

УДК 622.271.33:622.83

**Яковлев Алексей Викторович**  
кандидат технических наук,  
заведующий сектором устойчивости  
бортов карьеров,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [lubk\\_igd@mail.ru](mailto:lubk_igd@mail.ru)

**Шимкив Екатерина Сергеевна**  
научный сотрудник,  
сектор устойчивости бортов карьеров,  
Институт горного дела УрО РАН

### МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО ОБОСНОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ УСТУПА С ПРОТЯЖЕННОЙ ТРЕЩИНОЙ В ГРАВИТАЦИОННО-ТЕКТОНИЧЕСКОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ\*

#### Аннотация:

Разработаны методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений, проведены геомеханические расчеты устойчивости уступов и участков бортов в гравитационно-тектоническом поле напряжений при различных углах падения и свойствах заполнителя протяженной трещины. По результатам проведенных исследований разработана методика изучения влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов и компьютерные программы в редакторе Excel для расчетного обоснования условий возникновения тектонических подвижек прибортового массива по протяженной трещине и предельных параметров уступа или группы уступов в зависимости от прочностных свойств протяженной трещины, угла ее падения и величины максимального главного напряжения при его ориентировке согласно приоткосной части борта.

**Ключевые слова:** Карьер, уступ, структура массива горных пород, протяженная трещина, тектонические напряжения, расчет устойчивости.

DOI: 10.25635/2313-1586.2024.04.056

**Yakovlev Alexey V.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Sector of Stability  
of Quarry Sides,  
Institute of Mining UB RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [lubk\\_igd@mail.ru](mailto:lubk_igd@mail.ru)

**Shimkiv Ekaterina S.**  
Researcher,  
Quarry Side Stability Sector,  
Institute of Mining UB RAS

### METHOD FOR CALCULATING THE STABILITY OF A LEDGE WITH AN EXTENDED CRACK IN THE GRAVITATIONAL AND TECTONIC STRESS FIELD

#### Abstract:

Methodological foundations have been developed for the formation of ledges and sections of sides on the limiting contour of quarries under conditions of a gravitational and tectonic stress field, geomechanical calculations of the stability of ledges and sections of sides in a gravitational and tectonic stress field at various angles of incidence and properties of the filler of an extended crack have been carried out. Based on the results of the research, a methodology has been developed to study the effect of tectonic stresses on the stability of ledges and sections of sides and computer programs in the Excel editor to calculate the conditions for the occurrence of tectonic movements of the instrument array along an extended crack and the limiting parameters of the ledge or group of ledges, depending on the strength properties of the extended crack, its angle of incidence and the magnitude of the maximum main stress when it is oriented according to the sloping part of the side.

**Key words:** quarry, ledge, rock mass structure, extended crack, tectonic stresses, stability calculation.

### Введение

Статья является продолжением исследований, приведенных в статье [1], в которой отражены этапы развития нормативной базы в области обеспечения устойчивости бортов карьеров, обоснованы дополнительные факторы, влияющие на устойчивость уступов и участков бортов карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений, определены основные направления изучения прибортовых массивов на действующих

\* Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР.

карьерах, показана необходимость изучения тектонических напряжений в массивах скальных горных пород и учета их воздействия на устойчивость карьерных откосов, разработан алгоритм обоснования параметров уступов и участков бортов карьеров в тектонически напряженных массивах горных пород, проведена расчетная оценка подвижности массива по протяженным трещинам в зависимости от прочностных свойств заполнителя и тектонических напряжений.

#### *Постановка задачи*

Устойчивость уступов в скальных породах без учета тектонических напряжений зависит от ориентировки и прочностных свойств поверхностей ослабления в массиве. Наибольшее влияние на устойчивость уступов оказывают протяженные трещины, имеющие падение в направлении выработанного пространства карьера и низкие прочностные свойства по поверхности ослабления.

Расчеты устойчивости уступов, подсеченных протяженной трещиной, производятся в соответствии с методикой ВНИМИ [2] и «Правилами...» [3] по формуле:

$$H = \frac{2C'_n \sin \alpha \cos \phi'_n}{\gamma \sin(\alpha - \beta) \sin(\beta - \phi'_n)}, \quad (1)$$

где  $H$  – высота уступа, м;

$C'_n$  – сцепление по поверхности ослабления, МПа ( $\text{т/м}^2$ );

$\alpha$  – угол откоса уступа, м;

$\phi'_n$  – угол трения по поверхности ослабления, град;

$\gamma$  – плотность пород, МН ( $\text{т/м}^3$ );

$\beta$  – угол падения поверхности ослабления, град.

Повышение надежности обоснования углов откоса уступов должно базироваться на расчетной оценке возможности потери устойчивости уступов по протяженным трещинам в зависимости от действующих тектонических напряжений, ориентировки трещин относительно простирания уступа, прочностных свойств заполнителя и характеристик поверхностей трещин (ровная, волнистая, гладкая, шероховатая и т.д.).

#### *Методика расчетного обоснования устойчивости уступов и участков бортов в гравитационно-тектоническом поле напряжений*

В общем случае расчет коэффициента запаса устойчивости откоса  $n$  основан на сравнении удерживающих и сдвигающих сил, действующих по вероятной поверхности скольжения:

$$n = \Sigma (P_i \cdot \cos \beta_i \cdot \text{tg } \phi'_i + C'_i \cdot \ell_i) / \Sigma (P_i \cdot \sin \beta_i), \quad (2)$$

где  $P_i$  – вес расчетного блока, МН (т);

$\ell_i$  – длина  $i$ -го участка поверхности скольжения, м.

При тектоническом воздействии нормальная и касательная к рассматриваемой площадке составляющие максимальной компоненты тектонической силы  $\sigma_1$  определяются по формулам:

$$N_i = \sigma_1 \cdot \sin(\delta_i - \beta_i); \quad (3)$$

$$T_i = \sigma_1 \cdot \cos(\delta_i - \beta_i), \quad (4)$$

где  $\delta_i$  – угол между  $\sigma_1$  и горизонтом, град.

Тогда с учетом тектонических сил  $\sigma_1$ :

$$n = \Sigma [P_i \cdot \cos \beta_i \cdot \text{tg } \phi'_n + \sigma_1 \cdot \sin(\delta_i - \beta_i) \cdot \text{tg } \phi'_n + C'_i \cdot \ell_i] / \Sigma [P_i \cdot \sin \beta_i + \sigma_1 \cdot \cos(\delta_i - \beta_i)] \quad (5)$$

В условиях регионального тектонического поля напряжений максимальная компонента тектонической силы ориентирована горизонтально, а минимальная – вертикально.

При формировании выработанного пространства карьера параметры тектонического поля напряжений изменяются вблизи откосов уступов и участков бортов, как показано в монографиях д.т.н. Зубкова А.В. (рис. 1) [4], Яковлева А.В., Ермакова Н.И. (рис. 2) [5, 6].

Максимальная компонента тектонической силы в результате трансформации поля напряжений ориентирована в массиве согласно с углом наклона борта карьера, минимальная – по нормали к  $\sigma_1$ .

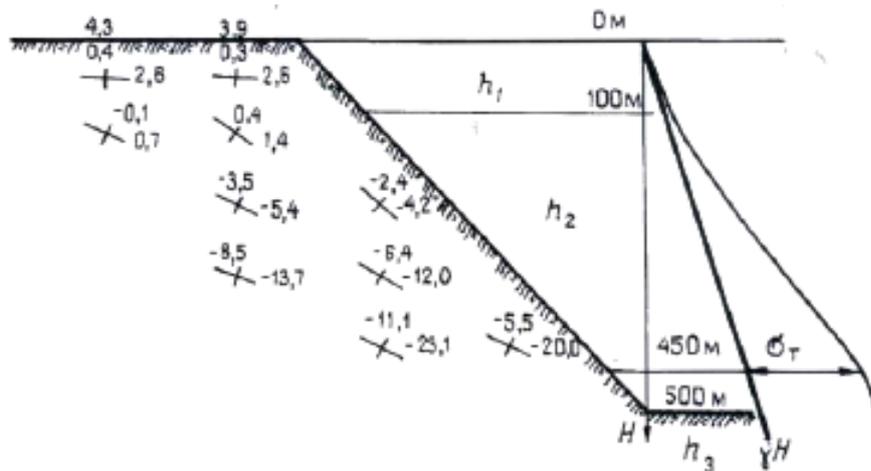


Рис. 1. Направление действия главных напряжений вблизи борта карьера [4]

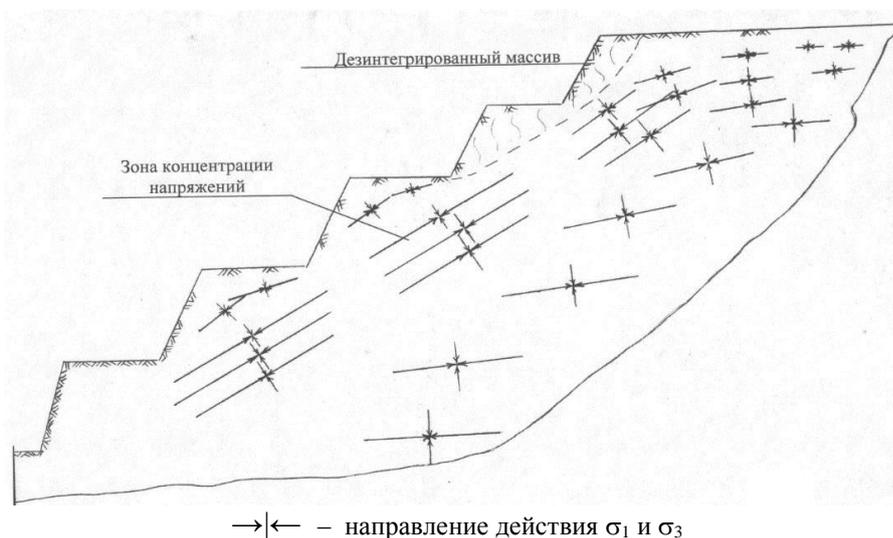
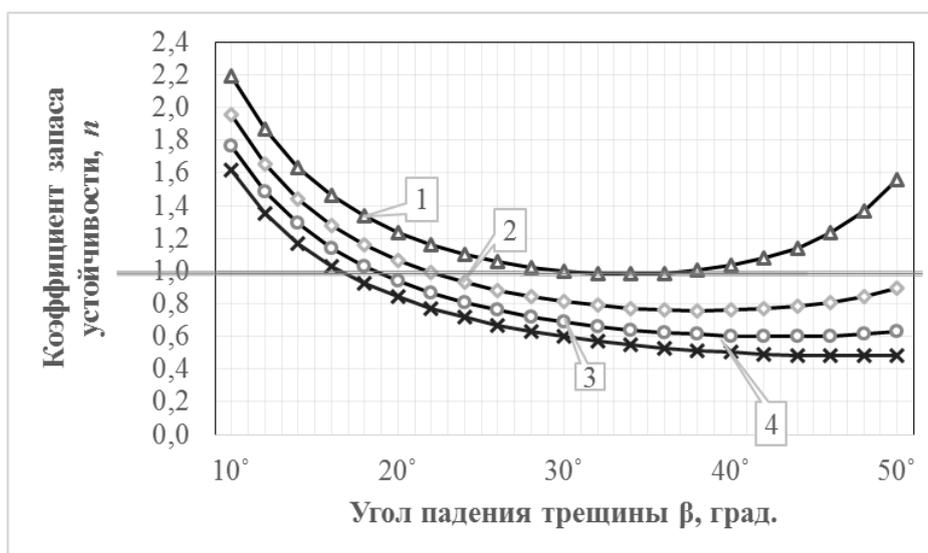


Рис. 2. Изменение направления максимальной компоненты в результате трансформации поля напряжений в прибортовом массиве согласно с углом наклона борта карьера [5, 6].

### *Расчеты устойчивости уступов и участков бортов с учетом тектонических напряжений*

Расчеты проведены по формуле (5) с использованием разработанной в редакторе Excel компьютерной программы для типичного состояния прибортового массива, при котором протяженная трещина имеет падение в направлении выработанного пространства карьера (рис. 3).



Значение максимальной компоненты тектонической силы  $\sigma_1$ :  
 1 –  $\sigma_1 = 0$  МН; 2 –  $\sigma_1 = 0,5$  МН; 3 –  $\sigma_1 = 1,0$  МН; 4 –  $\sigma_1 = 1,5$  МН

Рис. 3. Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  при  $C' = 5$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 7,5^\circ$ .

Для расчетов принято, что направление максимальной компоненты тектонической силы  $\sigma_1$  меньше угла откоса уступа на  $10^\circ$ .

Расчеты устойчивости уступов высотой 15 и 30 м с углами откоса  $\alpha = 60^\circ$  и  $\alpha = 70^\circ$  в зависимости от величины максимального главного напряжения  $\sigma_1$  проведены при различных прочностных свойствах ( $C' = 5$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 7,5^\circ$ ;  $C' = 10$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 10^\circ$ ;  $C' = 15$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 12,5^\circ$ ;  $C' = 20$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 15^\circ$ ) протяженной трещины и углах ее падения ( $\beta = 10 - 60^\circ$ ) в направлении выработанного пространства карьера.

Используя результаты расчетов, можно определить, при каких углах падения трещины различной морфологии в зависимости от величины максимальной компоненты тектонической силы  $\sigma_1$  сохраняется устойчивость уступа.

Например, устойчивость уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  при  $C' = 5$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 7,5^\circ$  обеспечивается в следующих условиях (табл. 1, рис. 4):

- при отсутствии тектонических напряжений при углах падения трещины  $\beta$  менее  $30^\circ$  и более  $38^\circ$  (при  $30^\circ < \beta < 38^\circ$  коэффициент запаса  $n \approx 1$ );
- при  $\sigma_1 = 0,5$  МН – при  $\beta$  менее  $22^\circ$ ;
- при  $\sigma_1 = 1,0$  МН – при  $\beta$  менее  $18,5^\circ$ ;
- при  $\sigma_1 = 1,5$  МН – при  $\beta$  менее  $16,5^\circ$ .

Таблица 1

Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  при  $C' = 5$  т/м<sup>2</sup> и  $\varphi' = 7,5^\circ$

Угол падения трещины $\beta$ , град	Коэффициент запаса устойчивости ( $n$ ) при максимальной компоненте тектонической силы $\sigma_1$						
	0 МН	0,25 МН	0,5 МН	0,75 МН	1,0 МН	1,25 МН	1,5 МН
10	2,19	2,07	1,96	1,86	1,77	1,69	1,61
20	1,24	1,15	1,07	1,00	0,94	0,89	0,84
30	1,00	0,90	0,81	0,75	0,69	0,64	0,60
40	1,03	0,88	0,76	0,67	0,60	0,55	0,50
50	1,56	1,14	0,90	0,74	0,63	0,55	0,48

При увеличении прочностных характеристик по поверхности трещины до  $C' = 10 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 10^\circ$  устойчивость уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  обеспечивается при более высоких значениях  $\sigma_1$  (табл. 2 и рис. 4):

- при  $\sigma_1 = 1,5 \text{ МН}$  – при  $\beta$  менее  $33^\circ$ ;
- при  $\sigma_1 = 2,0 \text{ МН}$  – при  $\beta$  менее  $28^\circ$ .

Разработанная компьютерная программа позволяет установить предельные параметры уступа ( $h$  и  $\alpha$ ) или группы уступов, изменяя прочностные свойства ( $C'$  и  $\varphi'$ ) протяженной трещины, углы ее падения  $\beta$  и величину  $\sigma_1$ .

Таблица 2

**Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  при  $C' = 10 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 10^\circ$**

Угол падения трещины $\beta$ , град	Коэффициент запаса устойчивости ( $n$ ) при максимальной компоненте тектонической силы $\sigma_1$					
	0 МН	1,0 МН	1,25 МН	1,5 МН	1,75 МН	2,0 МН
10	3,89	3,13	2,98	2,85	2,73	2,62
20	2,24	1,69	1,59	1,51	1,43	1,36
30	1,85	1,27	1,18	1,10	1,03	0,97
40	1,96	1,14	1,03	0,95	0,87	0,81
50	3,04	1,23	1,07	0,95	0,85	0,77

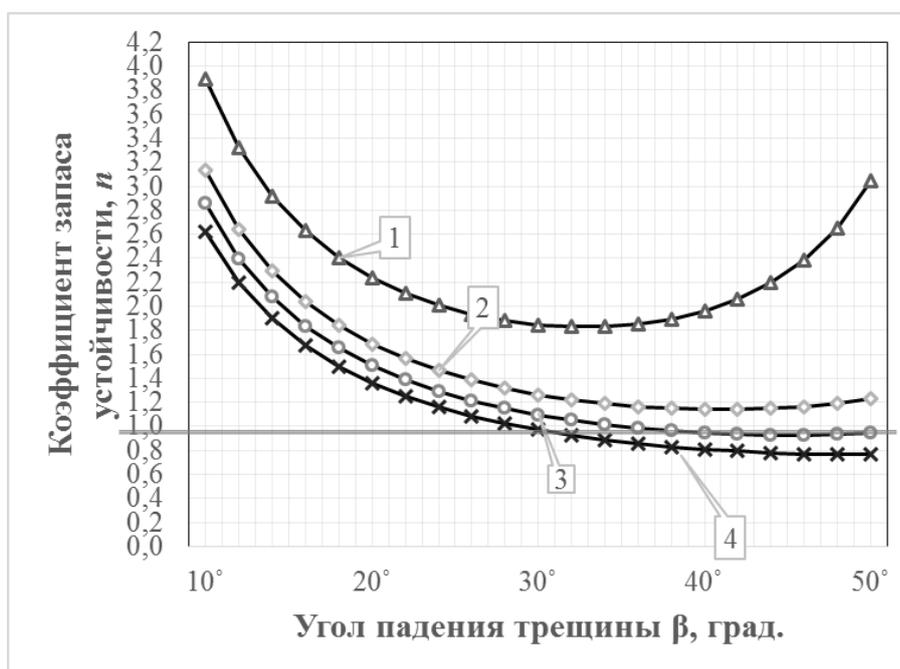


Рис. 4. Результаты расчетов устойчивости уступа высотой 15 м с углом откоса  $60^\circ$  при  $C' = 10 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 10^\circ$ .

Примеры графиков для определения предельно допустимых параметров уступов и участков бортов при угле падения трещины в направлении выработанного пространства карьера  $\beta = 30^\circ$  приведены на рис. 5 – 7.

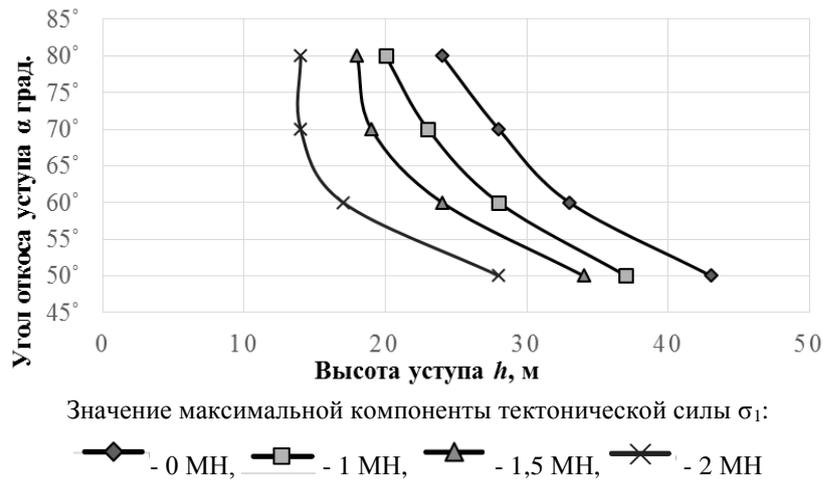


Рис. 5. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при  $C' = 10 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 10^\circ$

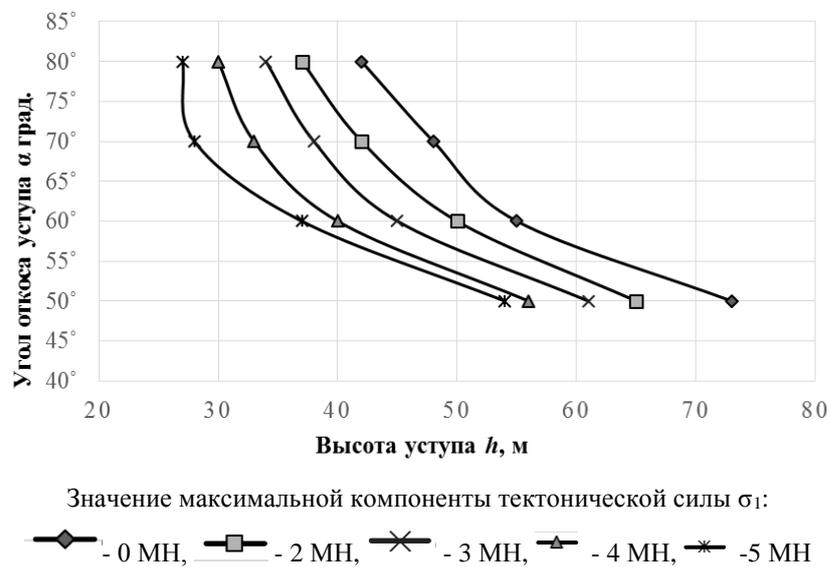


Рис. 6. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при  $C' = 15 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 12,5^\circ$

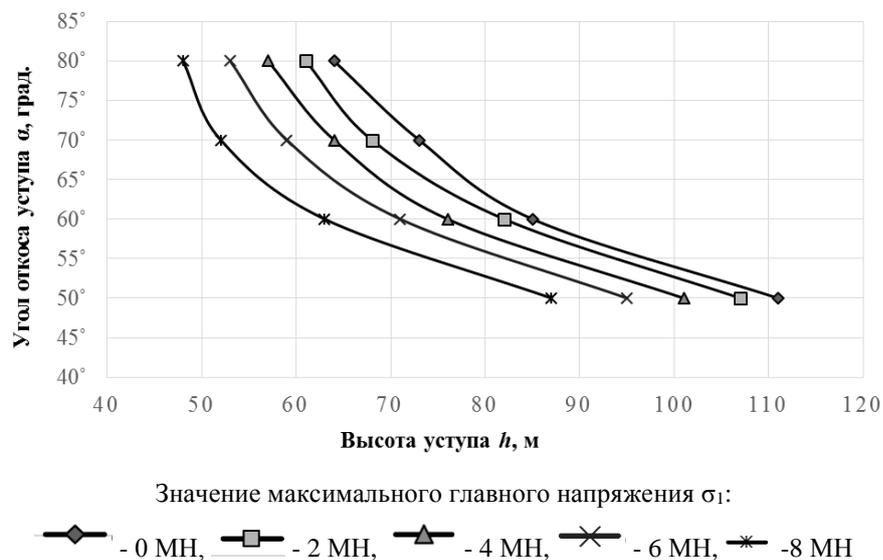


Рис. 7. Взаимосвязь предельно допустимых параметров уступов и участков бортов карьера при  $C' = 20 \text{ т/м}^2$  и  $\varphi' = 15^\circ$

### Выводы

1. Деформирование бортов карьеров в скальных массивах определяется воздействием гравитационно-тектонического поля напряжений, вызывающим возникновение подвижности участков прибортовых массивов, изменение структуры массива с раскрытием существующих и образованием новых дизъюнктивов, формирование поверхностей скольжения и оползневых участков массива.

2. В результате трансформации тектонического поля напряжений максимальная компонента ориентирована в массиве согласно с углом наклона борта карьера.

3. Разработаны методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров в гравитационно-тектоническом поле напряжений, включающие методику учета влияния тектонических напряжений на устойчивость уступов и участков бортов и компьютерные программы в редакторе Excel для расчетного обоснования условий возникновения тектонических подвижек прибортового массива по протяженной трещине и предельных параметров уступа ( $h$  и  $\alpha$ ) или группы уступов в зависимости от прочностных свойств ( $C'$  и  $\varphi'$ ) протяженной трещины, угла ее падения  $\beta$  и величины максимальной компоненты тектонической силы  $\sigma_1$ .

### Список литературы

1. Яковлев А.В., Шимкив Е.С., 2024. Методические основы формирования уступов и участков бортов на предельном контуре карьеров. *Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сборник научных трудов*. Вып. 6(96). Екатеринбург: ИГД УрО РАН, С. 244-255.

2. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов, строящихся и эксплуатируемых карьеров. Ленинград: ВНИМИ, 1972, 165 с.

3. Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов: утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 13.11.2020, № 439, 77 с. URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf?ysclid=m4qnacq1g4707925959> (дата обращения 22.10.2024)

4. Рыльникова М.В. и др., 2022. Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. Москва: ИПКОН РАН, 80 с.

5. Зубков А.В., 2000. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 335 с.

6. Яковлев А.В., Ермаков Н.И., 2006. *Устойчивость бортов рудных карьеров при действии тектонических напряжений в массиве*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 231 с.

7. Яковлев А.В., Ермаков Н.И., 2008. *Методика изучения прибортовых массивов для прогнозирования устойчивости бортов карьеров*. Екатеринбург: УрО РАН, 78 с.

### References

1. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., 2024. Metodicheskie osnovy formirovaniya ustupov i uchastkov bortov na predel'nom konture kar'erov [Methodological foundations of the formation of ledges and sections of sides on the barrier contour of quarries]. *Geotekhnologicheskie problemy kompleksnogo osvoeniya nedr: sbornik nauchnykh trudov*. Vyp. 6(96). Ekaterinburg: IGD UrO RAN, P. 244-255.

2. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov, stroyashchikhsya i ekspluatiruemykh kar'erov [Methodological guidelines for determining the angles of inclination of sides, slopes of ledges and dumps, quarries under construction and in operation]. Leningrad: VNIMI, 1972, 165 p.

3. Pravila obespecheniya ustoichivosti bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov: utv. Prikazom Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 13.11.2020, № 439, 77 s. [Rules for ensuring the stability of sides and ledges of quarries, cuts and slopes of dumps: approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision on 11/13/2020, No. 439, 77 p.] URL: <https://tk-expert.ru/uploads/files/ntd/ntd-809-20210108-191105.pdf?ysclid=m4qnacq1g4707925959> (data obrashcheniya 22.10.2024)

4. Ryl'nikova M.V. i dr., 2022. Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu parametrov bortov i ustupov kar'erov, razrezov i otkosov otvalov [Methodological guidelines for determining the parameters of sides and ledges of quarries, sections and slopes of dumps]. Moscow: IPKON RAN, 80 p.

5. Zubkov A.V., 2000. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 335 p.

6. Yakovlev A.V., Ermakov N.I., 2006. Ustoichivost' bortov rudnykh kar'erov pri deistvii tektonicheskikh napryazhenii v massive [Stability of the sides of ore pits under the action of tectonic stresses in the massif]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 231 p.

7. Yakovlev A.V., Ermakov N.I., 2008. Metodika izucheniya pribortovykh massivov dlya prognozirovaniya ustoichivosti bortov kar'erov [Methodology for studying instrument arrays for predicting the stability of quarry sides]. Ekaterinburg: UrO RAN, 78 p.