

УДК 622.7+541.183+66.5

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ, УСТУПОВ РАЗРЕЗОВ И ОТКОСОВ ОТВАЛОВ НА КАМЕННОУГОЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ GEOSTUDIO И PLAXIS 3D

Е.Н. Беляев, А.Е. Бурдонов, Н.В. Мурзин

Работа посвящена вопросам прогнозирования и оценки устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов с применением программных комплексов Geostudio и Plaxis 3D. Расчеты проводились на примере каменноугольного месторождения расположенного в Республике Тыва. В процессе выполнения работ были установлены физико-механические характеристики грунтов, проанализированы расчетные схемы деформирования и оценка устойчивости бортов и уступов карьера. С использованием представленных программных комплексов произведен расчет устойчивости отвалов, бортов и уступов карьера. Кроме того, установлено влияние неопределенности исходных данных на вероятность обрушения на месторождении и определены зависимости коэффициента запаса устойчивости от удельной нагрузки на уступ при разработке месторождения. Зафиксированы некоторые различия в полученных значениях с использованием программных продуктов. В результате расчетов устойчивости откосов отвалов на месторождении было установлено, что откосы отвалов устойчивы при оставлении берм между ярусами.

Ключевые слова: оценка устойчивости, уступ, откос, борт, геомеханика, Geostudio, Plaxis.

Введение

Эффективность отработки месторождений полезных ископаемых, в том числе угольных, во многом зависит от соответствия предельных параметров бортов карьеров климатическим, геологическим, технологическим и другим не менее важным условиям эксплуатации объекта недропользования [1, 2].

На горнодобывающих предприятиях, а также в проектных и научно-исследовательских организациях, данному вопросу уделяется большое внимание, поскольку не соответствие геомеханических параметров критерия устойчивости может привести к нарушению устойчивости и, как следствие, развитию деформационных процессов на всех этапах жизненного цикла карьера [3 – 4]. Все элементы геомеханической модели образуют собой единую техногенно-нагруженную систему, и, отклонение любого параметра, например, в случае изменения гидрогеологического баланса или технологических условий разработки объекта может привести к непредсказуемым последствиям, которые могут принести значительный материальный и экологический ущерб [5]. В открытых источниках литературы

описано множество примеров влияния данных факторов на изменение устойчивости таких систем [6 – 7]

Кроме этого, важнейшей составляющей является безопасность сотрудников предприятия при проведении дальнейших работ. Данный факт подтверждается значительным количеством исследований [8 – 11]

На основании вышесказанного можно утверждать, что на первый план в данном направлении выходят вопросы прогнозирования устойчивости бортов, откосов уступов и отвалов на объектах недропользования [12 – 13].

Первые исследования по данному вопросу стали проводиться в послевоенные годы, когда борт карьера стал рассматриваться как геотехническое сооружение, параметры которого можно рассчитывать, используя физико-механические характеристики массива. Однако и в настоящее время данные работы зачастую проводятся с использованием устаревших методик, без четкого понимания всех факторов [14].

Ключевым вопросом в данном направлении является установление критических значений деформации бортов карьеров, а соответственно и их устойчивости. На сегодняшний момент разработано и используется множество методов оценки геомеханических систем: метод механики сплошной среды, предельного равновесия, метод напряженного состояния и др. [15 – 16]. Несмотря на достаточно интенсивное развитие фундаментальных исследований в области методов оценки устойчивости откосов в последнее время компьютерные численные модели все чаще используются для проверки устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов и моделирования влияния всех параметров, которые играют роль в их безопасности [17 – 20].

Данная статья посвящена вопросу применения программных комплексов Geostudio и Plaxis 3D, с целью прогнозирования и оценки устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении Российской Федерации.

Описание объекта исследования

Исследуемый участок расположен на территории республики Тыва Российской Федерации. При проведении полевых работ в пределах участка выделены три группы пород:

- четвертичные рыхлые отложения;
- юрские угленосные отложения, затронутые выветриванием;
- юрские угленосные отложения, не затронутые выветриванием.

На участке открытых работ четвертичные отложения представлены двумя типами: элювиально-делювиальными отложениями и эоловыми песками. Первые на участке имеют повсеместное распространение и представлены супесями, обломками песчаников и алевролитов. Мощность от-

ложений изменяется от 0,2 до 4,0 м. В северо-восточной части участка делювиальные отложения перекрываются эоловыми песками.

Физико-механические свойства пород месторождения приняты по геологическому отчету и по данным, полученным в ходе эксплуатации месторождения.

Расчетные схемы деформирования и оценка устойчивости бортов и уступов карьеров

Рекомендуемые методы определения параметров бортов, уступов и откосов отвалов основаны на теории предельного равновесия горных пород. Как правило, расчет и оценка параметров откосов уступов и ярусов отвалов, обеспечивающих их устойчивость, проводится с установленной методикой, в которой учитываются качественно-количественные характеристики грунтов, а так же поверхности скольжения и угол внутреннего трения [21 – 22].

Расчет устойчивости борта по построенным таким образом поверхностям скольжения производят, как правило, методом векторного сложения сил. Метод многоугольника сил является наиболее универсальным для оценки устойчивости бортов и откосов в реальных горно-геологических условиях. Применение данного метода позволяет учитывать геомеханические процессы, происходящий в массиве [23 – 24].

Метод многоугольника учитывает реакции между блоками, на которые разбивается призма возможного обрушения. При расчете этим методом точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и от направления реакции между ними. Достаточная точность расчетов достигается, когда границы между блоками принимают подобно расположению второго семейства поверхностей скольжения при расчете методом предельно напряженного состояния, т.е. под углом $(90^\circ - \varphi)$ к первому семейству поверхностей скольжения. По данному направлению опубликовано значительное количество работ, как на территории Российской Федерации, так и за ее пределами [25 – 27].

В предельном состоянии формируется поверхность скольжения, которая в нижней части массива совпадает с наиболее слабым контактом слоев, а в верхней части имеет форму монотонной криволинейной поверхности, близкой к круглоцилиндрической. Геологическое строение пород, слагающих борта карьеров, и конфигурация бортов в плане определяют схему расчета их устойчивости.

Как известно, расчет призмы возможного обрушения уступов, нагруженных весом тяжелого горно-транспортного оборудования производится на предельное равновесие по наиболее напряженной поверхности скольжения. Кроме прочности горных пород, учитывается площадь опорной части оборудования S (м²) и его вес P (т). В зависимости от расположения горного оборудования относительно призмы возможного обруше-

ния, рассчитанной с заданным коэффициентом запаса устойчивости откоса возможны два случая: статически нагруженный откос и откос без нагрузки имеет один и тот же коэффициент запаса; статически нагруженный откос имеет коэффициент запаса меньший, чем без нагрузки [28-29]

Расчет производился для первого случая следующим путем. Строится поверхность скольжения с учетом массы горного оборудования: если его удельное давление на горную породу (H/m^2) больше $\sigma_o = 2C \cdot ctg\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$, то площадки скольжения возникают непосредственно под опорной базой горного оборудования, а если же $P/S > s_o$, то площадки скольжения будут формироваться только с глубины

$$H_{90} = \frac{s_o - P/S}{g}.$$

В средней и нижних частях откоса поверхности скольжения имеют вид монотонных криволинейных, а при наличии поверхностей ослабления с падением в сторону выемки совпадают с ними.

По сравнению со статическими нагрузками горного оборудования, обусловленными его весом, необходимо учитывать увеличение давления на горную породу во время работы механизмов, которые передают динамическую нагрузку не через всю площадь опорной базы, а лишь через некоторую ее часть.

Реализация методики для оценки устойчивости карьеров и отвалов

Согласно требованиям (п. 1 Приложения №3) ФНиП утвержденные приказом №439 от 13.11.2020 г. оценка устойчивости откосов выполняется методами, основанными на теории предельного равновесия. Согласно п.10 приложения №3 ФНиП при расчете устойчивости бортов и уступов, в том числе с учетом воздействия сейсмических сил и нагрузок от горного оборудования, с использованием теории предельного равновесия, применяют методы алгебраического и векторного сложения сил, а также методы, удовлетворяющие трем уравнениям равновесия.

Построения потенциальных поверхностей скольжения (ППС) и выбор расчетной схемы выполняются для рабочего борта карьера, откосов уступа и отвала. В данной работе для каждого оцениваемого откоса выполнено многовариантное построение ППС, при этом оценка устойчивости дана по наиболее напряженной поверхности.

Расчет устойчивости, в соответствии с целью данной работы, проводился с использованием программных продуктов Geostudio, пакет Slope/W, и Plaxis 3D. Как правило, в случае если разница между расчетами велика, выполняется расчет вручную, методом алгебраического сложения сил, в соответствии с установленными алгоритмом.

Расчет коэффициентов запаса в ПО Slope/W может выполняться методами Бишопа; метод Джанбу; метод Спенсера; метод Моргенштерн-Прайса. [30]. Применяемые методы предельного равновесия допускают,

что массив грунта над поверхностью скольжения делится на блоки, на которые действуют нормальные и сдвиговые силы.

Расчет в Plaxis 3D основан на методе конечных элементов. Применение метода конечных элементов для решения практических задач предполагает создание модели объекта, его дискретизацию (разбивку или расчленение на элементы), решение больших систем уравнений, подготовку исходных данных, интерпретацию результатов моделирования и их наглядное представление [31]. На сегодняшний день проводится большое количество работ с использованием данного комплекса как на территории Российской Федерации [32], так и за ее пределами [33-34]

Именно посредством разбивки или дискретизации области на элементы, по своей сути, составляющей часть решения задачи, которая заменяет собой аппарат интегрально-дифференциального исчисления, необходимый при рассмотрении континуумов, представляется возможным решение методом конечных элементов (МКЭ) сложных дифференциальных уравнений. Фактически МКЭ позволяет решать дифференциальные уравнения, заменяя их системой линейных алгебраических уравнений, что с одной стороны облегчает нахождение решения и кроме этого позволяет решать задачи практически любой сложности [35]. Данный факт обуславливает актуальность программных комплексов при проведении данных работ, поскольку «ручной» расчет занимает значительное количество времени и имеет значительную вероятность ошибки.

Необходимо отметить, что расчеты устойчивости в данной работе выполнены как с учетом воздействия сейсмической силы, так и без нее. Учет сейсмического воздействия выполнен за счет введения в расчет горизонтальной составляющей сейсмической силы.

Оценка устойчивости бортов карьера и отвалов

Расчет устойчивости бортов карьера

В результате анализа исходной горно-геологической характеристики каменноугольного месторождения для расчетов устойчивости рабочих бортов на участках были использованы группы наиболее распространённых вскрышных пород с относительно однородным петрографо-минералогическим составом и полезное ископаемое - уголь, слагающие борт (табл. 1). Расчётные значения нормативных коэффициентов запаса устойчивости бортов карьера представлены в табл. 2.

Далее выполняется пересчет исходных данных с учётом необходимого коэффициента запаса устойчивости и расчет минимального коэффициента запаса устойчивости для каждого типа пород с использованием программного продукта Geostudio, пакет Slope/W. Результаты расчета приведены в табл. 3.

В соответствии с проведенными расчетами коэффициент запаса устойчивости составил: с использованием Geostudio - 1,691, Plaxis 3D -

1,689.

Таблица 1

Исходные данные для расчета устойчивости борта

№	Литология	Мощ- ность, м	%	Есте- ствен- ная влаж- ность, %	Плот- ность поро- ды, т/м³	Сцепление, кПа		Угол вн. тр., градус
						в об- разце	в мас- сиве	
Вскрышные породы								
1	ИГЭ 1. Средне- зернистый пес- чаник	10,0	9,9	1,8	2,39	12160	246,2	35,0
2	ИГЭ 2. Алевро- лит с линзами каменного угля	6,0	5,9	1,6	2,55	12258	248,2	30,0
3	ИГЭ 3. Песча- ник мелкозер- нистый	20,0	19,8	1,6	2,45	12749	258,2	34,0
4	ИГЭ 4. Алевро- лит с линзами мелкзернистых песчаников	24,0	23,8	2,8	2,22	10199	206,5	33,0
5	ИГЭ 5. Песча- ник среднезер- нистый с лин- зами алевролитов	20,0	19,8	1,7	2,47	12258	248,2	33,0
6	ИГЭ 6. Алевро- литы и мелко- зернистый пес- чаник	6,0	5,9	1,7	2,53	14808	299,9	33,0
7	ИГЭ 7. Средне- зернистый пес- чаник	8,0	7,9	1,8	2,39	12160	246,2	35,0
8	ИГЭ 8. Камен- ный уголь	7,0	6,9	6,1	1,45	3334	67,5	34,0
Итого		101,0	100	2,38	2,31		227,6	33,4
Отвальная смесь								
1	Транспортный отвал	30 (20)	100		1,90	-	70,0	16,0
Уступ								
1	Уступ	15,00	100		2,31	-	227,6	33,4

Таблица 2

Расчёт нормативного коэффициента запаса устойчивости

Наименование показателя	Обозначение, формула	Значения	
		с учетом сейсмики	без учета сейсмики
Сейсмичность района		IX	
Категория борта		II	
Необходимый коэффициент запаса устойчивости	$\eta = \left(1 + \frac{tm}{100\%}\right)$	1,51	1,37
Коэффициент надежности	$t = ab$	1,495	
Общая ошибка исходных данных, %	m	25	
Коэффициент, учитывающий категорию борта	a	1,30	
Коэффициент, учитывающий продолжительность стояния борта	b	1,15	
Коэффициент, учитывающий сейсмичность района	$k_c = 1 + \frac{a_{\max}}{g}$	1,10	1,00

Таблица 3

Расчет минимального коэффициента запаса устойчивости для каждого типа пород

№ п/п	Литология	Плотность, т/м ³	Сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, градус
Вскрышные породы				
1	ИГЭ 1. Среднезернистый песчаник	1,6	162,7	23,1
2	ИГЭ 2. Алевролит с линзами каменного угля	1,7	164,0	19,8
3	ИГЭ 3. Песчаник мелкозернистый	1,6	170,5	22,5
4	ИГЭ 4. Алевролит с линзами мелкозернистых песчаников	1,5	136,4	21,8
5	ИГЭ 6. Алевролиты и мелкозернистый песчаник	1,7	198,1	21,8
6	ИГЭ 7. Среднезернистый песчаник	1,6	162,7	23,1
7	ИГЭ 8. Каменный уголь	1,0	44,6	22,5

В целях обеспечения безопасной работы людей и горнотранспортного оборудования необходимо выделение опасных зон и формирование предохранительных берм, обеспечивающих улавливание отдельных, скатывающихся кусков породы, особенно при работе на уступах, высота ко-

торых, превышает технические параметры применяемого горнодобывающего оборудования.

Установление скорости и траектории движения кусков породы по откосам осложняется множеством факторов, оказывающих влияние на кинематические характеристики падающих камней, а именно: высоты падения, крутизны склона, размеры и форма камней, микрорельеф и упругопластические свойства откоса, переменность массы падающего камня и т.д. Поэтому решение поставленной задачи находится в области экстремальных значений, получаемых при определении с достаточной степенью вероятности максимально возможных расчетных скоростей движения камней.

Результаты расчёта ширины бермы приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчёта ширины бермы

Наименование	Значение
Минимальная расчетная ширина бермы, м	3,39
Ширина бермы, срабатываемой осыпью, м	2,0
Эмпирический коэффициент	1,5
Срок существования бермы, лет	10
Угол естественного откоса, град	60
Угол откоса уступа, град	70
Коэффициент потери прочности пород при выветривании	0,66
Коэффициент, зависящий от крепости пород	2
Высота уступа, м	10
Расстояние между трещинами, м	0,05
Длина пути на берме камня, падающего откоса, м	1,4
Дальность падения камня по берме, м	1,24
Длина скачков камня по берме, м	0,18
Коэффициент восстановления при ударе об откос	0,4
Максимальный подскок камня при ударе о берму, м	0,3
Скорость отражения камня после удара о берму, м/с	3,5
Скорость отражения камня после удара о откос, м/с	7,4
Скорость камня в момент падения на берму, м/с	6,6
Тангенс угла отражения при ударе об откос	0,2
Тангенс угла отражения при ударе об берму	0,8
Коэффициент мгновенного трения при ударе камня об откос	0,1
Коэффициент восстановления при ударе камня об берму	0,2
Коэффициент, зависящий от состояния поверхности откоса	1,2
Коэффициент, зависящий от крутизны откоса	3,2
Коэффициент мгновенного трения при ударе камня о берму	0,2

По результатам расчетов положение рабочего борта карьера при максимальной высоте для скорректированных физико-механических свойств горных пород месторождения характеризуется устойчивым состоянием, коэффициенты устойчивости более нормативного – 1,3.

Оценка устойчивости отвалов

Следующим этапом выполнения работ являлся расчет устойчивости откоса автотранспортного отвала, состоящего из двух ярусов. Результаты расчета представлены на рис. 1а-1б.

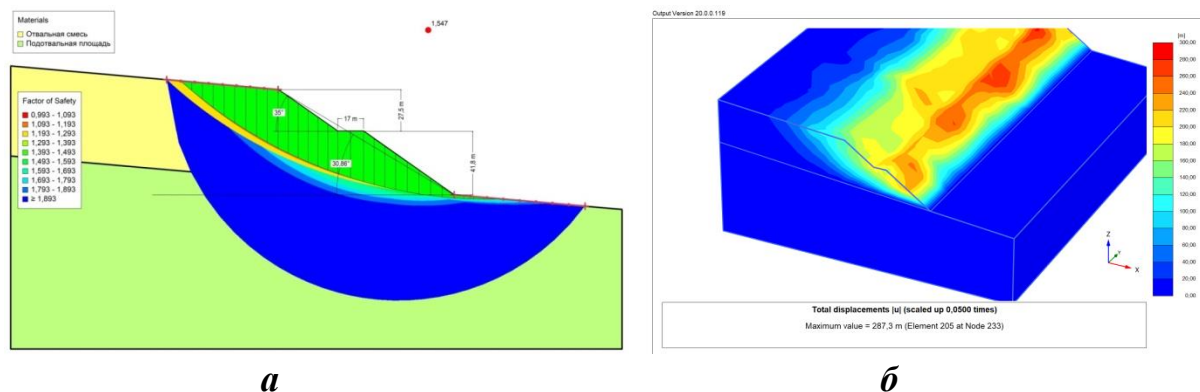


Рис. 1. Схема расчета коэффициента устойчивости для откоса отвала на месторождении:
а – Geostudio; б – Plaxis 3D

С использованием программного обеспечения был выполнен пересчет физико-механических свойств отвальных пород с учетом необходимого коэффициента запаса устойчивости и расчет коэффициента запаса устойчивости. Коэффициент запаса устойчивости по программе Geostudio – 1,547, по программе Plaxis 3D – 1,571.

Установлено, что отвалы вскрышных пород на каменноугольном месторождении при отсыпке по технологии, предусматривающей оставление берм имеют устойчивое состояние при сравнении расчетного минимального коэффициента запаса устойчивости с допустимым значением ($K_{уст.д.}=1,2$).

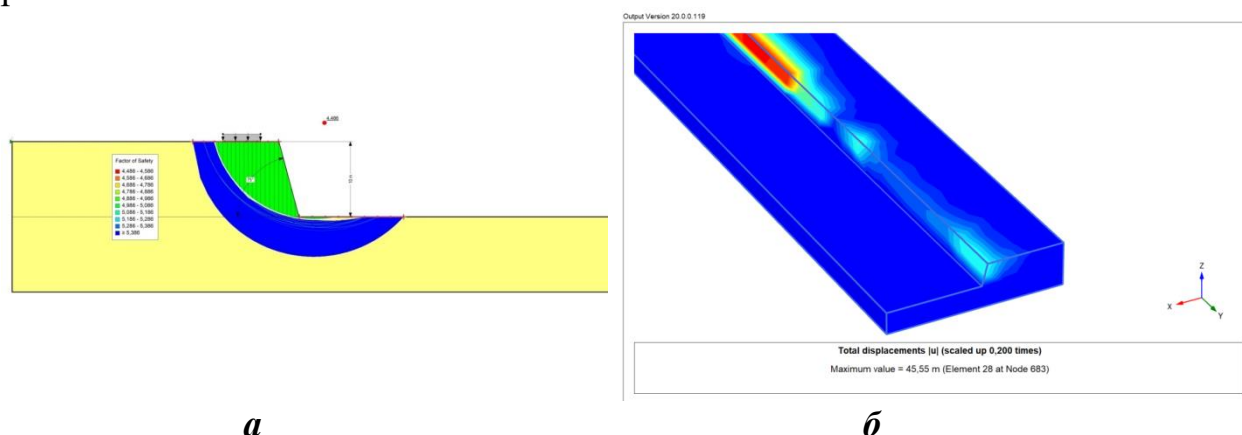
Оценка устойчивости уступов

Выбранная система разработки на рассматриваемом участке предусматривает наличие бестранспортного и транспортного рабочих уступов. Высота рабочего вскрышного бестранспортного уступа, которая, как правило, устанавливается согласно проектным решениям, определяется глубиной черпания экскаватора и мощностью вскрышных пород. Высота рабочего вскрышного транспортного уступа определяется параметрами выемочного экскаватора. Углы откосов уступов составляют 65...70 градусов.

Физико-механические свойства горных пород приняты такие же, как и для рабочего борта карьера. Дальнейшие расчеты выполнены с учетом максимальной нагрузки на уступ экскаваторов.

Схемы рабочих уступов для усредненного типа пород, используемые для расчетов в программном продукте Geostudio, пакет Slope/W, при-

ведены на рисунке 4, для расчета в программном продукте Plaxis 3D на рис. 2а-2б.



**Рис. 2. Схема рабочего транспортного уступа на месторождении:
а – Geostudio; б – Plaxis 3D**

На основании проведенных расчетов установлено, что коэффициент запаса устойчивости с использованием Geostudio для транспортного и бес-транспортного уступов по коренным породам составил 4,486 и 1,676 соответственно, с использованием программе Plaxis 3D - 8,444 и 2,657

Установлено, что уступ нагруженный горным оборудованием – **устойчив**, так как коэффициенты устойчивости откоса уступа больше нормативного по ФНИП ($K_{уст.доп} > 1,5$). Тем не менее, программные комплексы показали значительные различия в показателях, что свидетельствует о существенных различиях в используемых методиках [30].

Оценка прогноза устойчивости бортов карьеров и откосов отвалов

В статье [36] достаточно подробно описаны риски связанные с устойчивостью бортов. Авторы указывают, что вероятность обрушения откоса может определяться несколькими методами – путем многократного определения его запаса устойчивости при различных исходных параметрах, выбираемых методом Монте-Карло в диапазоне варьирования значений, методом Точечного определения (Point Estimate Methods) [37-38], а также его частные случаи – методы Чувствительного фактора (Response influence factor method) [39], Поверхностного Отклика (Response surface method) и др.

В данной работе, оценка прогноза устойчивости осуществлялась с использованием метода Монте-Карло. По средним значениям физико-механических свойств горных пород было рассчитано более 500 вариантов в различных сочетаниях свойств: угол внутреннего трения; сцепление; объёмный вес, с изменением их значений случайным образом в пределах диапазона погрешности. В результате получены не только среднее значе-

ние коэффициента устойчивости откоса, но его максимально и минимально возможные значения, а также вероятность обрушения. Далее, по результатам расчетов построены сводные графики плотности распределения погрешности вычисления коэффициентов устойчивости бортов карьеров для каждого участка горных работ рис. 3.

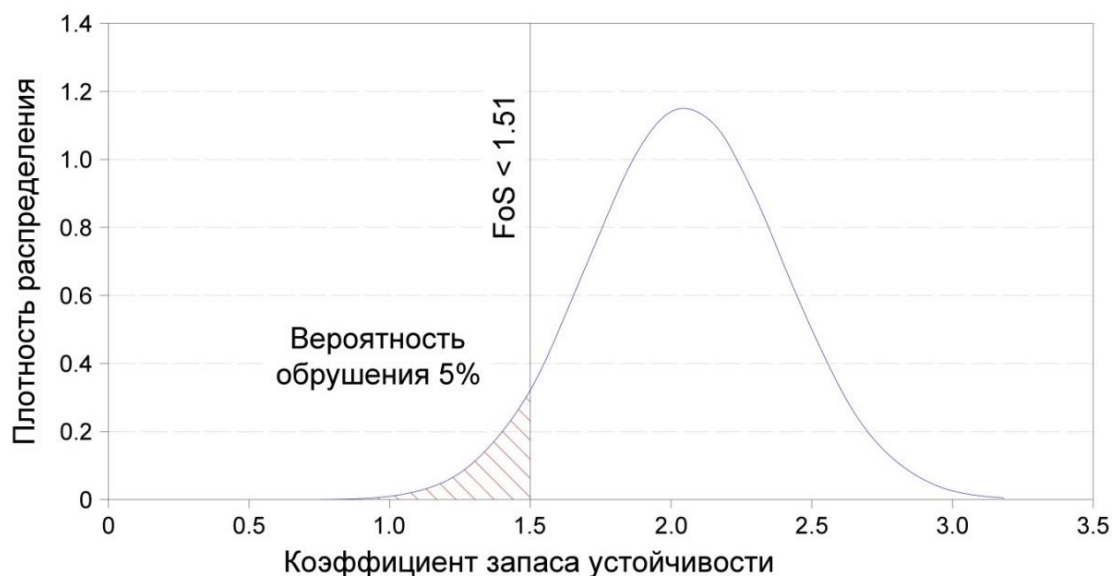


Рис. 3. Влияние неопределенности исходных данных на вероятность обрушения на месторождении

При расчетном коэффициенте устойчивости и при допустимом по ФНиП «Правила обеспечения устойчивости бортов, уступов и отвалов» (Приложение 4) при соблюдении проектных решений для усредненных физико-механических значений борта на каменноугольном месторождении **устойчивы** и имеют вероятность обрушения соответственно 5 %. В результате расчетов устойчивости откосов рабочих уступов, с учетом предельной нагрузки для применяемого оборудования было установлено, что откос уступа **устойчив**.

Основываясь на результатах расчетов, было выполнено исследование влияние предельной нагрузки на устойчивость откоса уступов рис. 4.

В соответствии с ФНиП «Правила обеспечения устойчивости бортов, уступов и отвалов», (Приложение 4) нормативный коэффициент запаса устойчивости должен быть не менее 1,5. Исследования показали, что породы устойчивы и могут выдерживать нагрузку применяемого оборудования.

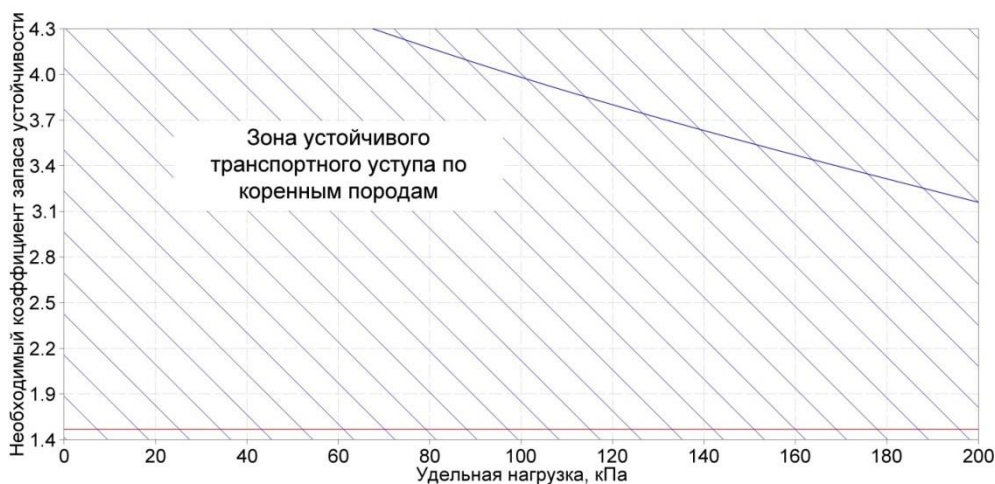


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса устойчивости от удельной нагрузки на транспортный уступ при разработке месторождения

Оценка прогноза устойчивости откоса отвала

Основываясь на результатах расчетов, было выполнено исследование влияния ширины бермы на отвале (на участках, где проектной документацией они предусмотрены), и его нагруженности на устойчивость его откосов (рис. 5).

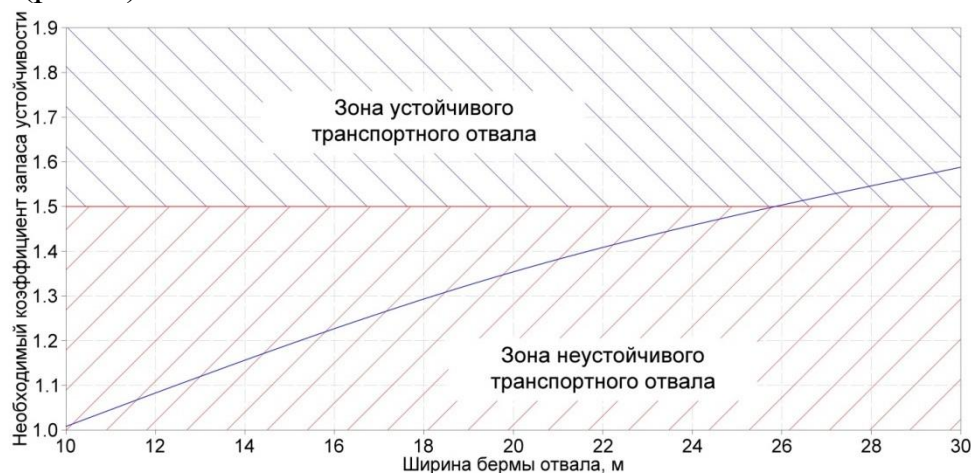


Рис. 5. Зависимость коэффициента запаса устойчивости от ширины бермы отвала на месторождении на бестранспортном отвале

Поскольку отвал уже сформирован и имеет по расчетам на усредненные значения физико-механических свойств горных пород неустойчивое состояние, необходимо следить за его деформацией.

Районирование месторождения

Районирование осуществлено на основе комплексного анализа, состоящего из инструментального мониторинга, исследования геологических

структур и программного моделирования деформаций с использованием программного продукта Plaxis 3D. Для моделирования геомеханических рисков использовался план горных работ на конец отработки.

Была составлена 3D модель участка отработки, на базе которой выполнен расчет эффективных напряжений и возникновение точек пластических деформаций на участке горных работ рис. 6.

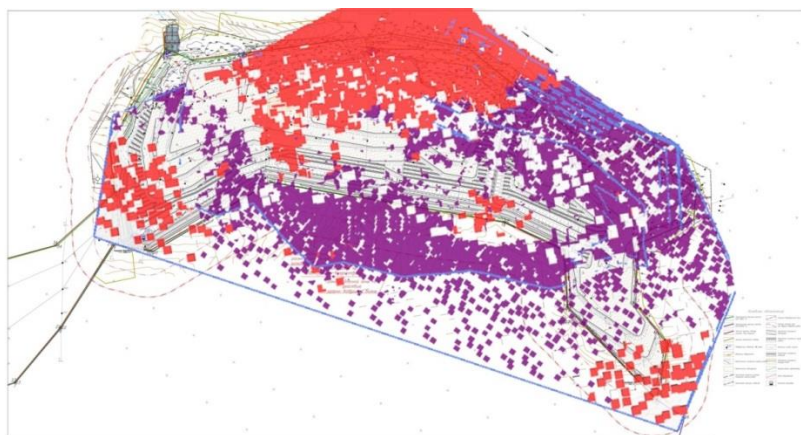


Рис. 6. Модель каменноугольного месторождения с выделенными точками пластических деформаций

В результате исследования установлено, что особое внимание за устойчивостью следует уделить рабочим бортам карьера и западному отвалу вскрышных пород.

Заключение

В работе проведен анализ проблем и перспектив развития тематики в области оценки устойчивости бортов и уступов карьеров, а так же представлена реализация методики для оценки устойчивости карьеров и отвалов с использованием программных комплексов Geostudio и Plaxis 3D. В рамках проведенного исследования были проанализированы геомеханические условия разработки каменноугольного месторождения.

В результате выполнения работ разработаны и представлены схемы рабочих бортов месторождения с использованием ПО, а так же результаты расчета ширины берм, обеспечивающих достаточную устойчивость откосов.

Установлены коэффициенты устойчивости для откоса отвала, а так же схемы рабочих транспортного и бестранспортного уступов для анализируемого месторождения. Кроме того, установлено влияние неопределенности исходных данных на вероятность обрушения на месторождении и определены зависимости коэффициента запаса устойчивости от удельной нагрузки на уступ при разработке месторождения.

В результате расчетов устойчивости откосов отвалов на месторож-

дении было установлено, что откосы отвалов устойчивы при оставлении берм между ярусами.

На основании построенной модели участка отработки месторождения установлено, что особое внимание за устойчивостью следует уделить рабочим бортам карьера и западному отвалу вскрышных пород.

Список литературы

1. Немова Н.А., Бельш Т.А. Геомеханическая оценка параметров устойчивости откосов бортов и уступов при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 11. С. 109–120. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2355>.

2. Шамаев М. К., Ташкулов А. А. Эффективность отработки вскрыши высокими уступами на месторождениях полезных ископаемых при открытой разработке // Маркшейдерия и недропользование. 2021. № 4 (114). С. 20-22.

3. Рыжова Л. П., Носова Е. В. К вопросу эффективности отработки техногенных месторождений рудных полезных ископаемых // Горный Информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 8. с. 49-55.

4. Stavropoulou M., Xiroudakis G. Fracture Frequency and Block Volume Distribution in Rock Masses // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020. № 10 (53). С. 4673–4689. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02172-6>.

5. Luo X., Yu, Q., Yu, Q. Evaluation on the stability of expressway embankment combined with L-shaped thermosyphons and insulation boards in warm and ice-rich permafrost regions // Transportation Geotechnics. 2021. Т. 30. 30,100633 <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100633>.

6. Amagu C. A., Zhang C., Kodama Jun-Ichi. Displacement Measurements and Numerical Analysis of Long-Term Rock Slope Deformation at Higashi-Shikagoe Limestone Quarry, Japan // Advances in Civil Engineering. 2021. (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/1316402>.

7. Beregovoi D. V., Younes J. A., Mustafin M. G. Monitoring of Quarry Slope Deformations with the Use of Satellite Positioning Technology and Unmanned Aerial Vehicles // Procedia Engineering. 2017. №189. С. 737–743. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.116>.

8. Управление производственной безопасностью на горнодобывающих предприятиях Казахстана / З.С. Гельманова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1. С. 184-198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-184-198>.

9. Смолин А.В. О проектировании системы обеспечения безопасности труда на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5-2. С. 233-242. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_233.

10. Виноградова О.В. Роль персонала в обеспечении безопасности на угледобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1. С. 64-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-64-76>.

11. Яницкий Е. Приоритет - обеспечение безопасного ведения горных работ в карьере // Инженерная защита. 2016. № S2 (13). С. 62-66.

12. Прогнозирование устойчивости бортов карьера с учетом временного фактора / Ш.Р. Уринов [и др.] // Journal of Advances in Engineering Technology. 2021. № 1. <https://doi.org/10.24412/2181-1431-2021-1-39-42>

13. Construction of Filling Body Instability Failure Warning Model Under Single-Side Unloading Condition / C. Liu [and others] // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2022. 55(7). С. 4257-4269. DOI: 10.1007/s00603-022-02864-1.

14. Решетняк С.П., Федотова Ю.В., Савченко С.Н. Особенности проектирования формы глубоких карьеров с учетом напряженно-деформированного состояния вмещающего массива горных пород // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 169-173.

15. Жабко А. В. О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах // Проблемы недропользования. 2018. № 3 (18). С. 96-107.

16. Сравнительный анализ методов расчета запаса устойчивости бортов нагорных карьеров / К.Ж. Усенов [и др.] // Вестник Жалал-Абадского государственного университета. 2021. № 4 (49). С. 224-229.

17. Zhao L., You G. Rainfall affected stability analysis of Maddingley Brown Coal eastern batter using Plaxis 3D // Arabian Journal of Geosciences. 2020. 13(20). 1071 <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06038-7>.

18. Comparison of full-scale rockfall tests with 3D complex-shaped discrete element simulations / B. Garcia [and others] // Engineering Geology. 2022. (310). 310,106855 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106855>.

19. Surrounding Rock Failure Mechanism and Long-Term Stability of the Heidong Large Ancient Underground Caverns / Gao B. Yang [and others] // Geotechnical and Geological Engineering. 2022. № 10 (40). С. 4975–4990. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02194-7>.

20. Gottron D., Henk A. Upscaling the Mechanical Properties of a Fractured Rock Mass Using the Lattice-Spring-Based Synthetic Rock Mass (LS-SRM) Modeling Approach—Comparison of Discontinuum, Continuum and Empirical Approaches // Geosciences (Switzerland). 2022. 12(9). С.343. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090343>.

21. Назаренко Н. В., Хоменко С. А. Инженерные методы расчета устойчивости уступов бортов карьеров и отвалов в программном комплексе «K-MINE: Расчет устойчивости» // Рациональное освоение недр. 2016.

№ 1. С.64-67.

22. Козырев А. А., Панин В. И. Развитие геомеханических исследований в Горном институте КНЦ РАН // Труды Кольского Научного Центра РАН. 2020. № 6–19 (11). С. 30-44. <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2020.6.19.003>.

23. Математические основы расчета устойчивости склонов и бортов карьеров методом конечных элементов / Г. С. Исаева [и др.] // Современные проблемы механики. 2018. № 32 (2). С. 30-41.

24. Юшманов П. И. Расчет устойчивости борта карьера с использованием результатов напряженно-деформированного состояния прибортового массива // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 349-350.

25. Бас Н.С., Костин В.Н. Проектирование программного обеспечения для расчета устойчивости откосных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 11. С. 33-46.

26. Gottron D., Henk A. Upscaling of fractured rock mass properties – An example comparing Discrete Fracture Network (DFN) modeling and empirical relations based on engineering rock mass classifications. // Engineering Geology. 2021. 294,106382 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106382>.

27. Барулин А.И. Аналитический способ оценки устойчивости открытых горных выработок методом многоугольника сил // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 5. С. 71-81.

28. Ческидов В.В. Разработка комплексной системы инженерногеологического и гидрогеологического контроля безопасности эксплуатации горнотехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 9. С. 358-368.

29. Жабко А.В. О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах // Проблемы недропользования. 2018. № 3 (18). С. 96-107.

30. Седусова Ю.А., Клевеко В.И. Определение устойчивости откоса грунтового массива с помощью программного комплекса "Geostudio" // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 2. С. 53-58.

31. Новоженин С. Ю., Митусова Н. М. Оценка устойчивости бортов карьеров, отвалов горных пород на основе метода математического моделирования с использованием программного комплекса «Plaxis 3d» // Маркшейдерский Вестник. 2022. № 1 (146). С. 33-38.

32. Модели грунтов реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е.С. Егорова [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 3 (42). С. 31-60.

33. Hemeda S. Geotechnical modelling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D // International Journal of Geo-Engineering. 2022. № 1 (13). S.9 <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00174-7>.

34. Meng, Q., Zhang, C., Chen, J., Yang, G. Application of 3D Printing Technology in the Mechanical Testing of Complex Structural Rock Masses / Y. Xia // *Geofluids*. 2021. №7278131 <https://doi.org/10.1155/2021/7278131>.

35. Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей // *Проблемы недропользования*. 2017. №1(12). С. 132-137.

36. Спирин В.И., Ливинский И.С., Хормазабаль Э. Оптимизация конструкций бортов карьеров на основе оценки рисков // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019. Вып. 3. С. 317-331.

37. A novel approach to determine rock mechanical parameters using non-invasive geophysical methods /M. Hasan [and others] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022. 160,105260 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105260>.

38. Hafeez W., Aziz N. Bayesian new group chain sampling plan for Poisson distribution with gamma prior through quality regions. // *Computers and Industrial Engineering*. 2022. 174,108826 <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108826>

39. Cylindrical cavity expansion responses in anisotropic unsaturated soils under plane stress condition / H. Chen [and others] // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. 14(6), с. 1989-2002. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.015>

40. Dynamic fracture and deformation responses of rock mass specimens containing 3D printing rough joint subjected to impact loading / H. Su [and others] // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022. 8(6),186. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00501-3>.

Беляев Евгений Николаевич, руководитель центра маркшейдерско-геодезических инноваций, belyaeven@irk.ru, Россия, Иркутск Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Бурдонов Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доц., slimbul@inbox.ru, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Мурзин Николай Владимирович, канд. техн. наук, доц., murzinny@istu.edu, Россия, Иркутск, Иркутский национальный исследовательский технический университет

*PREDICTION AND EVALUATION OF THE STABILITY OF SIDES, SECTION LIPS
AND SLOPES IN A COAL DEPOSITS USING THE GEOSTUDIO AND PLAXIS
3D SOFTWARE COMPLEXES*

E.N. Belyaev, A.E. Burdonov, N.V. Murzin

The work is devoted to the issues of predicting and assessing the stability of the sides, ledges of sections and slopes of dumps using the Geostudio and Plaxis 3D software

packages. The calculations were carried out on the example of a coal deposit located in the Republic of Tyva. In the process of performing the work, the physical and mechanical characteristics of the soils were established, the design schemes for deformation and the assessment of the stability of the sides and ledges of the quarry were analyzed. Using the presented software systems, the stability of dumps, sides and ledges of the open pit was calculated. In addition, the influence of the uncertainty of the initial data on the probability of collapse in the field was established and the dependences of the stability factor on the specific load on the ledge during the development of the field were determined. Some differences in the obtained values with the use of software products are fixed. As a result of calculations of the stability of the dump slopes at the field, it was found that the dump slopes are stable when berms are left between the tiers.

Key words: stability assessment, ledge, slope, edge, geomechanics, Geostudio, Plaxis.

Belyaev Evgeny Nikolaevich, head of the center for surveying and geodetic innovations, belyaeven@irk.ru, Russia, Irkutsk Irkutsk National Research Technical University,

Alexander E. Burdonov, candidate of technical sciences, assoc., slimbul@inbox.ru, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University,

Murzin Nikolay Vladimirovich, candidate of tech. sciences, assoc., murzinnyv@istu.edu, Russia, Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University

Reference

1. Nemova N.A., Belsh T.A. Geomechanical assessment of the stability parameters of the slopes of the sides and ledges during the development of the deposit of apatite-nepheline ores "Oleniy Ruchey" // *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering.* 2019. Vol. 330. No. 11. pp. 109-120. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/11/2355>.
2. Shamaev M. K., Taskulov A. A. Efficiency of overburden by high ledges at mineral deposits in open-pit mining // *Surveying and subsoil use.* 2021. No. 4 (114). pp. 20-22.
3. Ryzhova L. P., Nosova E. V. On the issue of the efficiency of mining technogenic deposits of ore minerals // *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and Technical Journal).* 2015. No. 8. pp. 49-55.
4. Stavropol M., Xirudakis G. The frequency of destruction and the distribution of blocks by volume in rock massifs // *Mechanics of rocks and mining engineering.* 2020. No. 10 (53). pp. 4673-4689. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02172-6>.
5. Lo H., Yu, K., Yu, K. Assessment of the stability of the embankment of the expressway in combination with L-shaped thermosiphons and insulation plates in warm and ice-rich permafrost areas // *Transport Geotechnics.* 2021. Vol. 30. 30,100633 <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100633>
6. Amagu K. A., Zhang K., Kodama Jun-Ichi. Displacement measurements and numerical analysis of long-term deformation of the rock slope at the Hi-Gashi-Shikagoe limestone quarry, Japan // *Achievements of civil engineering.* 2021. (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/1316402>.

7. Beregovoy D. V., Yunes J. A., Mustafin M. G. Monitoring of deformations of quarry slopes using satellite positioning technology and unmanned aerial vehicles // *Procedia Engineering*. 2017. No. 189. pp. 737-743. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.116>.
8. Industrial safety management at mining enterprises of Kazakhstan / Z.S. Gelmanova [et al.] // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021. No. 2-1. pp. 184-198. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-184-198>.
9. And Smolin.V. On the design of the labor safety system at mining enterprises // *Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2022. No. 5-2. pp. 233-242.
https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_52_0_233
10. Vinogradova O.V. The role of personnel in ensuring safety at coal mining enterprises // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021. No. 2-1. pp. 64-76. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-64-76>.
11. Yanitsky E. Priority - ensuring safe mining operations in a quarry // *Engineering protection*. 2016. No. S2 (13). pp. 62-66.
12. Forecasting the stability of quarry sides taking into account the time factor / Sh.R. Urinov [et al.] // *Journal of achievements in the field of engineering technologies*. 2021. No. 1. <https://doi.org/10.24412/2181-1431-2021-1-39-42>
13. Construction of a warning model about the instability of the filling housing during unilateral unloading / K. Liu [and others] // *Rock mechanics and rock engineering*. 2022. 55(7). pp. 4257-4269. DOI: 10.1007/s00603-022-02864-1.
14. Reshetnyak S.P., Fedotova Yu.V., Savchenko S.N. Features of designing the shape of deep quarries taking into account the stress-strain state of the enclosing rock mass // *Notes of the Mining Institute*. 2012. Vol. 197. pp. 169-173.
15. Zhabko A.V. On problems and modern methods of assessing the stability of slopes in open-pit mining // *Problems of Subsoil use*. 2018. No. 3 (18). pp. 96-107.
16. Comparative analysis of methods for calculating the stability margin of sides of upland quarries / K.Zh. Usenov [et al.] // *Bulletin of Jalal-Abad State University*. 2021. No. 4 (49). pp. 224-229.
17. Zhao L., You G. Analysis of the effect of precipitation on the stability of the eastern test of brown coal Maddingly using Plaxis 3D // *Arabian Journal of Geosciences*. 2020. 13(20). 1071 <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06038-7>.
18. Comparison of full-scale rockfall tests with 3D modeling of discrete elements of complex shape / B. Garcia [and others] // *Engineering geology*. 2022. (310). 310,106855 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106855>.
19. The mechanism of destruction of surrounding rocks and long-term stability of large ancient underground caves Haidong / Gao B. Yang [and others] // *Geotechnics and geological engineering*. 2022. № 10 (40). C. 4975-4990. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02194-7>.
20. Gottron D., Henk A. Scaling up the mechanical properties of a fractured rock mass using an approach to modeling a synthetic rock mass based on a lattice-spring system (LS-SRM) — comparison of discontinuous, continuous and empirical approaches // *Geosciences (Switzerland)*. 2022. 12(9). p.343. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090343>.
21. Nazarenko N. V., Khomenko S. A. Engineering methods for calculating the stability of ledges of sides of quarries and dumps in the software complex "k-mines: Calculation of stability" // *Rational development of the subsoil*. 2016. No. 1. pp.64-67.
22. Kozyrev A. A., Panin V. I. Development of geomechanical research at the Mining Institute of the KNC RAS // *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian*

Academy of Sciences. 2020. № 6-19 (11). pp. 30-44. <https://doi.org/10.37614/2307-5252.2020.6.19.003>.

23. Mathematical foundations for calculating the stability of slopes and bores of quarries by the finite element method / G. S. Isaeva [et al.] // Modern problems of mechanics. 2018. No. 32 (2). pp. 30-41.

24. Yushmanov P. I. Calculation of the stability of the side of the quarry using the results of the stress-strain state of the instrument array // Notes of the Mining Institute. 2012. Vol. 199. pp. 349-350.

25. Bas N.S., Kostin V.N. Designing software for calculating the stability of slope structures // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2016. No. 11. pp. 33-46.

26. Gottron D., Henk A. Scaling the properties of a fractured rock mass – an example of comparing the modeling of a discrete network of cracks (DFN) and empirical relationships based on engineering classifications of a rock mass. // Engineering Geology. 2021. 294,106382 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106382>.

27. Barulin A.I. An analytical method for assessing the stability of open-pit mine workings by the polygon of forces method // Izvestia of higher educational institutions. Mining magazine. 2018. No. 5. pp. 71-81.

28. Cheskidov V.V. Development of a complex system of engineering-geological and hydrogeological control of safety of operation of mining facilities // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2016. No. 9. pp. 358-368.

29. Zhabko A.V. On problems and modern methods of assessing the stability of slopes in open-pit mining // Problems of subsoil use. 2018. No. 3 (18). pp. 96-107.

30. Sedusova Yu.A., In Kleveko.I. Determination of the stability of the slope of the soil massif using the Geostudio software package // Modern technologies in construction. Theory and practice. 2019. Vol. 2. pp. 53-58.

31. Novozhenin S. Yu., Mitusova N. M. Assessment of the stability of the sides of quarries, rock dumps based on the method of mathematical modeling using the software complex "Flaxis 3d" // Surveying Bulletin. 2022. No. 1 (146). pp. 33-38.

32. Soil models implemented in CAD office and Flaxis 3D software complexes / E.S. Egorova [et al.] // Unique Construction of buildings and structures. 2016. No. 3 (42). pp. 31-60.

33. Khemeda S. Geotechnical modeling and subsurface analysis of complex underground structures using PLAXIS 3D // International Journal of Geoengineering. 2022. No. 1 (13). p.9 <https://doi.org/10.1186/s40703-022-00174-7>

34. Meng K., Zhang K., Chen J., Yang G. Application of 3D printing technology in mechanical testing of mountain massifs of complex structure / Yu. Xia // Geofluids. 2021. №7278131 <https://doi.org/10.1155/2021/7278131>.

35. Dmitriev S.V. Modeling of the stress-strain state of rock massifs taking into account inhomogeneities // Problems of subsurface use. 2017. No.1(12). pp. 132-137.

36. Spirin V.I., Livinsky I.S., Hormazabal E. Optimization of quarry side structures based on risk assessment // Izvestiya Tula State University. Earth sciences. 2019. Issue 3. pp. 317-331.

37. A new approach to the determination of mechanical parameters of rocks using non-invasive geophysical methods /M. Hassan [and others] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022. 160,105260 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.105260>.

38. Hafiz U., Aziz N. Bayesian new sampling plan of the group chain for the distribution of Poisson with gamma a priori by quality domains. // Computers and Industrial Engineering. 2022. 174,108826 <https://doi.org/10.1016/j.cie>. 2022. 108826

39. The reaction of expansion of a cylindrical cavity in anisotropic unsaturated soils under conditions of plane stress / H. Chen [and others] // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022. 14(6), pp. 1989-2002. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.03.015>

40. Dynamic reactions to the destruction and deformation of rock mass samples containing a rough seam for 3D printing subjected to shock loading / H. Su [and others] // Geomechanics and geophysics for geoenergy and georesources. 2022. 8(6), 186. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00501-3>.

УДК 622.271:622.68

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДОЛОГИИ АДАПТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНО-КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА И РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАРЬЕРА

А.В. Глебов

Исследование процессов взаимной адаптации системы автомобильно-конвейерного транспорта и развивающейся с ростом глубины горнотехнической системы карьера с целью управления взаимным соответствием этих систем, является актуальной научной проблемой, решение которой направлено на развитие теории формирования транспортных систем, позволяющее повысить эффективность применения автомобильно-конвейерного транспорта при разработке глубокозалегающих рудных месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: горнотехническая система, автомобильно-конвейерный транспорт, геотехнические комплексы, переходные процессы, взаимная адаптация, методология, понятия и определения.

Введение

Для ретроспективного обзора методов исследования, используемых различными учёными при защите докторских диссертаций по проблеме карьерного транспорта, были рассмотрены результаты исследований ведущих ученых: Е.Ф. Шешко, М.В. Васильева (1961 г.), Б.В. Фаддеева (1967 г.), М.Г. Потапова (1971 г.), А.Н. Шилина (1972 г.), В.Л. Яковлева (1978 г.), А.А. Кулешова (1982 г.), М.С. Четверика (1987 г.), В.А. Галкина (1988 г.), В.П. Смирнова (1990 г.), С.Л. Фесенко (1991 г.), С.Ж. Галиева (1997 г.), С.П. Решетняка (1998 г.), Ю.И. Леся (1999 г.), А.С. Довженка (2002 г.), Л.И. Андреевой (2004 г.), Зырянова И.В. (2006 г.), Анистратова К.Ю. (2013 г.) [1-18].

Исследования позволили установить характер изменения методологии исследований в период 1930 – 2020 гг. Установлено, что развитие науки имеет кумулятивный характер. На каждом новом этапе развития происходит концентрация, переосмысление и уточнение результатов, по-