

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТА КАРЬЕРА ПРИ ПЛОСКОМ И ОБЪЕМНОМ ВАРИАНТАХ РАСЧЕТА

А.С. Калюжный

Горный институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия, e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

Аннотация: Представлены способы оценки устойчивости борта карьера с использованием компьютерного программного комплекса Slide3, SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope) по методу Morgenstern-Price и с применением «Методических указаний... ВНИМИ...». В объемной постановке по методу Morgenstern-Price выделяют две зоны с наименьшими значениями коэффициентов запаса устойчивости (КЗУ) со стороны северо-западного (КЗУ = 1,6) и северо-восточного участков борта карьера (КЗУ = 1,3). Значения коэффициента запаса устойчивости для различных участков борта карьера с учетом влияния структурных неоднородностей составили от 1,3 до 2,6. Установлено, что при оценке устойчивости в объемной (3D) постановке в случае вогнутого по простиранию поверхности контура участка борта карьера коэффициент запаса устойчивости выше, чем в плоской постановке. Если участок борта карьера по простиранию не имеет значительной вогнутой или выпуклой в плане формы, то результаты оценки устойчивости практически не отличаются как в объемной, так и в плоской постановке. Подтверждено, что при решении плоских задач в программных комплексах методом Morgenstern-Price полученные значения коэффициентов запаса устойчивости не противоречат расчетным значениям, полученным по «Методическим указаниям...ВНИМИ...».

Ключевые слова: карьер, борт, откос, Арктическая зона РФ, оценка устойчивости, коэффициент запаса устойчивости, поверхность ослабления, Morgenstern-Price, SVSlope, Slide3.

Для цитирования: Калюжный А. С. Анализ результатов оценки устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 123–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_123.

Analysis of 2D and 3D estimates of pit wall stability

A.S. Kalyuzhny

Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru

Abstract: The article describes the pit wall stability estimation by the Morgenstern-Price method in software environment Slide3, SVOFFICE 2009 (package SVSlope) and using VNIIMI's Guidelines. In 3D Morgenstern-Price evaluation, there are two zones with the least safety factors: in the northwest (SF = 1.6) and in the northeast (SF = 1.3). The safety factor evaluated in different sites of the pit wall with regard to structural inhomogeneity ranges between 1.3 to 2.6. The estimates of the safety factor in 3D formulation are higher than in 2D formulation when the

pit wall is incurved along the strike. Without incurvity or cambering of the pit wall along the strike, the 2D and 3D estimates of the pit wall stability are the same. The values obtained in 2D solutions by the Morgenstern–Price method and software packages agree with the calculations by VNIMI’s Guidelines.

Key words: open pit mine, pit wall, slope, Russian Arctic zone, stability estimation, safety factor, weakened surface, Morgenstern–Price.

For citation: Kalyuzhny A. S. Analysis of 2D and 3D estimates of pit wall stability. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):123-133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_123.

Введение

Для безопасного ведения открытых горных работ одним из необходимых условий является обеспечение устойчивого состояния борта карьера. В настоящее время даже в процессе проектирования новых карьеров глубина их превышает 500 м, а глубина действующих уже достигает отметок 800 м и более [1, 2]. Увеличение проектной глубины карьеров связано с тем, что бортовое содержание полезного компонента при больших глубинах изменяется в меньшую сторону, а без увеличения углов откосов борта добиться рентабельности на таких месторождениях очень сложно. Именно поэтому проектировщикам для оценки эффективности необходимо знать устойчивые углы откосов для данных условий месторождения. Определение устойчивых углов влияет прежде всего на безопасность ведения горных работ. Ведь не секрет, что при одних и тех же условиях угол откоса с большей высотой будет менее устойчив, чем откос с меньшей высотой.

Большинство действующих нормативных документов на территории Российской Федерации [3, 4] были составлены в 60–90-е гг. прошлого столетия, когда средняя проектная глубина карьеров не превышала 250–300 м, при этом бортовое содержание было достаточно, что делало месторождения рентабельными даже при небольших углах наклона борта.

На сегодняшний день технологии ушли далеко вперед, и создание детальной цифровой модели отработки месторождения является неотъемлемой частью при оценке эффективности добычи. Наряду с этим развиваются и программные продукты для оценки устойчивости элементов открытой геотехнологии, способные включать в себя множество влияющих факторов. При этом цифровые технологии позволяют легко и быстро переносить контуры технологической модели карьера из одного программного продукта в другой, тем самым сводя к минимуму пространственные геометрические ошибки.

В данной работе в качестве объекта исследования принят карьер, обрабатывающий одно из месторождений Хибинской группы, находящееся в Арктической зоне РФ. При формировании борта карьера с пологими углами отработка данного месторождения будет являться не эффективной, поэтому возможность применения на данном объекте крутых углов откосов борта является важнейшей исследовательской задачей.

Методика

Для оценки устойчивости борта карьера данного месторождения использовались лицензионные программные комплексы Slide3 и SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope), которые представляют собой программы для решения задач по оценке устойчивости откосов, фор-

мируемых в различных условиях. Помимо компьютерных комплексов, расчет устойчивости выполнен по «Методическим указаниям... ВНИМИ...» [3]. Оценка устойчивости борта карьера во всех случаях выполнена методом предельного равновесия. Расчет устойчивости выполняется путем сравнения удерживающих и сдвигающих сил по критической поверхности скольжения, которая может представлять собой как круглоцилиндрическую, так и сложную поверхность. Для определения местоположения поверхности скольжения, находящейся в предельном равновесии откоса, в программах применяется метод последовательных приближений путем проведения многократных расчетов. По «Методическим указаниям... ВНИМИ...» расчет выполняется в соответствии с одной из предложенных схем.

КЗУ может определяться в том числе и с учетом внешних нагрузок (сосредоточенные, распределенные силы), анкеров (преднапряжение и сцепление по корню), сейсмичности, грунтовых вод, а также с учетом сложного геологического строения скального и грунтового массива: непараллельное расположение слоев, включения в форме линз, выход

геологических слоев на поверхность и описание разломов геологическим слоем малой мощности со сниженными значениями физико-механических свойств.

Программные комплексы имеют огромный потенциал в области оценки устойчивости откосов бортов карьеров и широко применяются как в российской, так и мировой практике [4–10].

Для создания объемной модели массива пород месторождения, включающего в себя карьерную выемку, применена горно-геологическая информационная система (ГГИС) «MINEFRAME» разработки Горного института КНЦ РАН [11]. Модель массива пород месторождения включает в себя следующие горно-геологические и горнотехнические элементы: дневная поверхность, рудные и вмещающие породы, зоны структурных неоднородностей, карьерная выемка.

Критерий устойчивости борта карьера принят в соответствии с действующими нормативными документами [3]: $KЗУ \geq 1,3$.

Расчетные значения физико-механических свойств пород

При формировании схем оценки устойчивости борта карьера основные

Таблица 1

Усредненные показатели физико-механических свойств горных пород участка месторождения, принятые для расчета устойчивости борта карьера
Averaged values of physical and mechanical properties of rocks in the test site to calculate pit wall stability

Наименование породы	Плотность, т/м ³	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Уртиты	2,78	0,894	36
Ювиты	2,70	0,944	38
Руды	3,02	0,711	38
Луявриты	2,77	0,783	35
Рисчорриты	2,69	0,951	37
Мальвиниты	2,69	0,951	37
Зона обрушения и рыхлых отложений	2,20	0,045	37
Разломы	2,00	0,022	25,5

литологические разности были объединены, как показано в табл. 1. По сложности гидрогеологических условий район месторождения относится к III группе «Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод» [12]. Уровень грунтовых вод принят в соответствии с имеющимися данными [13].

Результаты оценки устойчивости борта карьера

Предварительные расчеты устойчивости выполнены в объемной (3D) постановке в упрощенном варианте. За основу принят 3D контур карьера с учетом вмещающих пород и рудного тела. В качестве вмещающих пород приняты рисчорриты во всем пространстве приобортового массива.

Расчет устойчивости выполнен в программном комплексе Slide3 по методу Моргенштерна-Прайса [14]. Данный метод успешно применяется для расчетов устойчивости откосов бортов карьеров в мировой практике [8–10, 15–17]. Вид поверхности ослабления — сферическая. Результаты оценки устойчивости представлены на рис. 1.

В результате проведенных расчетов видно, что зоны с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости расположены на северо-западном ($KЗУ = 1,6$) и северо-восточном ($KЗУ = 1,3$) участках борта карьера. Обе зоны имеют простираение по всей высоте участка борта. Зона, расположенная со стороны северо-западного участка борта карьера, имеет вогнутую форму в горизонтальной плоскости, контур борта карьера в вертикальной плоскости практически прямой. Зона со стороны северо-восточного участка борта имеет выпуклую в плане форму контура карьера в горизонтальной плоскости.

Наименьшее значение $KЗУ$ борта карьера составляет 1,3.

Для того чтобы выполнить более достоверный анализ всей области карьера, необходимо провести оценку устойчивости по различным профилям (в плоской постановке), более детально наполненным необходимыми геологическими, структурными, гидрогеологическими и другими данными.

В результате анализа проектного положения карьера было определено местоположение 9 профилей для оценки

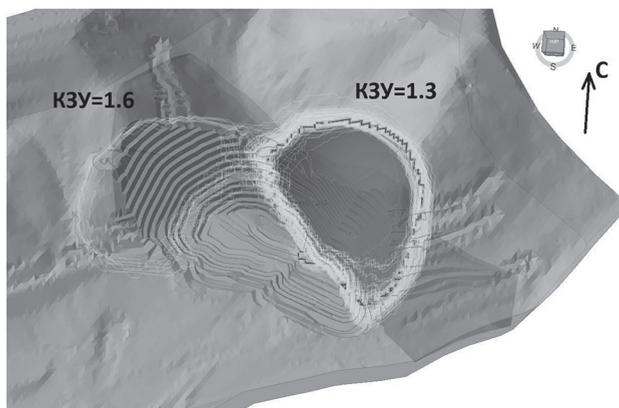


Рис. 1. Результаты оценки $KЗУ$ в объемной (3D) постановке: $KЗУ = 1,6$ — для северо-западного участка борта, $KЗУ = 1,3$ — для северо-восточного участка борта; ☆ — контуры выхода сферических поверхностей ослабления, по которым определены значения $KЗУ$

Fig. 1. 3D safety factor estimates: SF = 1.6 — northwestern block of pit wall, SF = 1.3 — northeastern block of pit wall; ☆ — outlines of outcropped spherical weakened surfaces used in SF calculations

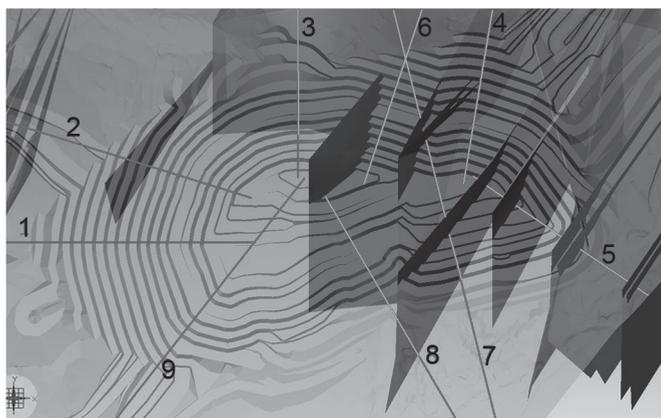


Рис. 2. Положение расчетных профилей на объемной модели карьера месторождения
 Fig. 2. Layout of calculation profile lines in 3D model of pit wall

устойчивости его борта. Каждый профиль был сформирован перпендикулярно участку борта карьера, устойчивость которого оценивалась.

По графическим данным для каждого профиля построена расчетная схема, в соответствии с которой выполнялся автоматический поиск наиболее опасной круглоцилиндрической и линейно-ломаной поверхностей ослаблений. В случае наличия в прибортовом массиве разломных зон или зон трещиноватости расчетная схема корректировалась с учетом имеющихся особенностей геологического строения.

Расчет устойчивости выполнен, как и в случае с объемной постановкой, по

методу Morgenштерна-Прайса в программном комплексе SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope).

На рис. 2 изображен план конечного контура карьера с нанесенными положениями профилей расчетных схем.

Пример расчетной схемы для профиля 1 приведен на рис. 3. Оценка устойчивости по остальным профилям выполнена аналогичным образом.

Результаты оценки устойчивости борта карьера обобщены в табл. 2.

В первой строке табл. 2 указан номер расчетного профиля. Во второй и третьей строках — значения коэффициента запаса устойчивости по наиболее критической, найденной в автоматическом ре-

Таблица 2

Значения коэффициентов запаса устойчивости по расчетным профилям
Values of safety factor per calculation profile lines

№ профиля	1	2	3	4	5	6	7 (Юг)	7 (С)	8	9
КЗУ(кцп)	1,3	1,4	1,6	1,3	2,6	1,3	2,4		2,3	1,9
КЗУ(лл)	1,3	1,5	1,7	1,3	2,5	1,3	2,4		2,3	1,9
КЗУ(р)		1,7 (4_7) 1,9 (4_6)		1,5 (5_40) 1,4 (5_41)	1,7 (морена)	1,3 (5_53)	1,5 (морена)	1,5 (5_39)		

КЗУ(кцп) — коэффициент запаса устойчивости по круглоцилиндрической поверхности ослабления;
 КЗУ(лл) — коэффициент запаса устойчивости по линейно-ломаной поверхности ослабления;
 КЗУ(р) — коэффициент запаса устойчивости по поверхности разлома;
 (морена) — коэффициент запаса устойчивости в морене; (Юг, С) — южная и северная части профиля.

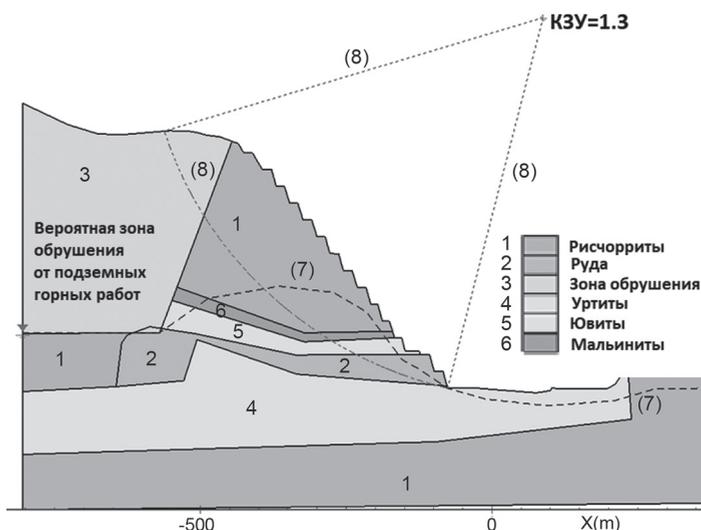


Рис. 3. Расчетная схема профиля 1: --- (7) — уровень грунтовых вод, ---- (8) — положение наиболее критической поверхности ослабления

Fig. 3. Calculation model of profile line 1: --- (7) — ground water level, ---- (8) — locations of critical weakened surfaces

жиме круглоцилиндрической КЗУ(кцп) и линейно-ломаной КЗУ(лл) поверхностям ослаблений. В четвертой — коэффициент запаса устойчивости КЗУ(р) по разломам, где в скобках указан номер разлома.

В соответствии с «Методическими указаниями...», 1972 г. [3], если коэффициент запаса устойчивости борта КЗУ $\geq 1,3$, откос считается устойчивым, если $1 \leq \text{КЗУ} < 1,3$ — недостаточно устойчив (предельное состояние), если $\text{КЗУ} < 1$, откос не устойчив.

Анализируя табл. 2, видим, что КЗУ по всем профилям (вторая, третья, четвертая строки) больше или равен 1,3, что свидетельствует об устойчивости борта карьера в текущем состоянии. При этом необходимо отметить, что по профилю 2 возможна локальная самозаточка близкорасположенных к разломам уступов.

Отметим, что полученные значения КЗУ по северо-восточному участку борта (профили 4 и 6) в результате расчетов в плоской постановке с применением программного комплекса SVOFFICE

2009 (пакет SVSlope) соответствуют результатам, полученным в объемной постановке при расчетах в Slide3. Однако по северо-западному участку борта значения КЗУ в плоской постановке ниже, чем в объемной, что связано с вогнутой формой поверхности участка борта в горизонтальном направлении.

Оценка устойчивости борта карьера по «Методическим указаниям... ВНИМИ...»

Ввиду того, что в настоящее время на территории России применение программных комплексов не утверждено на законодательном уровне, необходимым является проведение расчетов в соответствии с действующими нормативными требованиями [3].

Оценка устойчивости борта карьера была выполнена по «Методическим указаниям... ВНИМИ...» в соответствии с V расчетной схемой [3] по ранее выделенному профилю 1 (рис. 2).

В соответствии с «Методическими указаниями... ВНИМИ...» [3] для построения потенциальной плоскости ослаб-

ления необходимо определить ширину призмы обрушения a и длину вертикальной трещины отрыва H_{90} по формулам:

$$a = \frac{2H \left[1 - ctg\alpha \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \right] - 2H_{90}}{ctg\varepsilon + tg \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right)}, \quad (1)$$

$$H_{90} = \frac{2C}{\gamma} ctg \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где H – высота откоса, м; α – угол откоса, град; φ – угол внутреннего трения, град; ε – угол наибольшего главного напряжения $\varepsilon = 45^\circ - \varphi/2$, град; γ – объемный вес пород в массиве, т/м³; C – расчетная величина сцепления пород, т/м².

В качестве исходных данных были приняты следующие параметры:

- высота борта карьера $H \approx 356$ м;
- угол откоса борта карьера $\alpha \approx 52^\circ$;
- угол внутреннего трения $\varphi \approx 37^\circ$;
- сцепление $C \approx 951$ т/м²;
- плотность пород $\gamma \approx 2,69$ г/см³.

Высота вертикальной трещины отрыва H_{90} в соответствии с исходными данными по формуле (2) составляет примерно 141 м. Ширина призмы об-

рушения по формуле (1) имеет отрицательное значение, поэтому за конечную точку ширины призмы обрушения примем верхнюю бровку первого уступа.

Далее производим построение потенциальной поверхности скольжения в соответствии с V расчетной схемой ВНИМИ [3] и разделим призму возможного обрушения на несколько блоков. Полученная расчетная схема представлена на рис. 4.

Затем находим вес каждого блока (P_i) по формуле:

$$P_i = S_i \cdot \gamma, \quad (3)$$

где S_i – площадь расчетного блока (определяется графически), м²; γ – объемный вес, т/м³.

Нормальную (N) и тангенциальную (T) составляющую веса каждого блока находим по формулам:

$$N_i = P_i \cdot \cos\beta, \quad (4)$$

$$T_i = P_i \sin \cdot \beta, \quad (5)$$

где β – угол наклона подсекающей поверхности для каждого блока, град.

Полученные в результате расчетов по формулам (3) – (5) значения, а также другие необходимые параметры расчетных блоков приведены в табл. 1.

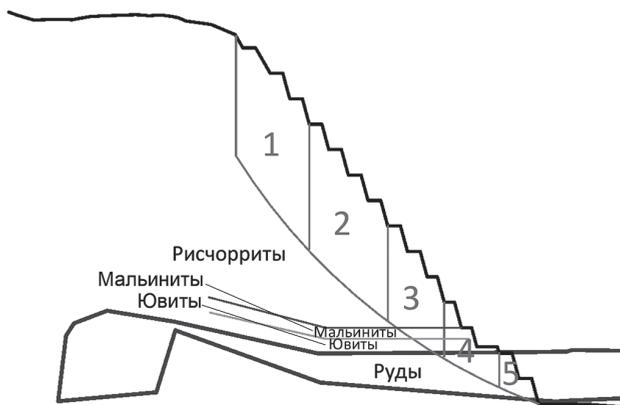


Рис. 4. Расчетная схема по профилю 1 в соответствии с V расчетной схемой ВНИМИ [3]: 1–5 – расчетные блоки; ≡ – границы литологических разностей

Fig. 4. Calculation model of profile line 1 in accordance with V calculation model by VNIIMI [3]: 1–5 – calculation blocks; ≡ – interfaces of lithologic rock types

Таблица 3

Параметры выделенных блоков для профиля 1
Parameters of selected blocks for profile line 1

№ блока	Вес блока на потенциальную поверхность ослабления P_i , т	Угол наклона участка подсекающей поверхности β , град	Нормальная составляющая веса блока N_i , т	Тангенциальная составляющая веса блока T_i , т	Длина участка по потенциальной поверхности ослабления, l , м	Сцепление, C , т/м ²
1	5130	52	37 164	22 880	140	95
2	8722	43	36 274	26 529	126	95
3	10 172	32	18 600	15 774	79	95
4	11 536	29	8948	7826	74	71
5	5460	23	3872	3564	51	71

Необходимо отметить, что участки потенциальной поверхности ослабления блоков 1 – 2 попадают в зону ризкорритов, 3 – малинитов и ювитов, 4 и 5 – руды, в связи с чем сцепление по ним принято в соответствии с табл. 1.

Расчет коэффициента запаса устойчивости участка борта карьера выполнен по следующей формуле [3]:

$$KЗУ = \frac{C \times \sum_{i=1}^n l_i + tg\varphi \times \sum_{i=1}^n N_i}{C \times \sum_{i=1}^n T_i}. \quad (6)$$

При подстановке в формулу (6) параметров выделенных блоков из табл. 1 коэффициент запаса устойчивости по профилю 1 составляет $KЗУ \approx 1,4$, что свидетельствует об устойчивом состоянии данного участка борта карьера.

Оценка устойчивости по «Методическим указаниям... ВНИМИ...» дает немного завышенные (на 8%), нежели в программном комплексе SVOFFICE 2009 (пакет SVSlope), значения $KЗУ$, что

можно считать погрешностью при выполнении расчетов.

Заключение

Таким образом, в результате выполненных исследований можно полагать, что задачи, решаемые в объемной постановке, могут более точно учитывать особенности прибортового массива при качественном наполнении модели исходными данными, а также позволяют быстрее вычислить проблемные участки борта с точки зрения устойчивости. Решение плоских задач позволяет более детально анализировать имеющийся участок с точки зрения наличия в нем различных структурных неоднородностей. При решении плоских задач в программных комплексах методом Моргенштерна-Прайса полученные значения коэффициентов запаса устойчивости не противоречат расчетным значениям, полученным по «Методическим указаниям... ВНИМИ...».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Мелик-Гайказов И. В., Свинин В. С., Рыжков А. Н. Концептуальные основы оптимизации конструкции бортов карьеров Кольского полуострова в конечном положении / Горное дело в Арктике. Труды 8-го Международного симпозиума. – СПб.: Изд-во «Типография Иван Федоров», 2005. – С. 2–14.

2. Козырев А. А., Решетняк С. П., Каспарьян Э. В., Рыбин В. В., Кампель Ф. Б. Обоснование рациональной конструкции конечного борта карьера рудника «Железный» ОАО «Ковдорский ГОК» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2004. — № 3. — С. 243–250.

3. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / Сост. Г. Л. Фисенко и др. — Л.: ВНИМИ, 1972. — 165 с.

4. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 208 с.

5. Исмагилов Р. И., Козуб А. В., Бадтиев Б. П., Павлович А. А. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере михайловского ГОКа // Горная промышленность. — 2020. — № 1. — С. 120–126.

6. Ливинский И. С., Митрофанов А. Ф., Макаров А. Б. Комплексное геомеханическое моделирование: структура, геология, разумная достаточность // Горный журнал. — 2017. — № 8. — С. 51–55.

7. Харисов Т. Ф., Харисова О. Д., Ефремов Е. Ю., Коновалова Ю. П. Исследование устойчивости бортов и уступов карьера Киембаевского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. — 2018. — № 5. — С. 30–39.

8. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall // Journal of Civil and Environmental Engineering. 2020, vol. 42, no. 4, pp. 19–27.

9. Kumar V., Himanshu N., Burman A. Rock slope analysis with nonlinear hoek–brown criterion incorporating equivalent mohr–coulomb parameters // Geotechnical and Geological Engineering. 2019, vol. 37, no. 6, pp. 4741–4757.

10. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., Kayet N. Slope stability analysis of the overburden dump of meghahatuburu iron ore mines in Singhbhum Region of India. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering. 2020, pp. 3591–3605.

11. Наговицын О. В., Лукичев С. В. Горно-геологические информационные системы — история развития и современное состояние. — Апатиты: КНЦ РАН, 2016. — 196 с.

12. Об утверждении Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. Приказ № 195. Министерство Природных Ресурсов Российской Федерации от 30 июля 2007 г.

13. Отчет по детальной разведке II-го шахтного поля Юкспорского апатито-нефелинового месторождения с коренной комплексной переоценкой месторождения в целом по состоянию на 1.01.81г. т. 2, папка 3 г. — Кировск: Северозапгеология, 1980.

14. Krahn J., Price V. E., Morgenstern N. R. Slope stability computer program for Morgenstern-Price method of analysis. University of Alberta, Edmonton, Alta. 1971.

15. Guidelines for Open Pit Slope Design. J. Read, P. Stacey (Eds.). Australia, 2010.

16. Bushira K. M., Gebregiorgis Y. B., Verma R. K., Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road, Ethiopia // Modeling Earth Systems and Environment. 2018, vol. 4, no. 2, pp. 591–600.

17. Ярг Л. А., Фоменко И. К., Житинская О. М. Оценка факторов, определяющих оптимизацию углов заложения откосов при длительной эксплуатации карьера (на примере Стойленского железорудного месторождения КМА) // Горный журнал. — 2018. — Т. 2256. — № 11. — С. 76–81. 

REFERENCES

1. Mel'nikov N. N., Kozyrev A. A., Reshetnyak S. P., Kaspar'yan E. V., Rybin V. V., Melik-Gaykazov I. V., Svinin V. S., Ryzhkov A. N. Conceptual framework for the optimization

of final pit limits in the Kola Peninsula. *Gornoe delo v Arktike. Trudy 8-go Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Mining in the Arctic: The 8th International Symposium Proceedings], Saint-Petersburg, Izd-vo «Tipografiya Ivan Fedorov», 2005, pp. 2–14. [In Russ].

2. Kozyrev A. A., Reshetnyak S. P., Kaspar'yan E. V., Rybin V. V., Kampel' F. B. Justification of rational ultimate pit limits for Zhelezny mine of Kovdor GOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2004, no. 3, pp. 243–250. [In Russ].

3. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov stroyashchikhsya i ekspluatiruemyykh kar'erov*. Sost. G. L. Fisenko i dr. [Guidelines on determination of slope angles for pit wall and dumps at open pit mines in operation and under construction], Leningrad, VNIMI, 1972, 165 p. [In Russ].

4. *Pravila obespecheniya ustoychivosti otkosov na ugol'nykh razrezakh* [Regulations on slope stability in open pit coal mines], Saint-Petersburg, VNIMI, 1998, 208 p. [In Russ].

5. Ismagilov R. I., Kozub A. V., Badtiev B. P., Pavlovich A. A. Introduction of safety monitoring at the construction site of high-angle conveyor in Yuzhny open pit mine of Mikhailovsky GOK. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 1, pp. 120–126. [In Russ].

6. Livinskiy I. S., Mitrofanov A. F., Makarov A. B. Integrated geomechanical modeling: Structure, geology, reasonable adequacy. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 8, pp. 51–55. [In Russ].

7. Kharisov T. F., Kharisova O. D., Efremov E. Yu., Konovalova Yu. P. Pit wall stability analysis at Kiembraev deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2018, no. 5, pp. 30–39. [In Russ].

8. Yang S., Su L., Zhang C., Li C., Hu B. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall. *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2020, vol. 42, no. 4, pp. 19–27.

9. Kumar V., Himanshu N., Burman A. Rock slope analysis with nonlinear hoek–brown criterion incorporating equivalent mohr–coulomb parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019, vol. 37, no. 6, pp. 4741–4757.

10. Mhaske S., Kapoor I., Pathak K., Kayet N. Slope stability analysis of the overburden dump of meghahatuburu iron ore mines in Singhbhum Region of India. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. 2020, pp. 3591–3605.

11. Nagovitsyn O. V., Lukichev S. V. *Gorno-geologicheskie informatsionnye sistemy – istoriya razvitiya i sovremennoe sostoyanie* [Mining and geological information systems-history of development and current state], Apatity, KNTs RAN, 2016, 196 p.

12. *Ob utverzhdenii Klassifikatsii zapasov i prognoznykh resursov pit'evykh, tekhnicheskikh i mineral'nykh podzemnykh vod. Prikaz № 195*. Ministerstvo Prirodnnykh Resursov Rossiyskoy Federatsii ot 30 iyulya 2007 g. [Approval of Classification of Drink, Process and Mineral Groundwater Resources and Probable Reserves. Order No. 195]. [In Russ].

13. *Otchet po detal'noy razvedke II-go shakhtnogo polya Yuksporskogo apatito-nefelinovogo mestorozhdeniya s korennoy kompleksnoy pereotsenkoy mestorozhdeniya v tselom po sostoyaniyu na 1.01.81g. t. 2, papka 3 g*. [Detailed survey of II mine field at Yukspor apatite–nepheline deposit with major integrated reappraisal: Report as of January 1, 1981. Vol. 2, Folder 3 g], Kirovsk, Severozapgeologiya, 1980. [In Russ].

14. Krahn J., Price V. E., Morgenstern N. R. *Slope stability computer program for Morgenstern-Price method of analysis*. University of Alberta, Edmonton, Alta. 1971.

15. *Guidelines for Open Pit Slope Design*. J. Read, P. Stacey (Eds.). Australia, 2010.

16. Bushira K. M., Gebregiorgis Y. B., Verma R. K., Sheng Z. Cut soil slope stability analysis along National Highway at Wozeka–Gidole Road, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2018, vol. 4, no. 2, pp. 591–600.

17. Yarg L. A., Fomenko I. K., Zhitinskaya O. M. Estimate of optimization factors of slope steepness angles in open pit mines of long-term service (in terms of Stoilensky iron ore deposit in the KMA). *Gornyi Zhurnal*. 2018, vol. 2256, no. 11, pp. 76–81. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Калужный Антон Сергеевич — научный сотрудник,
Горный институт КНЦ РАН, e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.S. Kalyuzhny, Researcher, e-mail: anton26@goi.kolasc.net.ru,
Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

Получена редакцией 25.11.2020; получена после рецензии 07.12.2020; принята к печати 10.09.2021.
Received by the editors 25.11.2020; received after the review 07.12.2020; accepted for printing 10.09.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОКИСЛЕНИЯ ГРАФИТОВ И УГЛЕЙ

(2021, № 4, СБ 11, 20 с.)

Маринин Сергей Дмитриевич¹ — аспирант, e-mail: sergey_marinin@list.ru,
Горяинова Юлия Анатольевна¹ — студент, Калачаров Иван Михайлович¹ — студент,
¹ НИТУ «МИСиС».

Проанализированы существующие методы химического окисления графитов, в том числе Хаммерса, Штауденмайера-Хоффмана, Броуди и др. Отмечено, что в процессе модификации углеродсодержащих материалов, отличных по структуре от графита, в частности углей различных стадий метаморфизма, особое значение имеет стадия предварительной подготовки материалов. Рассмотрены различные способы подготовки углей, в том числе предварительная карбонизация, экстрагирование, баротермическая обработка и др. Приведены результаты синтеза графеноподобных структур из исходного антрацита и термоантрацита, предварительно обработанного при температуре 900 °С. Для синтеза оксида графита использовали метод Хаммерса. Показано, что синтез по Хаммерсу в случае использования исходного антрацита затруднителен из-за быстрого расходования перманганата калия. После синтеза полученную реакционную массу разделяли на фракции, из которых были получены твердые остатки. Выделенные остатки анализировали с использованием метода электронной растровой микроскопии. Выявлены отличия в структуре твердых продуктов синтеза, выделенных из различных фракций.

Ключевые слова: графит, каменный уголь, антрацит, графен, оксид графена, окисление, метод Хаммерса, модифицированный метод Хаммерса.

CHEMICAL METHODS OF GRAPHITE AND COAL OXIDATION

S.D. Marinin¹, Graduate Student, e-mail: sergey_marinin@list.ru,
Yu.A. Goryainova¹, Student, I.M. Kalacharov¹, Student,

¹ National University of Science and Technology «MI SiS», 119049, Moscow, Russia.

The existing methods of chemical oxidation of graphite, including Hammers, Staudenmayer-Hoffman, Brody, etc., are analyzed. It is noted that in the process of modification of carbon-based materials that differ in structure from graphite, in particular, for those of coals of various stages of metamorphism, the stage of preliminary processing is of particular importance. Various methods of coals preliminary processing are considered, including carbonization, extraction, barothermal treatment, etc. The results of the synthesis of graphene-like structures from the initial anthracite and thermal anthracite pretreated at a temperature of 900 °C are presented. For the further synthesis of graphite oxide, the Hammers method was used. It was shown that the synthesis according to Hammers method, in the case of using the untreated anthracite, is difficult to be implemented due to the rapid consumption of potassium permanganate. After the successful synthesis, the resulting reaction mass was divided into fractions, from which solid residues were obtained. The isolated residues were analyzed using scanning electron microscopy. Differences in the structure of solid synthesis products isolated from various fractions were revealed.

Key words: graphite, coal, anthracite, graphene, graphene oxide, oxidation, Hammers method, modified Hammers method.