существенно (до 5%) увеличивает коэффициент запаса устойчивости откоса в момент разгрузки.

Исследовалось изменение коэффициента запаса устойчивости откоса в зависимости от положения кузова при его разгрузке. Угол наклона кузова изменялся в интервале от 0 до 37°. Ограничение подъема в 37° связано с тем, что при нормальной загрузке кузова скальная порода высыпается при угле наклона, близком к углу естественного откоса (33–35°), но при преобладании крупных кусков скальной породы в зоне, примыкающей к заднему борту, угол увеличивается. Расчеты, выполненные методом конечных элементов, показали, что с повышением угла наклона кузова увеличивается неоднородность распределения напряжений на оси всех колес с максимальным напряжением на средней оси. Соответственно до угла наклона кузова 10° влияние на снижение коэффициента запаса устойчивости откоса наблюдается в пределах 1%, а затем начинает резко возрастать. На рис. 4 показано напряженно-деформированное состояние пород верхней части отвала и положение конструкции карьерного самосвала в предельном положении при угле наклона кузова 35°.

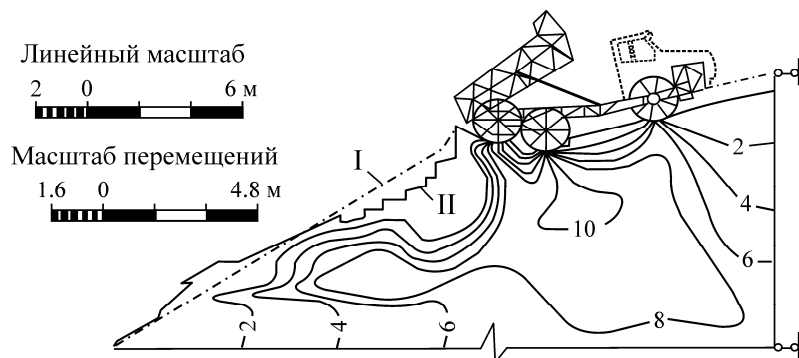


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние пород верхней части нагруженного автосамосвалом отвала: I — исходное и II — деформированное положение откоса, изолинии максимального главного напряжения σ_1 через 2 кПа

Изолинии максимального главного напряжения σ_1 указывают на то, что наибольшее напряжение возникает под колесами среднего моста карьерного самосвала. Деформированное состояние нагруженного откоса свидетельствует о том, что усадочные деформации отвальной массы существенны и на поверхности подъема достигают 0,8 м, быстро снижаясь вглубь отвала. В предельном состоянии в отвале под колесами среднего моста возникает треугольный клин пород, внедряющийся в массив отвала. За счет естественного уплотнения ранее отсыпанных пород изменение контура откоса происходит посредством выпучивания вверх пород вблизи упорного вала съезда. Максимум выпирания пород в откос приходится на поверхность скольжения, выходящую непосредственно под колеса среднего моста автосамосвала, хотя вдоль двух параллельных ей поверхностей скольжения они также существенны. Детальное исследование механизма деформирования пород съезда и автосамосвала в предельном состоянии не проводилось, так как не представляло интереса для решаемой производственной задачи.

Проверена возможность использования для отсыпки конвейерного съезда имеющихся на предприятии автосамосвалов Terex ASTRA и MAN грузоподъемностью 40 и 26 т соответственно. Расчеты показали, что автосамосвал Terex ASTRA приводит к снижению коэффициента запаса устойчивости откоса в момент разгрузки на 12 %. Более существенное (на 4 %) снижение коэффициента запаса устойчивости откоса, чем у автосамосвала Komatsu MOXY MT41, сопряжено с применением в его конструкции не наклонной, а горизонтальной рамы. Расчет возможности разгрузки автосамосвала MAN с наклоненной в сторону откоса площадки показал полную непригодность его конструкции для производства этого вида работ, так как при расчетах методом конечных элементов машина опрокидывалась под откос уже при небольшом наклоне кузова.

Конвейерный подъемник отсыпан при помощи карьерных автосамосвалов Komatsu MOXY и Terex ASTRA в течение 9 мес. За весь период их разгрузки под откос не возникло ни одной аварийной ситуации, хотя не каждый из привлекаемых опытных водителей соглашался работать на этом объекте.

ВЫВОДЫ

Приведено обоснование безопасной разгрузки карьерных автосамосвалов Komatsu MOXY и Terex ASTRA непосредственно под отвал с наклонной в сторону откоса площадки в 14°. Эта возможность связана с относительно небольшой грузоподъемностью автомобиля и его конструктивными особенностями.

Показано, что при оценке устойчивости откоса в момент разгрузки самосвалов непосредственно под откос особенности их конструкции и распределение массы оказывают существенное влияние на устойчивость откоса.

Для оценки устойчивости отвала в момент разгрузки автосамосвала под откос не применим метод алгебраического сложения сил, так как поверхность возможного обрушения не является кругло-цилиндрической и разворот призмы обрушения в виде жесткого клина невозможен.

Предложенный способ оценки устойчивости откоса в момент разгрузки карьерного автосамосвала под откос с наклонной поверхности в силу неординарности производственной задачи и используемых автосамосвалов не претендует на широкое распространение в практике открытых горных разработок, но показывает, что действующие правила безопасности на открытых горных работах нельзя рассматривать как догму. Следует иметь в виду, что отклонение от утвержденных правил требует проведения квалифицированных обоснований и согласования с территориальным надзорным органом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Единые правила безопасности** при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом (ПБ 02-498-02). — М.: ГУП НТЦ “Промышленная безопасность”, 2003.
2. **Фадеев А. Б.** Метод конечных элементов в геомеханике. — М.: Недра, 1987.
3. **Фисенко Г. Л.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов. — М.: Недра, 1965.
4. **Расчет устойчивости борта Качарского карьера по профилю трассы конвейерного комплекса.** Пояснительная записка. — СПб.: ОАО “Гипроруда”, 2010.
5. **Articulated dump trucks product information.** Internet: www.doosanmoxy.com.
6. **Соколовский В. В.** Статика сыпучей среды. — М.: Физматгиз, 1960.
7. **Барулин А. И., Рахимов З. Р.** Оценка устойчивости откосов слабых горных пород методом конечных элементов: труды университета. — Караганда: КарГТУ, 2006. — № 4.
8. **Методические указания** по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. — Л.: ВНИМИ, 1972.