



**ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВНЕШНИХ ОТВАЛОВ
НА КАРЬЕРАХ НЮРБИНСКОГО ГОКА**

А. Н. Акишев, И. Б. Бокий, О. В. Зотеев, В. Г. Золотин

*Институт “Якутнипроалмаз” АК “АЛРОСА”,
E-mail: AkishevAN@alrosa.ru, BokiyaB@alrosa.ru, zoteev.o@mail.ru, ZolotinVG@alrosa.ru,
ул. Ленина 39, г. Мирный 678175, Республика Саха (Якутия), Россия*

Проведены испытания, выполнены расчеты и оценка сдвиговых характеристик отвальной массы с учетом нескольких вариантов образования оползня. Представлены результаты исследований, позволяющие оптимизировать проектные параметры формирования внешних отвалов с получением значительного экономического эффекта.

Гранулометрический состав, насыпные несвязные грунты, физико-механические свойства, оползни, сдвиговые характеристики, предельная высота отвала

**PARAMETERS OF EXTERNAL DUMP FORMATION
AT OPEN PIT MINES OF NYURBINSKY MPP**

A. N. Akishev, I. B. Bokiya, O. V. Zoteev, and V. G. Zolotin

*Yakutniproalmaz Institute, PJSC ALROSA,
E-mail: AkishevAN@alrosa.ru, BokiyaB@alrosa.ru, zoteev.o@mail.ru, ZolotinVG@alrosa.ru,
ul. Lenin 39, Mirny 67817, Republic of Sakha (Yakutia), Russia*

Tests and calculations were carried out, shear characteristics of the dump mass were estimated, taking into account several variants of landslide formation. The research results allowing to optimize the design parameters of external dump formation with a significant economic benefit are presented.

Grain-size composition, filled loose soils, physical and mechanical properties, landslides, shear characteristics, maximum dump height

Ужесточение экологических требований по размещению отходов горных производств приводит к образованию дефицита площадей под отвалообразование. Одним из путей решения этой проблемы является изменение емкости существующих отвальных массивов с помощью увеличения высоты их формирования. Создание высоких горнотехнических сооружений предопределяет постановку различных инженерно-геологических и геомеханических научно-практических задач, без решения которых обеспечить безопасность и технико-экономическую эффективность отвалообразования не представляется возможным. Оценке устойчивости отвалов и инженерно-геологическому изучению техногенных массивов посвящены работы Г. Л. Фисенко, В. А. Бабелло, С. П. Бахаевой, А. М. Гальперина, Р. Э. Дашко, А. В. Жабко, В. Г. Зотеева, О. В. Зотеева, И. П. Иванова, Ю. Н. Кириченко, А. В. Киянца, Ю. И. Кутепова, Н. А. Кутеповой, В. В. Мосейкина, С. И. Протасова, Е. В. Сергиной, В. В. Ческидова, П. С. Шпакова и др.

Согласно [1] предельно допустимая высота яруса отвала определяется расчетом. Для обоснований устойчивости высоких одноярусных отвалов (выше 70 м для карьеров АК “АЛРОСА”), потребовалось дополнительное изучение прочностных (сдвиговых) характеристик отвальной массы. В связи с этим проведена работа по повышению эффективности формирования отвалов на

действующих карьерах Нюрбинского ГОКа, в которой выполнен анализ параметров существующих отвалов (высота отвалов и ярусов, генеральных углов отвалов, строения и наклона их оснований), изучен гранулометрический и петрографический состав отвальной массы на различных отметках ярусов, обоснована допустимая высота одноярусных отвалов.

Оценка сдвиговых характеристик отвальной массы. Максимальные параметры устойчивых отвалов устанавливаются исходя из геомеханических расчетов и уточняются на всех стадиях освоения месторождения с учетом получения новых сведений о составе и прочностных свойствах отвальной смеси и основания отвалов. При формировании отвала, отсыпаемого на наклонную поверхность, происходит разделение горной породы по крупности (сегрегация). В экспериментальных методах изучения сегрегации для оценки гранулометрического состава насыпного откоса в большинстве случаев применяется фотопланиметрия.

Как правило, для определения свойств крупнообломочных грунтов используются месторождения-аналоги или результаты испытаний грунтов аналогичного состава. Результаты многочисленных исследований [2–5] показывают, что основными факторами, отражающими прочностные и деформационные характеристики несвязных грунтов, являются прочность и форма слагающих их обломков, а также пористость и гранулометрический состав грунта.

Сдвиговая прочность несвязных грунтов традиционно выражается двумя параметрами: сцеплением C и углом внутреннего трения φ , при расчетах устойчивости используется прямолинейный паспорт прочности пород. Однако более точным будет расчет сдвиговой прочности несвязных грунтов, в которых отсутствует сцепление, с применением криволинейного паспорта прочности, т. е. секущим углом внутреннего трения φ

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 — соответственно максимальное и минимальное сжимающие напряжения, вызывающие разрушение сдвигом.

Для перехода к прямолинейному паспорту прочности достаточно найти величины секущего угла трения и сопротивления сдвигу в диапазоне предполагаемых нагрузок и линеаризовать полученные результаты расчетов. В работе [5] для оценки величины секущего угла внутреннего трения на основе обработки результатов прямых сдвиговых испытаний получено следующее регрессионное уравнение:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}}^{\text{в}} = K \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^b, \quad (2)$$

где коэффициенты:

$$K = 0.6694 n_0^{-0.4306} d_{50}^{0.0139} \left(\frac{R_{\text{сж}}}{R_0} \right)^{0.0636},$$

$$b = -0.6422 n_0^{-0.6185} d_{50}^{0.1263},$$

n_0 — начальная пористость в долях единиц, рассчитывается из соотношения [4]:

$$n_0 = 0.5415 \eta^{-0.1129}, \quad (3)$$

здесь d_{50} — средний размер обломков отвальной массы, мм; $\eta = d_{60}/d_{10}$ — коэффициент неоднородности отвальной массы; d_{60} и d_{10} — контролирующие диаметры на кумулятивной кривой гранулометрического состава, соответствующие 60 и 10 % накопленной частоты; $R_{\text{сж}}$ — прочность обломков на одноосное сжатие, МПа; $R_0 = 1000$ МПа — нормирующая величина.

Гранулометрический состав отвальной массы (рис. 1), определенный с помощью метода фотопланиметрии, позволяет оценить размер среднего обломка $d_{50} = 318$ мм, а коэффициент неоднородности — $\eta = 22.76$, начальная пористость — $n_0 = 0.38$. Средняя прочность отвальных пород в куске по результатам испытаний составляет 50 МПа, тогда коэффициенты регрессионного уравнения (2): $K = 0.909$; $b = -0.159$. Фактический угол естественного откоса отвалов на Нюрбинском ГОКе составляет 34° при проектном значении 37° .

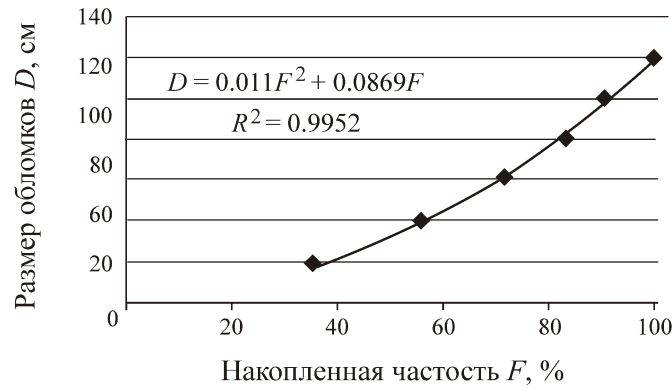


Рис. 1. Гранулометрический состав отвальной массы

Максимальное давление вблизи нижней бровки отвала находится из соотношения

$$\sigma_1 = \gamma H \sin^2 \alpha, \quad (4)$$

где γH — вертикальное давление на нижней подошве отвала, мН; $\alpha = 34^\circ$ — угол откоса отвала (яруса).

Желаемая высота отвала составляет 120 м, поэтому необходимо рассчитать величину секущего угла трения для высот 60, 80, 100 и 120 м. При средней плотности куска 2.75 т/м³ и пористости 0.32 (с учетом их уплотнения) вертикальное давление, создаваемое отвалом на основание для заданных высот составит 1.12, 1.50, 1.87 и 2.24 МПа, значения углов секущего угла трения — соответственно 41.8, 40.4, 39.5 и 38.6° . Переход к традиционной форме оценки сдвиговых характеристик в виде линейного паспорта прочности дает значение сцепления 0.21 МПа при угле внутреннего трения 35.2° .

Для того, чтобы снизить ошибку экстраполяции дополнительно были обработаны только результаты испытаний крупнозернистых грунтов, которые показывают (рис. 2), что увеличение крупности даже без учета прочности обломков принципиально не поменяло картину, значения секущего угла трения для заданных давлений составили 41.4, 39.8, 38.6 и 37.7° , сцепления при линейаризации результатов расчетов — 0.25 МПа, а угол внутреннего трения — 33.6° .

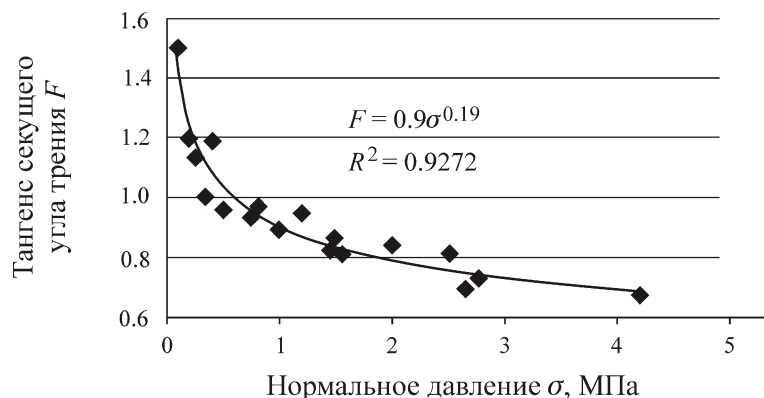


Рис. 2. Результаты испытаний крупнозернистых грунтов на сдвиг

Косвенным подтверждением полученных оценок сдвиговых характеристик отвальной массы является [7 приложение 18], в соответствии с которым сцепление отвальной массы равно 0.025–0.045 МПа (на порядок меньше, установленных оценок), а угол внутреннего трения также равен 35°. Расхождение в оценках обусловлено тем, что характеристики отвальных масс на Оленегоском ГОК определены в ходе решения обратной задачи по отвалу, не потерявшему устойчивость, т. е. являются минимально возможными. Верхняя часть основания отвала сложена мерзлыми суглинками, супесями и песками с отдельными выходами скальных пород на дневную поверхность. Мощность рыхлых отложений составляет до 7 м.

В соответствии с [2, приложение Б] прочностные характеристики дисперсных пород следующие: $C = 0.047$ МПа, $\varphi = 24^\circ$. Поскольку отвал отсыпается на промерзшее основание (к настоящему времени отсыпан предотвал, предотвращающий растепление массива), прочностные характеристики грунтов основания должны быть увеличены в соответствии с [7, табл. 1, приложение 20] — $C = 0.47$ МПа, $\varphi = 26.8^\circ$.

Расчет предельной высоты отвала. Выполненная оценка сдвиговых характеристик отвальной массы показывает, что образование надподошвенного оползня, полностью реализующегося в теле отвала, который отсыпан на горизонтальном основании, маловероятно из-за высокого значения как секущего угла трения (не ниже 37.7°), так и угла внутреннего трения (33.6–35°) и фактического низкого угла откоса отвала (34°). При оценке предельной высоты отвала рассматривалось три варианта образования оползня: надподошвенный (с учетом введения нормативного коэффициента запаса устойчивости отвала $k_{\text{зап}}$), по контакту с породами основания и оползня с выдавливанием слабого слоя основания.

Отвал отсыпается на слабохолмистой местности с перепадом отметок порядка 10 м, угол наклона основания при этом не превышает 1°, нормативное значение $k_{\text{зап}} = 1.2$. Результаты расчетов показывают, что при отсыпке мерзлого грунта на мерзлое основание наименьший коэффициент запаса устойчивости будет при использовании в вычислениях секущего угла трения по усеченной выборке, причем $k_{\text{зап}} = 1.38$, что выше нормативного значения. Для сдвиговых характеристик, рекомендованных в [3], $k_{\text{зап}} = 1.43$, для характеристик, полученных по полной выборке испытаний, $k_{\text{зап}} = 2.42$. Реализация оползня с выдавливанием мерзлых грунтов основания маловероятна ($k_{\text{зап}} = 4.9$). При любом сочетании характеристик устойчивость отвала при его высоте 110 м и угле откоса 34° гарантирована при условии обеспечения отрицательных температур грунтов основания.

Рекомендации по параметрам формирования внешних отвалов на карьерах Нюрбинского ГОК. Проектом обработки карьера “Ботубинский” [8] предусматривается складирование пустых пород к юго-востоку от карьера, расширяя и увеличивая по высоте существующий отвал пустых пород, расположенный на расстоянии 380 м от конечного контура карьера. Суммарная емкость внешнего отвала пустых пород на конец обработки месторождения составит 181/6 млн м³ с учетом коэффициента остаточного разрыхления 1/2 (включая объем существующего отвала и за вычетом селективно складированных пород). Средняя высота вскрышного отвала взята равной 82 м (с небольшим увеличением на 2–4 м в пониженных участках рельефа). Отвалы размещаются в один-два яруса высотой до 45 м с отсыпкой в зимнее время предотвала высотой 10–15 м, предназначенного для сохранения вечномерзлого состояния подотвальных грунтов. Ширина межъярусной бермы принята из условия возможности организации двухполосного проезда большегрузных самосвалов и составляет 45 м.

Определение оптимальных параметров автомобильно-бульдозерных отвалов является сложным процессом, связанным с необходимостью комплексного учета большого количества технологических, параметрических и экономических факторов. В соответствии с Нормами технологического проектирования расположение отвалов относительно карьера, их количество и пара-

метры, а также порядок формирования должны находиться на основании технико-экономических расчетов с целью обеспечения минимальных затрат на транспортирование пород и природоохранные мероприятия.

В общих затратах на отвалообразование 92–97 % составляют затраты на транспорт, поэтому за критерий оценки берут, как правило, минимум транспортных расходов. С увеличением высоты отвалов (особенно одноярусных) резко снижается расстояние транспортирования породы по поверхности ярусов, но несколько возрастает расстояние подъема породы на отвал, однако в итоге средневзвешенно расстояние по отвалу, включая подъем на отвал и транспортирование по поверхности отвала, снизится на 10–15%, что уменьшает транспортные расходы.

Предлагается отвал вскрышных пород формировать одним ярусом с увеличением высоты отвала на 12 м. При этом площадь основания отвала сокращается до 220.7 Га с той же геометрической емкостью отвала 181.6 млн м³. Соответственно резко понижаются размеры отвала в плане, что приводит к уменьшению плеча откатки горной массы. За счет роста высоты отвала на 20 м длина подъема на отвал увеличивается на 0.25 км, вместе с тем длина транспортирования по поверхности отвала уменьшается на 750 м, а общая длина транспортирования по отвалу — на 0.5 км.

Данный эффект будет больше, если учесть отсыпку предотвала, формирование которого осуществляется при большом расстоянии транспортирования (объем предотвала составляет 18 % от общей емкости отвала при средней высоте отвала 82 м и 15 % при средней высоте отвала 94 м). По восточной и юго-восточной части высота отвала — 106 м.

Если за начало внедрения мероприятия принять 2020 г., то по техническому проекту (базовому варианту) необходимо складировать до конца отработки месторождения 93.8 млн м³ вскрышных пород (223 244 тыс. т) со средним расстоянием транспортирования 5.1 км при суммарном грузообороте 1 145 312 тыс. т·км. В предлагаемом варианте при том же объеме складирования вскрыши 93.8 млн м³ (223 244 тыс. т) при среднем расстоянии транспортирования 4.6 км объем транспортной работы составит 1 026 922 тыс. т·км, т. е. сокращение составит 118 390 тыс. т·км. Разработанное научно-техническое мероприятие внедрено в Нюрбинском горно-обогательном комбинате (акт внедрения 13-19 от 12.2019 г) на карьере “Ботубинский”. Сравнительный объем транспортной работы при проектных и рекомендуемых параметрах отвала приведен в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Объем транспортной работы при проектных и рекомендуемых параметрах отвала

Показатель	Год								
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Вскрыша на отвал, автосамосвал массой 91 т									
Объем перевозок, тыс. м ³	8500	9500	9500	9500	9000	9000	7000	7000	6900
Объем перевозок, тыс. т	$\frac{19089.6}{18414}$	$\frac{22430.5}{20975}$	$\frac{23100}{23085}$	$\frac{22849.9}{22847.5}$	$\frac{22450.3}{22455}$	$\frac{23400.1}{23400}$	$\frac{18200.1}{18200}$	$\frac{18200.1}{18200}$	$\frac{17939.9}{17940}$
Грузооборот, тыс. т·км	66215.6	$\frac{74920}{73412.5}$	$\frac{87723}{83106}$	$\frac{83720}{75396.7}$	$\frac{85438}{78592.5}$	$\frac{90207}{81900}$	$\frac{86000}{79352}$	$\frac{96393}{91000}$	$\frac{96875.5}{93288}$
Среднее расстояние, км	3.6	$\frac{3.6}{3.5}$	$\frac{3.8}{3.6}$	$\frac{3.7}{3.3}$	$\frac{3.8}{3.5}$	$\frac{3.9}{3.5}$	$\frac{4.7}{4.4}$	$\frac{5.3}{5}$	$\frac{5.4}{5.2}$
Списочное количество а/с	18.9	$\frac{21.4}{21}$	$\frac{25.1}{23.7}$	$\frac{23.9}{21.5}$	$\frac{24.4}{22.5}$	$\frac{25.8}{23.4}$	$\frac{24.6}{22.7}$	$\frac{27.5}{26}$	$\frac{27.7}{26.7}$
Шины, шт.	81	$\frac{91}{90}$	$\frac{107}{101}$	$\frac{102}{92}$	$\frac{104}{96}$	$\frac{110}{100}$	$\frac{105}{97}$	$\frac{118}{111}$	$\frac{121}{114}$

Примечание. В числителе указаны значения при проектных параметрах, в знаменателе — при рекомендуемых.

Эффект от внедрения мероприятия определяется снижением объема транспортной работы за счет новых параметров отвала вскрышных пород. Расчет ожидаемого экономического эффекта рассчитан по формуле:

$$\mathcal{E} = (Z_1 - Z_2) \cdot (1 - k_6),$$

где Z_1, Z_2 — затраты по базовому варианту и варианту новой техники, руб.; k_6 — коэффициент, учитывающий отчисления в бюджет (налог на прибыль).

Результаты расчета сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Ожидаемый экономический эффект от внедрения мероприятия

Номер п/п	Наименование показателя	Базовый вариант	Вариант новой техники
1	Объем складирования вскрыши, тыс. м ³	93800	223244
2	Расстояние транспортирования вскрыши, км	5.1	4.6
3	Грузооборот, тыс. ткм	1 145 320	1 026 922
4	Снижение грузооборота, тыс. ткм	—	118 390
5	Себестоимость 1 ткм (условно-переменная часть), руб./ткм	12.36	12.36
Расчетные данные			
1	Затраты на транспортировку вскрыши, тыс. руб.	14 156 155.2	12 692 755.9
	Всего затрат, тыс. руб.	14 156 155.2	12 692 755.9
	Балансовая прибыль, тыс. руб.	—	1 463 399.3
	Отчисление в бюджет (налог на прибыль 20 %), тыс. руб.	—	292 679.8
	Экономический эффект, тыс. руб.	—	1 170 719.5

ВЫВОДЫ

Обоснование параметров формирования внешних отвалов на карьерах Нюрбинского ГОКа позволило уменьшить плечо откатки, снизить затраты на транспортировку вскрышных пород и повысить эффективность работы предприятия. Внедрение новых параметров одноярусных отвалов при отработке карьера “Нюрбинский” до глубины 570 м дает возможность получить экономический эффект в размере около 350 млн руб., при отработке карьера “Майский” до глубины 400 м — 500 млн руб. Суммарный экономический эффект от внедрения предлагаемых параметров оценивается в 2020 млн руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps”, Approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of November 13, 2020, no. 439. [Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов”. – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 г. № 439.]**
- 2. SP 22.13330.2011. Foundations of buildings and structures, Moscow, 2011. [СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. — М., 2011.]**
- 3. Moiseev S. N. and Moiseev I. S. Stone-earth dams. Fundamentals of design and construction, Moscow, Energy, 1977, 280 pp. [Моисеев С. Н., Моисеев И. С. Каменно-земляные плотины. Основы проектирования и строительства. — М.: Энергия, 1977. — 280 с.]**

4. **Rozanov N. N.** On the purpose of the calculated parameters of the shear resistance of coarse-grained soils, Energy construction, 1978, no. 2, pp. 67–70. [**Розанов Н. Н.** О назначении расчетных параметров сопротивления сдвигу крупнообломочных грунтов // Энергетическое строительство. — 1978. — № 2. — С. 67–70.]
5. **Zoteev V. G., Zoteev O. V. and Nizamutdinova E. O.** Evaluation of the physical and mechanical properties of non-cohesive soils used in the construction and reconstruction of earthen dams, according to their granulometric composition, Water management of Russia, Problems, technologies, management, 2006, no. 3, pp. 3–25. [**Зотеев В. Г., Зотеев О. В. Низамутдинова Е. О.** Оценка физико-механических свойств несвязных грунтов, используемых при строительстве и реконструкции земляных плотин, по их гранулометрическому составу // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. — 2006. — № 3. — С. 3–25.]
6. **Nichiporovich A. A. and Rasskazov L. N.** Resistance of large-block soils to shear, Hydrotechnical construction, 1969, no. 8, pp. 21–26. [**Ничипорович А. А., Рассказов Л. Н.** Сопротивление крупнообломочных грунтов сдвигу // Гидротехническое строительство. — 1969. — № 8. — С. 21–26.]
7. **Rules** for ensuring the stability of slopes at coal mines, St. Petersburg, VNIMI, 1998, 207 pp. [**Правила** обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. — СПб.: ВНИМИ. — 1998. — 207 с.]
8. **Technical project.** ALROSA-Nyurba diamond mining company, Tube “Botuobinskaya”, Working out of quarries up to otm. –330 m, Yakutniproalmaz, 2014. [**Технический проект.** Алмазодобывающее предприятие ОАО АЛРОСА-Нюрба. Трубка “Ботуобинская”. Отработка карьера до отм. –330 м. — Якутнипроалмаз. — 2014 г.]