

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146>

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРОВ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Научная статья

Литонин В.А.<sup>1,\*</sup>, Тальгамер Б.Л.<sup>2</sup>, Рославцева Ю.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-2783-1616;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-1413-0116;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-8799-7269;

<sup>1,2,3</sup> Иркутский научный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (slavalitonin[at]gmail.com)

### Аннотация

Приведены результаты исследований по оценке устойчивости бортов карьеров, сложенных четвертичными отложениями. Для анализа устойчивости использован метод предельного равновесия для разных моделей бортов карьера применительно к россыпным месторождениям. Анализ устойчивости бортов выполнен с помощью программного обеспечения Geoslope Slope/W. Результаты исследования показали, что при увеличении плотности пород в сухом состоянии параметры сдвига снижаются, сцепление и угол внутреннего трения растут, а при увеличении влажности пород коэффициент устойчивости уменьшается, на что в большей степени влияют угол внутреннего трения и плотность пород. С увеличением высоты борта (уступа) коэффициент устойчивости при прочих равных параметрах снижается.

**Ключевые слова:** россыпные месторождения, четвертичные отложения, устойчивость бортов, коэффициент устойчивости.

## AN ANALYSIS OF STABILITY OF QUARRY SIDES IN QUATERNARY DEPOSITS

Research article

Litonin V.A.<sup>1,\*</sup>, Talgamer B.L.<sup>2</sup>, Roslavtseva Y.G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-2783-1616;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-1413-0116;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-8799-7269;

<sup>1,2,3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

\* Corresponding author (slavalitonin[at]gmail.com)

### Abstract

The results of research on stability evaluation of quarry sides composed of quaternary deposits are presented. To analyse stability, the method of limit equilibrium for different models of quarry sides was used for alluvial mines. The stability of the sides was analysed using Geoslope Slope/W software. The results of the study showed that with increasing rock density in the dry state, shear parameters decrease, cohesion and angle of internal friction increase, and with increasing rock moisture content the stability coefficient decreases, which is more affected by the angle of internal friction and rock density. The stability coefficient decreases as the height of the ledge increases, all other parameters being equal.

**Keywords:** alluvial mines, quaternary deposits, side stability, stability coefficient.

### Введение

Повышение эффективности разработки месторождений полезных ископаемых открытым способом в условиях сложной экономической ситуации многих горных предприятий требует оптимизации параметров горных работ. Одним из способов снижения объемов горных работ является уменьшение угла нерабочего борта карьера при обеспечении надежной устойчивости откосов. Вместе с тем, необоснованное увеличение углов уступов и бортов карьеров может привести к их деформации в различных формах [1].

В литературе описан ряд исследований, в которых на основе многочисленных экспериментов, в основном в Институте инженерной геологии и гидрогеологии (ВНИИМИ), были определены коэффициенты структурных ослаблений пород. Данная методика требует тщательного изучения конкретного горного массива и определения искомого коэффициента на основе анализа структуры пород [1].

Существующие методы расчета устойчивости бортов карьеров [2], [3], [4] не всегда напрямую учитывают влажность и плотность пород, которые на месторождениях, сложенных рыхлыми отложениями, изменяется в очень широких пределах и оказывают значительное влияние на углы откосов уступов и бортов карьеров. Как показывают полевые наблюдения, с увеличением влажности пород на россыпных месторождениях, с 15% до 25% угол откоса уступа высотой 15 м, сложенного песчано-глинистыми отложениями, уменьшается с 60-65° до 45-50°. Уменьшение плотности пород на россыпях также влечет заметное уменьшение углов откосов уступов и бортов карьеров.

При расчете устойчивости бортов карьеров на россыпных месторождениях необходимо учитывать ряд особенностей геологического строения последних. Наиболее часто встречающийся тип пород на россыпях – это четвертичные отложения. Влажность этих отложений очень сильно влияет на устойчивость, что, в свою очередь, обуславливает параметры горных работ. Эксплуатация карьеров в четвертичных отложениях нередко сопровождается нарушением устойчивости бортов. Как правило, причиной развития геомеханических процессов является

несоответствие принятых геометрических параметров уступов и карьера в целом физико-механическим характеристикам пород. Авторами проведено исследование устойчивости прибортового массива, сложенного четвертичными отложениями, с разными значениями влажности и плотности пород.

Цель исследования заключается в анализе результатов расчета устойчивости прибортового массива, сложенного четвертичными отложениями, с учетом изменения его высоты, а также влажности и плотности пород.

### Методика

Основные показатели устойчивости откосов определяются значениями сдвиговой прочности образца ( $\varphi$  и  $C$ ), коэффициентами поверхностной ослабленности ( $\varphi'$  и  $C'$ ) и уровнем трещиноватости.

Показатель устойчивости каждого горного образца должен отражать прочность массива, а не только индивидуального блока. Это может быть учтено с помощью коэффициента ослабления, который отражает соотношение сцепления в массиве к сцеплению в отдельном структурном блоке (образце) или отношение сопротивления сжатию в массиве к сопротивлению сжатию в образце. Прочностные характеристики трещиноватого массива влияет фактор интенсивности трещин, который выражается количеством трещин на определенную длину.

Для оценки устойчивости принят метод Бишопа, который представляет собой метод анализа устойчивости откосов, используемый для определения коэффициента запаса прочности (FS) откосов при различных условиях нагрузки [3]. Метод был разработан В.В. Бишопом в 1950-х годах и широко используется в инженерно-геологической практике.

В упрощенном методе Бишопа удовлетворяются условия равновесия общих моментов и вертикальных сил (рисунок 1).

Однако для отдельных блоков не удовлетворяются условия равновесия моментов и равновесия горизонтальных сил. Несмотря на то, что условия равновесия удовлетворяются не полностью, тем не менее метод обеспечивает хорошие результаты и рекомендуется для проведения большинства практических расчетов, для которых поверхность скольжения может быть аппроксимирована кругом [4], [5], [6].

Коэффициент устойчивости FS (Factor of Safety) вычислен путём последовательной итерации следующего отношения:

$$FS = \frac{\sum_i (c_i b_i + W_i \tan \varphi_i (\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{FS}))}{\sum_i W_i \sin \alpha_i},$$

где  $FS$  – коэффициент запаса устойчивости;  $c_i$  – удельное сцепление пород;  $b_i$  – длина плоскости скольжения;  $a_i$  – угол плоскости скольжения;  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения;  $W_i$  – вес блока.

Вследствие того, что коэффициент устойчивости FS входит в обе части уравнения, для его решения необходимо задаться предположением о начальном значении коэффициента устойчивости. Далее решение данного уравнения сводится к итерационному процессу (до тех пор, пока вычисляемый FS не окажется меньше заданной допустимой погрешности).

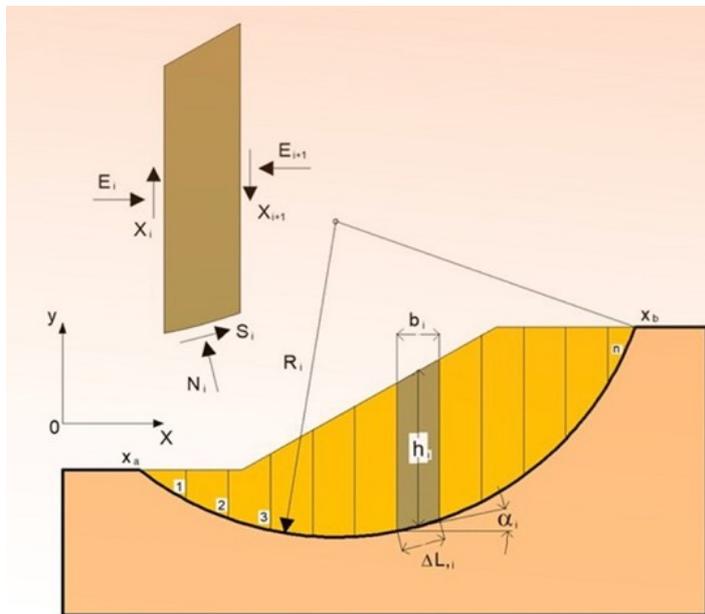


Рисунок 1 - Многоугольник сил, построенный на основе метода Бишопа

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.1>

Бишоп провел сопоставление коэффициентов запаса, полученных с помощью упрощенного и более строгих методов, которые удовлетворяют всем условиям равновесия. Он установил, что вертикальная составляющая сил взаимодействия может быть принята равной нулю, не приводя к существенным ошибкам, обычно с расхождением менее 1% [7], [8], [10].

Следовательно, упрощенный подход, в котором вертикальные составляющие сил взаимодействия приводятся к нулю, обеспечивает тот же результат, что и строгий, при котором удовлетворяются все условия равновесия.

### Результаты

Для оценки влияния влажности и плотности пород исследуемого прибортового массива, сложенного четвертичными отложениями, использовался пакет Slope/W программного обеспечения Geostudio. В качестве исходных физико-механических характеристик пород для прибортового массива взяты средние значения объемного веса, сцепления, угла внутреннего трения четвертичных отложений. Гранулометрический состав пород показан в таблице 1.

Таблица 1 - Гранулометрический состав четвертичных отложений

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.2>

Наименование пород	Гранулометрический состав	
	Размер фракции, мм	Выход класса, %
Четвертичные отложения	+200	14,0
	-200+100	6,2
	-100+50	22,0
	-50+20	11,5
	-20+10	6,6
	-10+5	11,9
	-5+1	16,9
	-1+0,05	6,1
	-0,05	4,8

Для краткосрочного анализа изменчивости коэффициентов устойчивости от влажности и плотности пород использовались 4 модели: это однородный борт с варьированием его высоты, влажности и плотности породы. Высота уступов принята равной 5 м, ширина берм 2 м, угол откоса борта 45°. В качестве пород приняты разнозернистые породы, свойственные россыпным месторождениям. Результаты расчета угла внутреннего трения и удельного сцепления пород для каждой модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчетов угла внутреннего трения и удельного сцепления пород

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.3>

№ модели	Высота борта, м	Влажность, %	Плотность, кН/м <sup>3</sup>	Угол внутреннего трения, градус	Удельное сцепление, кН/м <sup>2</sup>
1	10	10	14	26	0,36
			15	27	0,70
			16	35	0,70
2	15	15	14	15	0,63
			15	16	1,12
			16	18	1,20
3	20	20	14	0	0,7
			15	0	1,26
			16	15	1,33
4	25	25	14	0	0,91
			15	0	1,28
			16	10	1,33

Далее с использованием пакета Slope/W программного обеспечения Geostudio [11] построены модели бортов карьера (рисунок 2-5), отстроены плоскости скольжения и определены коэффициенты запаса устойчивости.

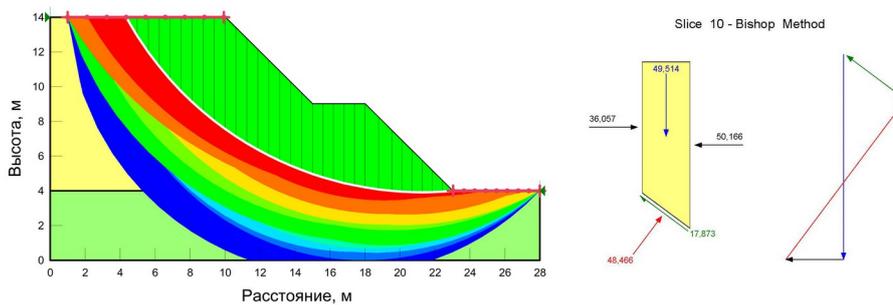


Рисунок 2 - Расчетная модель борта высотой 10 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.4>

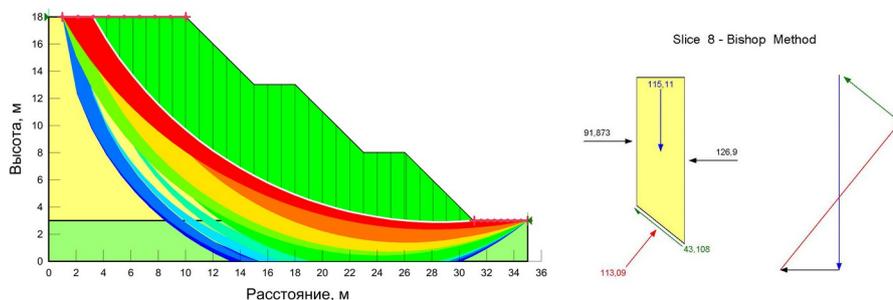


Рисунок 3 - Расчетная модель борта высотой 15 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.5>

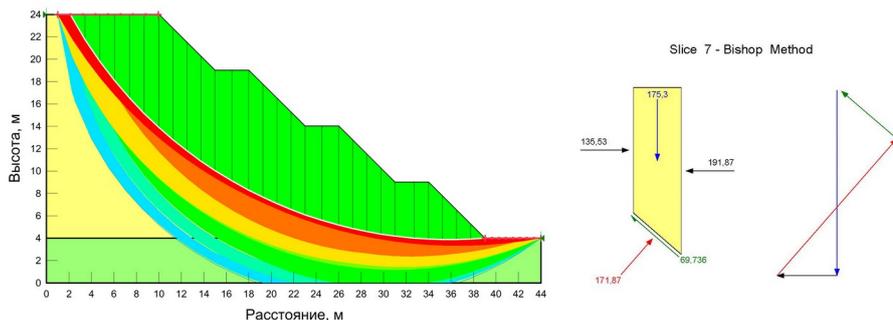


Рисунок 4 - Расчетная модель борта высотой 20 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.6>

Результаты расчётов коэффициентов устойчивости прибортового массива, сложенного четвертичными отложениями, представлены в таблице 3 и на рисунках 6-9.

Таблица 3 - Результаты расчетов коэффициента устойчивости бортов при различной влажности и плотности пород

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.7>

№	Высота, м	Модель 1 (влажность 10%)		Модель 2 (влажность 15%)		Модель 3 (влажность 20%)		Модель 4 (влажность 25%)	
		Плотность,	FS	Плотность,	FS	Плотность,	FS	Плотность,	FS

		кН/м <sup>3</sup>		кН/м <sup>3</sup>		кН/м <sup>3</sup>		кН/м <sup>3</sup>	
1	10	14	1,934	14	1,567	14	1,061	14	0,896
2	10	15	2,279	15	1,821	15	1,416	15	1,427
3	10	16	2,543	16	2,326	16	2,314	16	2,507
4	15	14	1,855	14	1,449	14	0,936	14	0,869
5	15	15	2,010	15	1,567	15	1,110	15	1,260
6	15	16	2,279	16	2,154	16	2,091	16	2,066
7	20	14	1,780	14	1,384	14	0,500	14	0,641
8	20	15	1,800	15	1,529	15	1,064	15	0,981
9	20	16	2,332	16	2,180	16	2,047	16	1,982
10	25	14	1,553	14	0,967	14	0,384	14	0,316
11	25	15	1,700	15	1,440	15	1,060	15	0,971
12	25	16	2,253	16	2,140	16	2,018	16	0,954

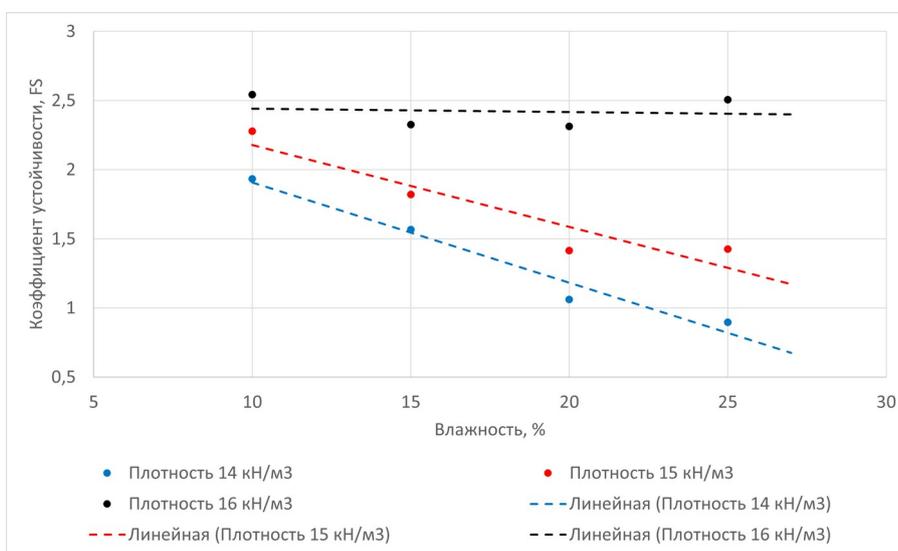


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента устойчивости от влажности пород при высоте борта 10 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.8>

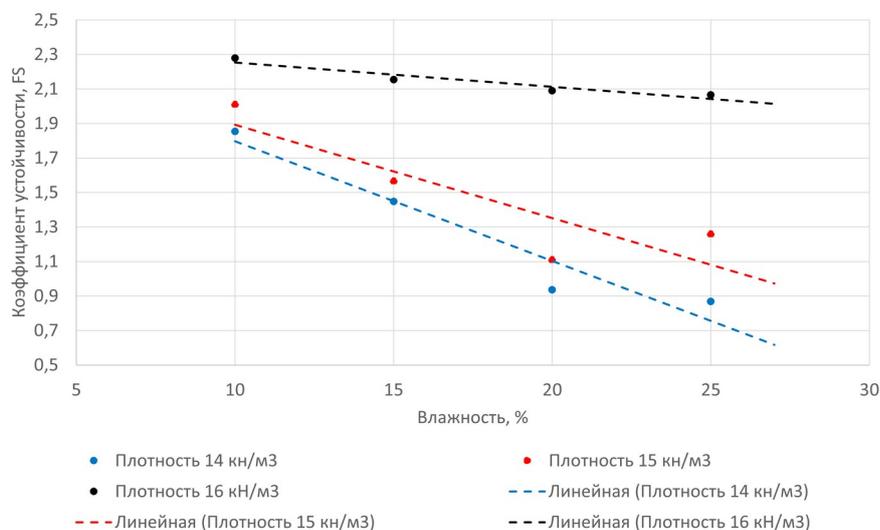


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента устойчивости от влажности пород при высоте борта 15 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.9>

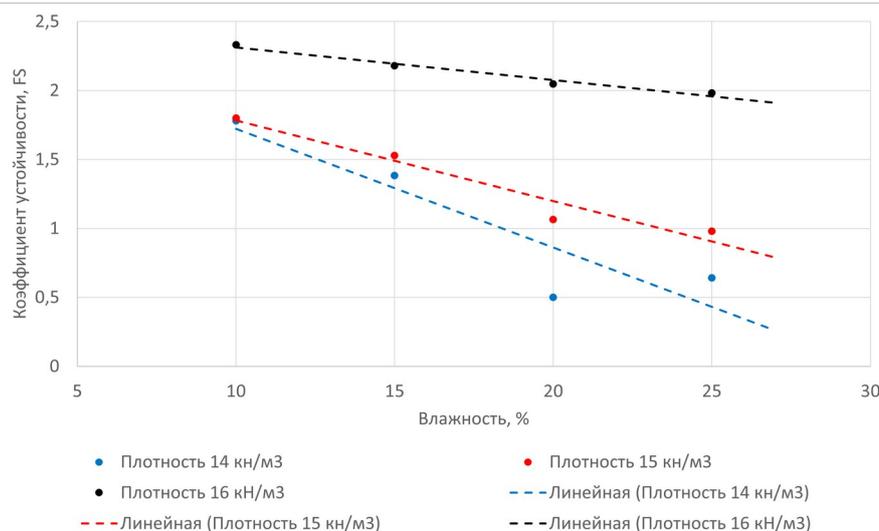


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента устойчивости от влажности пород при высоте борта 20 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.10>

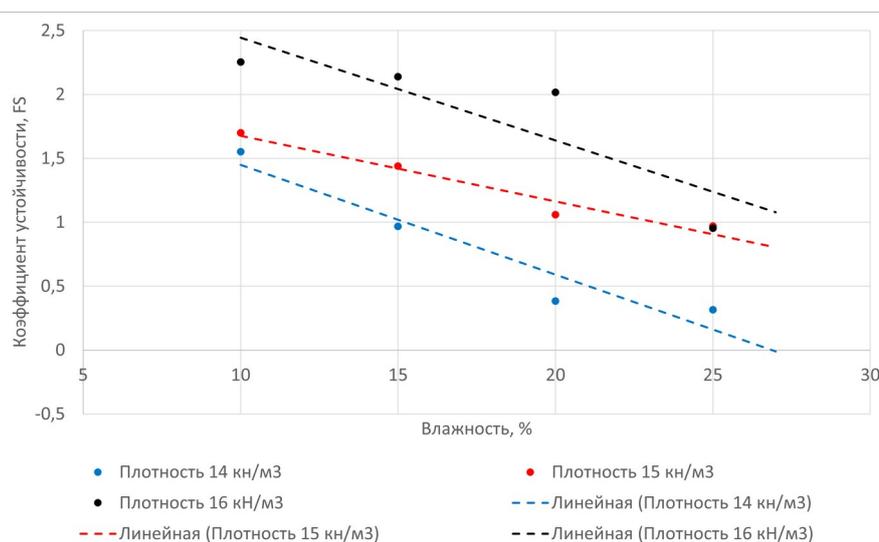


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента устойчивости от влажности пород при высоте борта 25 м  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.146.11>

### Заключение

1. Величина сцепления и угол внутреннего трения рыхлых пород увеличиваются пропорционально их плотности, а также по мере снижения их влажности. По результатам исследования установлено, что угол внутреннего трения рыхлых отложений уменьшается до нуля при достижении влажности пород 20-25% и плотности, близкой к максимальному значению с пористостью не более 15%.

2. Коэффициент устойчивости бортов в рыхлых отложениях растет с увеличением плотности и уменьшением влажности пород. При этом установлено, что с увеличением плотности пород влияние влажности на устойчивость бортов снижается.

3. Для условий разработки россыпных месторождений при увеличении влажности пород с 10 до 25% и высоте бортов разреза 10-25 м рекомендуется уменьшать угол откоса с 65-60° до 45-40°. По мере нарастания высоты бортов с 10 м до 25 м коэффициент запаса устойчивости снижается в 1,2-2,2 раза.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Афанасьев Б.Г. Расчет устойчивости откосов с учетом действующих боковых сил / Б.Г. Афанасьев, И.Б. Шмонин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 1990. — 5. — с. 41-44.
2. Ковров А.С. Влияние сложной геологической структуры и обводненности массива пород на устойчивость откосов карьеров / А.С. Ковров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — 10. — с. 45-50.
3. Исаева Г.С. Математические основы расчета устойчивости склонов и бортов карьеров методом конечных элементов / Г.С. Исаева // Современные проблемы механики; — Вып. 32. — Бишкек: Институт геомеханики и освоения недр Национальной Академии Наук Кыргызской Республики, 2018. — с. 30-41.
4. Poulami G. Effect of Reinforcement on Stability of Slope Using Geo-slope / G. Poulami // International Journal of Computer Application. — 2012. — 3. — p. 29-32.
5. Chen Qun Probabilistic Slope Stability Analysis of a 300m High Embankment / Qun Chen, Li-Ying Chang // ASCE. — 2011. — 1. — p. 452-459.
6. Abdoullah Namdar Geometric in Slope Modelling and Design / Namdar Abdoullah // Journal of Science and Technology. — 2011. — 4. — p. 9-21.
7. Юшманов П.И. Расчет устойчивости борта карьера с использованием результатов напряженно-деформированного состояния прибортового массива / П.И. Юшманов // Записки Горного института. — 2012. — 1. — с. 349-360.
8. Дмитриев С.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с учетом неоднородностей / С.В. Дмитриев // Проблемы недропользования. — 2017. — 1. — с. 132-137.
9. Ammar Rouaiguia Numerical Modelling of Slope Stability Analysis / Rouaiguia Ammar // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. — 2013. — 2. — p. 60-67.
10. Geo-studio 2007 Tutorial Manual GEO-SLOPE international Limited. — 2007 — URL: <https://www.geoslope.com/> (accessed: 01.10.2023)
11. Немова Н.А. Геомеханическая оценка параметров устойчивости откосов бортов и уступов при отработке месторождения апатит-нефелиновых руд «Олений ручей» / Н.А. Немова, Т.А. Бельш // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2019. — 11. — с. 109-120.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Afanas'ev B.G. Raschet ustojchivosti otkosov s uchetom dejstvujuschih bokovyh sil [Calculation of Slope stability Taking into Account the Acting Lateral Forces] / B.G. Afanas'ev, I.B. Shmonin // Proceedings of Higher Educational Institutions. Mining Journal. — 1990. — 5. — p. 41-44. [in Russian]
2. Kovrov A.S. Vlijanie slozhnoj geologicheskoy struktury i obvodnennosti massiva porod na ustojchivost' otkosov kar'erov [The Influence of the Complex Geological Structure and Waterlogging of the Rock Mass on the Stability of the Slopes of Quarries] / A.S. Kovrov // Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). — 2015. — 10. — p. 45-50. [in Russian]
3. Isaeva G.S. Matematicheskie osnovy rascheta ustojchivosti sklonov i bortov kar'erov metodom konechnyh elementov [Mathematical Basis of Calculations of Slope Stability and Pit Walls Stability by the Method of Finite Elements] / G.S. Isaeva // Sovremennye problemy mekhaniki [Contemporary Problems in Mechanics]; — Issue 32. — Bishkek: Institute of Geomechanics and Subsoil Development of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, 2018. — p. 30-41. [in Russian]
4. Poulami G. Effect of Reinforcement on Stability of Slope Using Geo-slope / G. Poulami // International Journal of Computer Application. — 2012. — 3. — p. 29-32.
5. Chen Qun Probabilistic Slope Stability Analysis of a 300m High Embankment / Qun Chen, Li-Ying Chang // ASCE. — 2011. — 1. — p. 452-459.
6. Abdoullah Namdar Geometric in Slope Modelling and Design / Namdar Abdoullah // Journal of Science and Technology. — 2011. — 4. — p. 9-21.
7. Jushmanov P.I. Raschet ustojchivosti borta kar'era s ispol'zovaniem rezul'tatov naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija pribortovogo massiva [About Determination of Potential Sliding Surface Based on Stress Analysis in Pit Wall Solid] / P.I. Jushmanov // Notes of the Mining Institute. — 2012. — 1. — p. 349-360. [in Russian]
8. Dmitriev S.V. Modelirovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija massivov gornyh porod s uchetom neodnorodnostej [Simulation the Stressed-deformed Rock Masses State Taking into Account the Heterogeneities] / S.V. Dmitriev // Problems of Mineral Resources Utilization. — 2017. — 1. — p. 132-137. [in Russian]
9. Ammar Rouaiguia Numerical Modelling of Slope Stability Analysis / Rouaiguia Ammar // International Journal of Engineering Science and Innovative Technology. — 2013. — 2. — p. 60-67.

10. Geo-studio 2007 Tutorial Manual GEO-SLOPE international Limited. — 2007 — URL: <https://www.geoslope.com/> (accessed: 01.10.2023)

11. Nemova N.A. Geomechanicheskaja otsenka parametrov ustojchivosti otkosov bortov i ustupov pri otrabotke mestorozhdenija apatit-nefelinovyh rud «Olenij ruchej» [Geomechanical Assessment of Stability Parameters of Slopes and Benches during the Development of the Oleniy Ruchey Apatite-nepheline Ore Deposit] / N.A. Nemova, T.A. Bel'sh // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of Geo Resources. — 2019. — 11. — p. 109-120. [in Russian]