

© Н.В. Несвитайло<sup>1</sup>, Ж.А. Педро<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, Украина

## СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ КОНЕЧНУЮ ГЛУБИНУ КАРЬЕРА

© N. Nesvitaylo<sup>1</sup>, G. Pedro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## SYSTEMATIZATION AND ANALYSIS OF FACTORS, DETERMINING EVENTUAL DEPTH OF QUARRY

**Цель.** Систематизировать и проанализировать основные факторы, влияющие на конечную глубину карьера.

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели в работе использован метод анализа основных факторов, влияющие на конечную глубину карьера, и, соответственно, границу перехода с открытых горных работ на подземные при комбинированной (последовательной) разработке крутопадающих месторождений по группам: геологические, технологические, технические, экономические и социальные.

**Результаты исследования.** Систематизированы факторы, определяющие конечную глубину карьера, а также выполнен их анализ с целью установления границ перехода с открытых горных работ на подземные при комбинированной (последовательной) разработке крутопадающих месторождений. Для выделения инженерно-геологических комплексов (ИГК) пород систематизированы все имеющиеся данные по зонам, глубине, литологии, плотности и сцеплению. Из анализа изменчивости сцепления, плотности и литологии по глубине, определены границы ИГК для даних зон. Представлены обобщенные данные по породам инженерно-геологических комплексов, прочностные свойства вмещающих и перекрывающих пород трубки «Катока» по сгруппированным комплексам и их статистические характеристики а также средние значения для слабых пород в зависимости от обводненности.

**Научная новизна.** Установлены закономерности изменения основных управляющих устойчивостью бортов карьера параметров: сцепления горных пород ( $C$ ), угла внутреннего трения ( $\varphi$ ), плотности ( $\rho$ ) и коэффициента структурного ослабления ( $\lambda$ ) от текущей глубины карьера  $H_{к.т.}$ , которые с ее увеличением возрастают (первые три), а коэффициент структурного ослабления массива ( $\lambda$ ) уменьшается. Так, с увеличением глубины карьера от 100 м до 400 м сила сцепления пород ( $C$ ) возрастает от 100 т/м<sup>2</sup> (1 МПа) до 1300 т/м<sup>2</sup> (13 МПа).

**Практическое значение.** Результаты исследований могут быть использованы для установления границ перехода с открытых горных работ на подземные при комбинированной (последовательной) разработке крутопадающих месторождений с учетом систематизации основных факторов, определяющих конечную глубину карьера.

**Ключевые слова:** открытая разработка, кимберлитовая трубка, конечные границы карьера, коэффициент вскрыши.

**Введение.** В теории и практике открытых горных работ одной из основных проблем, которая возникает уже на стадии проектирования, является проблема установления конечных границ карьеров, разрабатывающих крутопадающие месторождения. Характерной особенностью крутопадающих месторождений и в т. ч. штокообразных, простирающихся по падению пластов на большие глубины

(более 700-800 м) является применение комбинированной открыто-подземной (последовательной) их отработки [1, 2]. При такой разработке месторождений решение вопросов установления конечной глубины карьера неразрывно связано с определением целесообразности и эффективности перехода с открытых горных работ на подземные.

**Цель работы.** Систематизировать и проанализировать основные факторы, влияющие на конечную глубину карьера, и, соответственно, границу перехода на подземный способ разработки, по группам: геологические, технологические, технические, экономические и социальные (табл. 1).

**Изложение основного материала.** Геологические факторы определяют прежде всего технологическую целесообразность и экономическую эффективность разработки месторождения открытым, открыто-подземным или подземным способами. Основным интегрирующим параметром, характеризующим месторождение и его промышленное освоение, является средний коэффициент вскрыши, который может быть геологическим и промышленным. Средний промышленный коэффициент вскрыши ( $K_{cp}$ ) представляет собой соотношение объемов (масс) вскрышных пород и полезного ископаемого (балансовые запасы), подлежащих извлечению в расчетных контурах карьера. Важность установления величины  $K_{cp}$  объясняется тем, что путем сопоставления ее с величиной граничного коэффициента вскрыши ( $K_{cp}$ ) определяются конечные контуры карьера. Такое сопоставление ( $K_{cp} \leq K_{cp}$ ) является одним из шести основных известных принципов определения конечной глубины карьеров, разрабатывающих крутопадающие месторождения в т. ч. и штокообразные.

Таблица 1

Систематизация факторов, определяющих конечную глубину карьера

Группа	Виды
Геологические	Строение, параметры и характер залегания месторождения; содержание полезных компонентов; гидрогеологические условия; физико-механические свойства горных пород
Технологические	Режим горных работ; технологические схемы вскрытия глубоких горизонтов месторождения; системы разработки; схемы транспортирования горной массы; наличие перегрузочных пунктов на бортах карьера; способы заоткоски уступов при постановке их в предельное положение
Технические	Техническое обеспечение открытых и подземных работ средствами буровзрывной подготовки скальных пород, экскавации и транспорта, обеспечивающих максимально возможные, по условиям устойчивости, параметры бортов карьера
Экономические	Эксплуатационные затраты и капитальные вложения; комплексное использование минерального сырья; минимальные потери полезного ископаемого
Социальные	Возможность переноса жилых поселков, дорог, ЛЭП, русел рек; обеспечение трудовыми ресурсами; охрана окружающей среды

Такие геологические факторы как гидрогеологические условия месторождения, физико-механические свойства горных пород оказывают опосредованное влияние на величину  $K_{cp}$  через углы откосов нерабочих бортов. В геологическом отношении алмазоносные месторождения является сложноструктурными с широко развитыми тектоническими нарушениями. Так, например, для кимберлитовой трубки «Катока» (Республика Ангола) в зонах тектонических нарушений породы характеризуются высокой степенью трещиноватости (от 10 до 40 трещин на 1 м<sup>2</sup>). Кроме многочисленных разрывных тектонических нарушений на ряде участков развиты складчатые нарушения, особенно в слоистой толще вулканогенно-осадочных пород. Углы наклона слоев изменяются от 20° – 35° до 75° – 80°.

Перекрывающие трубку породы от глинистых, песчано-глинистых и до песчаных мощностью 5 – 55 м являются малопрочными, слабо сцементированными, небольшой структурной прочности, теряемой при замачивании.

Пески обводнены с отметок 980 – 975 м и поэтому суффозионно неустойчивы. При разгрузке из них воды происходит их оплывание, формируются сдвиги и оплывины, захватывающие вышележащие более устойчивые пески Калахари.

Перекрывающие породы, пески Калахари и межформационные пески, по общей характеристике основных представителей горных пород и основных показателей дренируемости и устойчивости классифицируются как четвертая группа, которую образуют слабые песчано-глинистые породы, характеризующиеся довольно высокой пористостью, малой водопроницаемостью (менее 1 м/сутки) и склонностью к оплыванию. Отличаясь слабой связанностью, на поверхности откосов эти породы переходят в условиях полного водонасыщения в текучее состояние и оплывают даже при довольно пологих углах откосов. Вследствие слабой проницаемости породы этой группы плохо поддаются обычным способам дренирования. Обводненные откосы, сложенные такими породами, наиболее неустойчивые. Довольно сложные в структурно-геологическом отношении и вмещающие породы трубки «Катока». Они характеризуются различной степенью выветрелости и дезинтеграции. Породы перемятые, углы падения по плоскостности и сланцеватости от 30° до 80°.

Выветрелые гнейсы скального массива сильнотрещиноватые и малопрочные. При разгрузке пород, в связи с углубкой карьера, в кимберлитах может произойти раскрытие трещин по которым произойдет переток воды из вышележащих водоносных горизонтов.

Сложноструктурное залегание кимберлитовой трубки «Катока» требует также рассмотрения, оценки и учета физико-механических свойств пород, влияющих на устойчивость массивов бортов (уступов) и определение их соответствующих параметров: высоты, углов откосов, ширины нерабочих площадок на бортах.

Строение перекрывающих и вмещающих пород по глубине залегания по данным всех имеющихся скважин приведено в табл. 2 и рис. 1,2, из которых сле-

дует, что залегание литологических типов пород по глубине существенно различно по периметру трубки и, для обеспечения надёжности геомеханической модели карьера, необходим учет свойств и залегания пород по всей области влияния карьера.

Таблица 2

Залегание пород по глубине по всем скважинам

№ п/п	Порода	Абсолютная отм., м		Мощность интервала, м
		макс.	мин.	
0	Поверхность	1020,2	951,0	69,2
1	Отложения формации Калахари	1020,1	959,0	61,1
2	МФП	1001,3	967,1	34,2
3	Гнейс-Кора выветривания	975,8	920,0	55,8
4	Гнейс-выветрелый мало прочный	974,5	926,6	47,9
5	Гнейс-относительно прочный	970,1	900,9	69,2
6	Элювий гнейса	967,6	913,2	54,4
7	Гнейс-Кора выветривания – Глинистая	966,0	920,0	46,0
8	Гнейс -мало прочный	965,6	902,6	63,0
9	Гнейс-Кора выветривания – Дресвяная	963,0	919,1	43,9
10	Гнейс-Кора выветривания – Рухляк	931,3	927,8	3,5
11	Гнейс -очень прочный	965,5	853,8	111,7

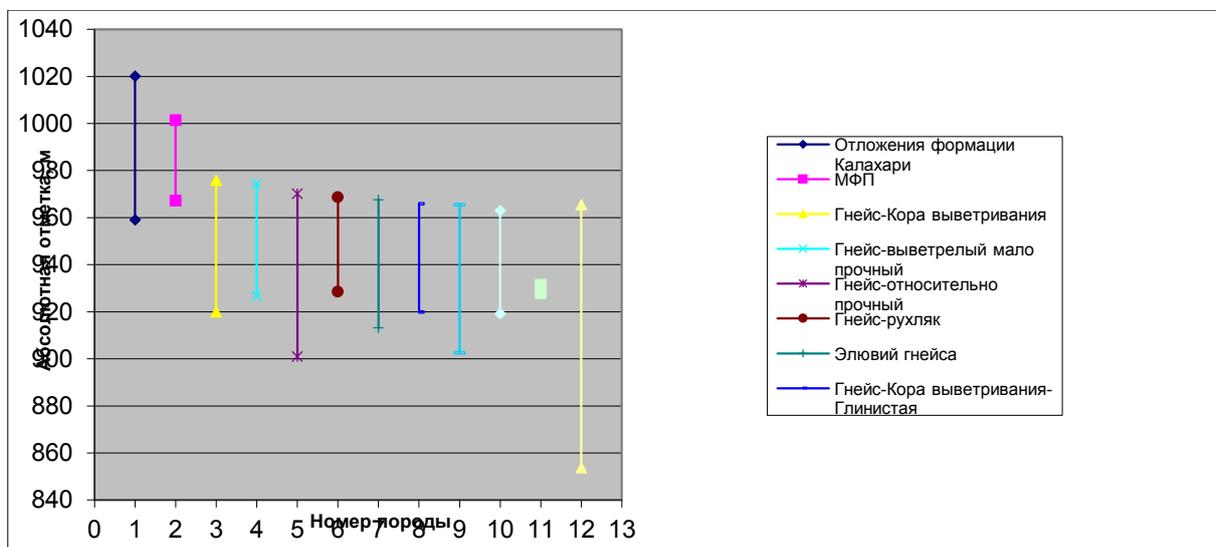


Рис. 1. Строение перекрывающих и вмещающих пород по глубине залегания

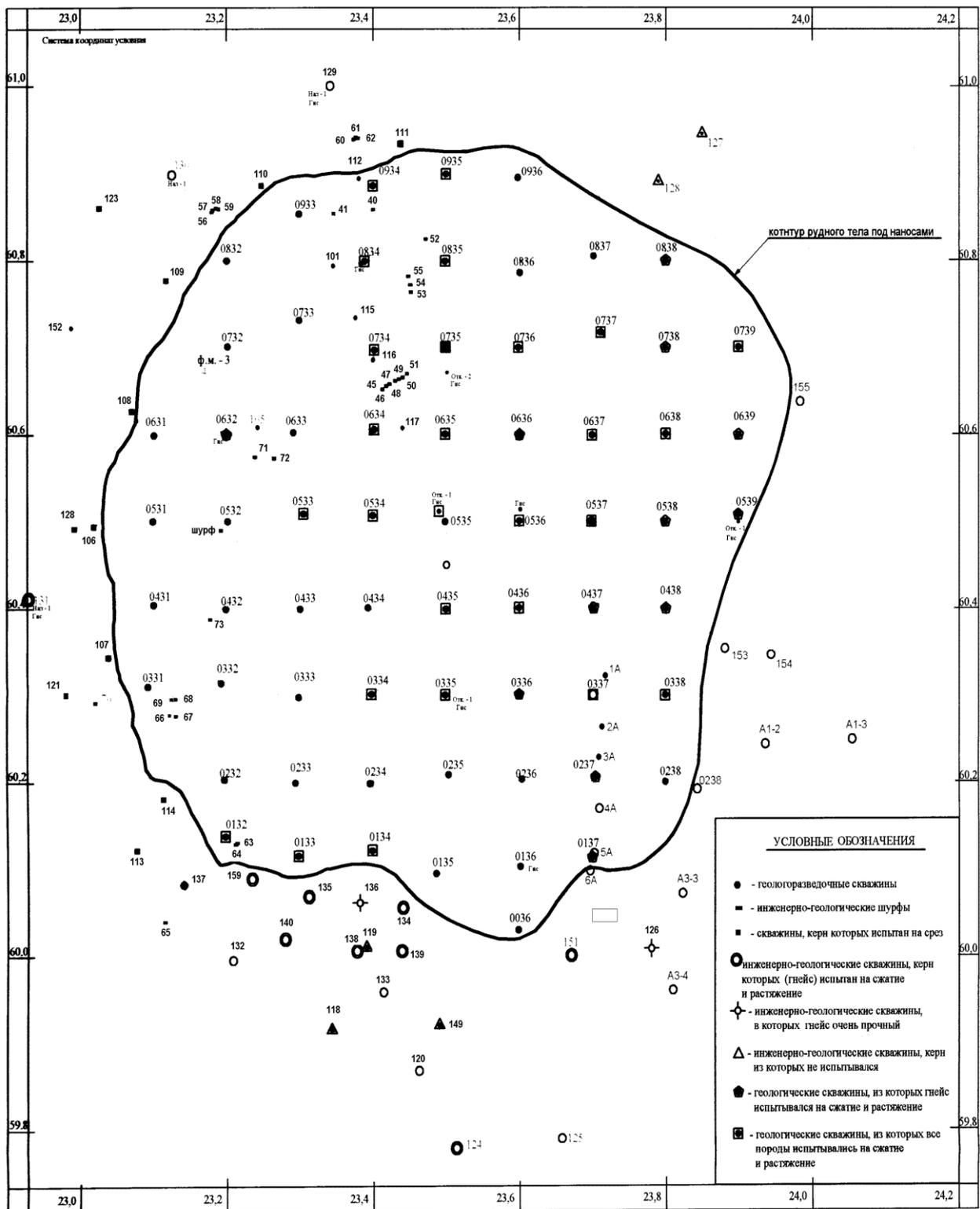


Рис. 2. План расположения инженерно – геологических и гидрогеологических выработок на трубке «Катока»

Для выделения инженерно-геологических комплексов (ИГК) пород были систематизированы все имеющиеся данные по зонам, глубине, литологии, плотности и сцеплению. Из анализа изменчивости сцепления, плотности и литологии по глубине, определены границы ИГК для заданных зон. Обобщены данные по

породам інженерно-геологічних комплексів, прочностні властивості вміщуючих і перекриваючих порід трубки «Катока» по сгрупіюваним комплексам і їх статистичні характеристики а також середні значення для слабких порід в залежності від обводненості згідно даним представлені в (табл. 3-4).

Таблиця 3

Обобщенные данные по породам инженерно-геологических комплексов

Зона	ИГК	Абсолют. отм. по подошве, м	Породы
С	1	981,7	Отложения формации Калахари
	2	975,5	МФП
	3	932,3	МФП, Гнейс - Кора выветривания, Гнейс - Кора выветривания - Глинистая, Гнейс - Кора выветривания - Дресвяная, Гнейс – рухляк
	4	926,6	Гнейс - Кора выветривания - Дресвяная, Гнейс - выветрелый мало прочный
	5	923,1	Гнейс - Кора выветривания - Дресвяная, Гнейс - мало прочный, Гнейс - относительно прочный
	6	919,1	Гнейс - Кора выветривания - Дресвяная, Гнейс - мало прочный
	7	908,7	Гнейс - относительно прочный, Гнейс - очень прочный
В	1	1001,6	Отложения формации Калахари
	2	970,1	Отложения формации Калахари, МФП, Гнейс - относительно прочный, МФП (глина)
	3	967,1	Элювий гнейса, Гнейс - рухляк, Гнейс - относительно прочный
Ю	1	989,8	Отложения формации Калахари, МФП
	2	969,3	Отложения формации Калахари, МФП, Гнейс - выветрелый мало прочный
	3	964,8	Гнейс - выветрелый мало прочный, Гнейс - мало прочный
	4	935	Гнейс - рухляк, Гнейс - выветрелый мало прочный, Гнейс - мало прочный, Гнейс - относительно прочный, Гнейс - очень прочный, Кимберлит с прослоями песчаника
З	1	941	Отложения формации Калахари, Элювий гнейса, Гнейс - Кора выветривания
	2	913,2	Элювий гнейса, Гнейс - Кора выветривания
	3	900,9	Гнейс - мало прочный, Гнейс - относительно прочный, Гнейс - очень прочный

Таблица 4

Средние значения объемного веса ( $\rho$ , т/м<sup>3</sup>), угла внутреннего трения ( $\varphi$ , °), сцепления в образце ( $C$ , т/м<sup>2</sup>) и коэффициента структурного ослабления  $\lambda$ ) для слабых пород в зависимости от обводненности

Наименование породы	Состояние									
	Нормальное					Обводнённое				
	w*	$\rho$	C	$\varphi$	$\lambda$	w	$\rho$	C	$\varphi$	$\lambda$
Песок Калахари	11,1	2,08	10,9	26,02	0,7	13,5	2,15	2,9	23,44	0,7
МФП	12,7	2,01	10,1	24,91	0,7	16,5	2,05	6,4	21,91	0,7
Элювий гнейса	26,7	2,09	7,2	21,92	0,58	34,7	2,12	6,3	17,41	0,58
Порфиновый кимберлит	34,5	1,64	11,3	16,6	0,47	51,1	1,79	6,9	5,05	0,47

По расчетным данным об изменении основных управляющих параметров  $C$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  (см.табл. 3) выполнен анализ их изменения с увеличением текущей глубины карьера  $H_{к.т.}$  и построены графические зависимости  $C$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  от  $H_{к.т.}$  (рис.3)

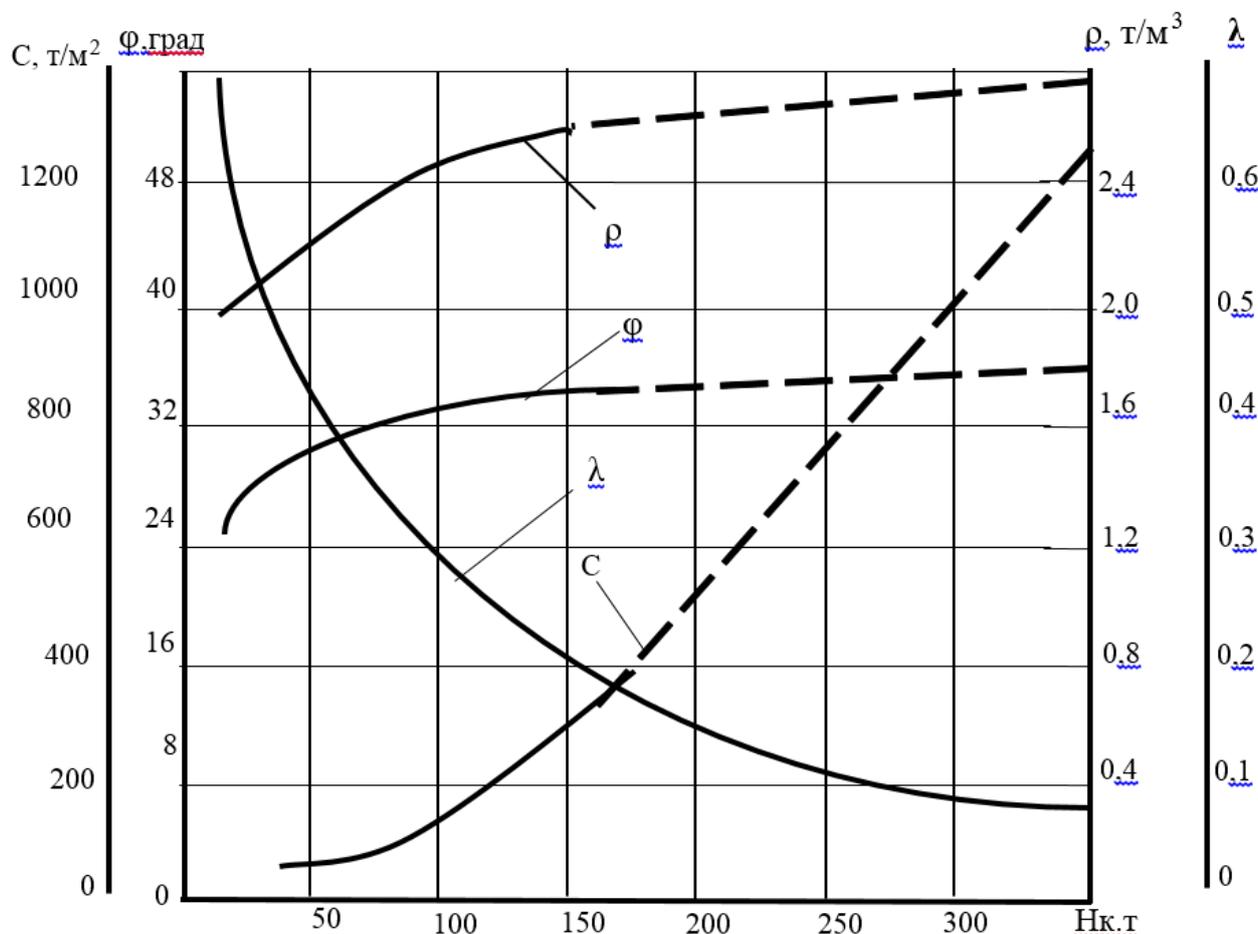


Рис. 3. График зависимости сцепления пород ( $C$ ), угла внутреннего трения ( $\varphi$ ), плотности ( $\rho$ ) и коэффициента структурного ослабления ( $\lambda$ ) от текущей глубины карьера  $H_{к.т.}$  Примечание: штриховой линией показан прогноз изменения исследуемых параметров

Как видно из приведенных графиков значения всех указанных параметров с увеличением текущей глубины карьера возрастают и в большей степени величина сцепления пород  $C$ . С увеличением глубины карьера от 100 м до 400 м сила сцепления пород возрастает от 100 т/м<sup>2</sup> (1МПа) до 1300 т/м<sup>2</sup> (13МПа).

Следует отметить, что установленные закономерности изменения  $C$ ,  $\varphi$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  от  $H_{к.т.}$  наиболее достоверны до глубины карьера 150-200 м. При дальнейшем увеличении  $H_{к.т.}$  они имеют прогнозный характер, поскольку нет на данный момент геологической информации. Кроме того эти закономерности характеризуют общий характер их изменения с глубиной. В расчетах устойчивости массивов бортов карьеров следует учитывать зональное их изменение как по периметру карьерного поля т.е. по горизонтали: север (С), восток (В), юг (Ю), и запад (З), так и по вертикали – соответственно слоями инженерно-геологических комплексов (ИГК) пород, слагающих нерабочие борта карьеров.

Из графика зависимости коэффициента структурного ослабления пород в массиве бортов карьера ( $\lambda$ ) от текущей глубины карьера  $H_{к.т.}$  (рис. 3) видно, что величина  $\lambda$  с увеличением  $H_{к.т.}$  уменьшается по экспоненциальной зависимости. Это объясняется тем, что с увеличением глубины карьера трещиноватость пород уменьшается, а крепость их и плотность увеличиваются.

Технологические факторы позволяют оценить эффективность намечаемых к применению технологических схем вскрытия и системы разработки, их влияние на конструкцию и угол откоса нерабочих бортов карьера, возможность поддержания производственной мощности в переходный период, условия безопасного производства горных работ.

Технические факторы определяют возможность технического перевооружения технологии открытых и подземных работ на перспективу, т.е. на момент окончания переходного периода, позволяющего обеспечить добычу полезного ископаемого в заданных объемах.

Экономические факторы являются обобщающими показателями, учитывающими влияние остальных групп факторов, в том числе и социальных. Основным показателем, обобщающим влияние экономических факторов на конечную глубину карьера, является себестоимость добычи полезного ископаемого, которая в конечном итоге включает и затраты на вскрышные работы при открытом способе разработки. На большинстве современных глубоких карьерах доля затрат на вскрышные работы составляет более 50-60% в себестоимости полезного ископаемого. С развитием техники и технологии открытых горных работ, а также с увеличением глубины карьеров объемы вскрыши увеличиваются и их доля затрат будет играть все более заметную роль в общей себестоимости полезного ископаемого.

Поэтому основным критерием эффективности открытых работ в процессе проектирования, по общему мнению, является граничный коэффициент вскрыши –  $K_{зр}$  [3].

В связи с этим главное внимание при установлении конечных контуров карьеров уделяется совершенствованию методов определения величины  $K_{зр}$ . Следует отметить, что при определении оптимальной глубины карьера ( $H_k$ ) наряду с  $K_{зр}$

необходимо учитывать и влияние угла откоса нерабочих бортов карьера ( $\beta$ ). Как  $K_{ep}$ , так и  $\beta$  изменяются с увеличением глубины карьера, а именно – уменьшаются, что и следует учитывать.

Комплексное использование вскрышных пород позволяет существенно повысить эффективность открытых горных работ. Однако экономия затрат не должна компенсироваться увеличением глубины карьера, поскольку это противоречит достижению максимальной эффективности последовательной открыто-подземной разработки [4].

При определении конечной глубины карьера, разрабатывающего штокообразное кимберлитовое месторождение «Катока», очень важным является также учет возможных потерь полезного ископаемого, имеющего высокую стоимость.

**Выводы.** Систематизированы факторы, определяющие конечную глубину карьера, а также выполнен их анализ с целью установления границ перехода с открытых горных работ на подземные при комбинированной (последовательной) разработке крутопадающих месторождений. Установлены закономерности изменения основных управляющих устойчивостью бортов параметров ( $C$ ;  $\varphi$ ;  $\rho$ ;  $\lambda$ ) от текущей глубины карьера ( $H_{к.т}$ ), которые с ее увеличением возрастают (первые три), а коэффициент структурного ослабления массива ( $\lambda$ ) уменьшается. Так, с увеличением глубины карьера от 100 м до 400 м сила сцепления пород ( $C$ ) возрастает от 100 т/м<sup>2</sup> (1 МПа) до 1300 т/м<sup>2</sup> (13 МПа).

#### Перечень ссылок

1. Шнайдер, М.Ф., & Вороненко, В.К. (1985). *Совмещение подземных и открытых разработок рудных месторождений*. Москва: Недра.
2. Черных, А.Д., Калишевский, И.А., Маевский, А.М., & Гордин, Д.В. (1993). *Параметры комплексной разработки месторождений*. Днепропетровск: Сеч.
3. Арсентьев, А.И., & Полищук, А.К. (1967). *Развитие методов определения границ карьеров*. Ленинград: Наука.
4. Маевский, А.М. (1991). *Переход с открытых горных работ на подземные*. Учебное пособие. Киев: УМК ВО.

#### АНОТАЦІЯ

**Мета.** Систематизувати і проаналізувати основні чинники, що впливають на кінцеву глибину кар'єру.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети в роботі використаний метод аналізу основних чинників, що впливають на кінцеву глибину кар'єру, і, відповідно, межі переходу з відкритих гірничих робіт на підземні при комбінованій (послідовній) розробці крутоспадних родовищ по групах: геологічні, технологічні, технічні, економічні і соціальні.

**Результати дослідження.** Систематизовані чинники, що визначають кінцеву глибину кар'єру, а також виконаний їх аналіз з метою встановлення меж переходу з відкритих гірничих робіт на підземні при комбінованій (послідовною) розробці крутопадаючих родовищ. Для виділення інженерно-геологічних комплексів (ІГК) порід систематизовані всі дані що маютьяся по зонах, глибині, літології, щільності і зчепленню. Із аналізу змін зчеплення, щільності і літології по глибині, визначені межі ІГК для даних зон. Представлені узагальнені дані по породах інженерно-геологічних комплексів, міцнісні властивості вмещаючих і перекриваючих порід

трубки «Катока» по згрупованих комплексах і їх статистичні характеристики а також середні значення для слабких порід залежно від обводнення.

**Наукова новизна.** Встановлені закономірності зміни основних керуючих стійкістю бортів кар'єру параметрів: зчеплення гірських порід порід ( $C$ ), кута внутрішнього тертя ( $\varphi$ ), щільності ( $\rho$ ) і коефіцієнта структурного ослабіння ( $\lambda$ ) від поточної глибини кар'єру Нк.т, які з її збільшенням зростають (перші три), а коефіцієнт структурного ослабіння масиву ( $\lambda$ ) зменшується. Так, із збільшенням глибини кар'єру від 100 м до 400 м сила зчеплення порід ( $C$ ) зростає від  $100 \text{ т/м}^2$  (1 МПа) до  $1300 \text{ т/м}^2$  (13 МПа).

**Практичне значення.** Результати досліджень можуть бути використані для встановлення меж переходу з відкритих гірничих робіт на підземні при комбінованій (послідовній) розробці крутоспадних родовищ з врахуванням систематизації основних чинників, що визначають кінцеву глибину кар'єру.

**Ключові слова:** *вілкрита розробка, кімберлитовая трубка, кінцеві межі кар'єру, коефіцієнт розкриву.*

#### ABSTRACT

**Purpose.** To systematize and analyze the main factors affecting the final depth of the quarry.

**Research methods.** To achieve this purpose the study used the method of analysis the main factors affecting the final depth of the quarry, and, accordingly, the boundary of transition from opencast mining to underground in combined (consecutive) development of steep deposits for groups: geological, technological, technical, economic and social.

**The results of the study.** Systematized the factors that determine the final depth of the quarry, as well as performed their analysis with the purpose of establishing the boundaries of transition from opencast mining to underground in combined (consecutive) development of steep deposits. To highlight the engineering-geological complexes (IGK) rocks systematized all the available data location, depth, lithology, density, and grip. From the analysis of the variability of adhesion, density and lithology at depth the limits of the IGK for the difference zones. Summarized data on the species of the engineering-geological complexes, the strength properties of the enclosing and overlying rocks pipe "Catoca" grouped in complexes and their statistical characteristics as well as average values for weak rocks depending on the water content.

**Scientific novelty.** The regularities of changes in the basic governing pitwall stability parameters: clutch rocks ( $C$ ), angle of internal friction ( $\varphi$ ), density ( $\rho$ ) and the coefficient of structural weakening ( $\lambda$ ) from the current open pit depth Нк.т, which increase increase (the first three), and the coefficient of structural weakening of the array ( $\lambda$ ) decreases. So, with increasing open pit depth from 100 m to 400 m, the adhesive force of the rocks ( $C$ ) increases from  $100 \text{ т/м}^2$  (1 МПа) to  $1300 \text{ т/м}^2$  (13 МПа).

**Practical value.** The research results can be used to delineate the transition from surface mining to underground in combined (consecutive) development of steep deposits with consideration of systematisation of the main factors determining the final depth Kariera.

**Keywords:** open development, kimberlite pipe, the end of border's career, the Stripping ratio.