

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И ОСНОВАНИЙ.

Устойчивость откосов в поле тектонических, сейсмических и гидростатических напряжений*

А. В. Жабко

THEORY OF CALCULATION OF THE STABILITY OF SLOPES AND BASES.

Slope stability in the field of tectonic, seismic and hydrostatic stresses

A. V. Zhabko

Existing methods and means of evaluating the stability of slopes only apply to the so called unstrained mountain masses. In other words this means that in the borders of the region, that includes the mined-out pit, stresses are equal to zero. However this only occurs in massive sedimentary sheaths. At the same time, most of the pits for which the recording of tectonic stress fields is necessary, quite deeply embed into crystalline basement of Earth's crust. Overwhelming majority of researches point at the presence of natural (tectonic) stress fields in the mountain massif, recording of which is not implemented in a single regimented strength calculation method of pit sides in the capacity of boundary conditions. There are also no uniform justified methods of recording hydrogeological factors and seismicity. All of this justifies the relevance of this type of research. In the first part of the article power loads, which occur under the influence of tectonic, seismic and hydrostatic stresses are provided. In the second part of the work general conditions of slope stability are given (displacement prisms) that is subject to the influence of tectonic stresses, seismicity and hydrogeological impact. Tectonic stress fields impact level on the stability of pit sides slopes in comparison with the gravitational field is analyzed. A conclusion is made on a pretty significant negative contribution of tectonic stresses in the stability of open-pit sides.

Keywords: slope; pit side; tectonic stresses; coefficient of stress concentration; seismic stress; hydrostatic pressure; evaluation of slope stability; sliding surface.

Существующие методы и способы оценки устойчивости откосов применимы лишь к так называемым ненапряженным горным массивам. Другими словами, когда на границах области, включающей выработанное карьерное пространство, напряжения равны нулю. Однако это имеет место лишь в массивных осадочных чехлах. Вместе с тем большинство карьеров, для которых вообще необходим учет тектонических полей напряжений, достаточно глубоко врезаются в кристаллический фундамент земной коры. Подавляющее большинство исследований указывают на наличие естественных (тектонических) полей напряжений в горном массиве, учет которых в качестве граничных условий не реализуется ни в одном из регламентируемых способов расчета устойчивости бортов карьеров. Не существует также и единых обоснованных методик учета гидрогеологических факторов и сейсмичности. Все это и обосновывает актуальность такого рода исследований. В первой части статьи выводятся силовые нагрузки, которые возникают под действием тектонических, сейсмических и гидростатических напряжений. Во второй части работы приводится общее условие устойчивости откоса (призмы смещения), подверженного воздействию тектонических напряжений, сейсмичности и гидрогеологическому воздействию. Анализируется степень воздействия тектонических полей напряжений на устойчивость откосов бортов карьеров в сравнении с гравитационным полем. Делается вывод о достаточно серьезном негативном вкладе тектонических напряжений в устойчивость бортов карьеров.

Ключевые слова: откос; борт карьера; тектонические напряжения; коэффициент концентрации напряжений; сейсмическая нагрузка; гидростатическое давление; оценка устойчивости откосов; поверхность скольжения.

Данная статья является пятой и заключительной работой, публикуемой автором в журнале «Известия Уральского государственного горного университета» под общим названием «Теория расчета устойчивости откосов и оснований». Подробно ознакомиться с данной теорией можно также в монографии [1]. Данная статья посвящена избранным, но весьма важным вопросам геомеханики открытой разработки. Прежде всего, речь идет об учете при оценке устойчивости откосов тектонических полей естественных напряжений. Фактически универсальной методики учета первоначальной напряженности горного массива при расчете устойчивости бортов карьеров не существует. Достаточно разнообразно учитываются сейсмические и гидростатические нагрузки. Кроме того, практически отсутствуют данные о влиянии перечисленных факторов на форму и положение критической поверхности скольжения в массиве.

Как известно, силы гидростатического взвешивания и гидродинамического давления эквивалентны некоторой силе, называемой силой гидростатического давления, действующей по площадке скольжения и перпендикулярной к ней. Ее численное значение определяется формулой [2]:

$$D = \gamma_b h_b l,$$

где γ_b – объемный вес воды; h_b – высота столба воды, $h_b = (y_b - y)$; y_b – функция депрессионной кривой; y – функция поверхности скольжения; l – протяженность обводненной части откоса (для подтопленного откоса равна длине площадки скольжения откоса).

При расчете откосов с элементарным размером отсека

$$D = \frac{\gamma_b h_b dx}{\cos \vartheta}, \quad (1)$$

где ϑ – угол наклона основания отсека.

Как было показано в предыдущих частях работы, условие равновесия призм смещения для однородного откоса описывается при помощи интегралов (сумм). В целях упрощения выводов и более яркого представления идеи учета силового воздействия подземных вод будем рассматривать только один из них, являющийся наиболее общим и определяющий наиболее протяженную часть поверхности скольжения. Обобщенную силу для рассматриваемого участка поверхности скольжения с учетом гидрогеологии (1) можно представить в виде:

$$\int_{\vartheta > \vartheta_0} \left[\frac{\gamma(\hat{y}-y)(y'-f) - (C - f\gamma_b)(y_b - y)(1+y'^2)}{1+y'^2} \right] dx. \quad (2)$$

Из условия равновесия (2) вытекает силовое воздействие подземных вод, а именно оно может быть учтено снижением величины сцепления в каждой рассматриваемой точке поверхности скольжения (отсеке).

Выясним, каким образом обводненность откоса влияет на изменение положения наиболее вероятной поверхности скольжения по сравнению с сухим откосом.

Запишем условие трансверсальности (условие в точке пересечения поверхности скольжения с депрессионной кривой) в общем виде [3]:

$$F + (\psi' - y') F_{y'} \Big|_{x=x_0} = 0, \quad (3)$$

где F , $F_{y'}$ – подынтегральное выражение и частная производная подынтегрального выражения по y' ; ψ' – производная функции кривой, вдоль которой перемещается экстремаль (депрессионная кривая); x_0 – абсцисса точки пересечения экстремали (поверхности скольжения) и кривой, вдоль которой перемещается экстремаль (депрессионная кривая).

Выясним, будет ли преломляться поверхность скольжения при переходе с сухого на обводненный участок массива, и наоборот (точка В (рис. 1)), а также в случае преломления депрессионной кривой (например, когда она выходит в откос, точка А (см. рис. 1)). Для этого необходимо рассмотреть разрывную задачу вариационного исчисления второго рода [3]. Рассмотрим два соседних отсека, разделенных вертикальной границей. При этом площадка скольжения одного из отсеков обводнена, а другого нет. Приравняв условия трансверсальности (3) для функции (2) и его необходимого аналога ($\gamma_b = 0$), а также учтя, что на гра-

* Окончание. Первая часть статьи опубликована в вып. 4(40) за 2015 г. с. 45–57.



Рисунок 1. Расчет обводненного откоса.

нице отсеков $h_b = y_b - y = 0$, будем иметь:

$$y'_b = y'.$$

Таким образом, производные функции поверхности скольжения в точке стыка сухого и обводненного участков равны, т. е. излом поверхности скольжения отсутствует. Другими словами, обводнение горных пород не влияет на форму поверхности скольжения в откосах, чего раньше никто не доказывал.

Преломления поверхности скольжения в точке А (рис. 1) также не будет, так как условие (3) на вертикальной границе двух обводненных отсеков имеет вид: $F_y|_{x=x_0} = 0$ [3] и не зависит от производной функции депрессионной поверхности ψ' .

Как указывалось ранее, силовое действие воды состоит в уменьшении величины сцепления в обводненных точках (отсеках) поверхности скольжения. А в силу того, что на форму поверхности скольжения вода влияния не оказывает, существует некоторое приведенное (среднее) значение сцепления, удовлетворяющее предельному равновесию обводненного откоса.

Таким образом, на обводненном участке поверхности скольжения величина силы сцепления:

$$F_{в.с} = \int_b \left[C - \text{tg} \varphi \gamma_b (y_b - y) \right] dx,$$

а на сухом участке:

$$F_c = \int C dx.$$

Среднее или приведенное значение сцепления определится формулой:

$$C_b = \frac{\int_b \left[C - \text{tg} \varphi \gamma_b (y_b - y) \right] dx + \int C dx}{\int_b dx + \int dx} = C - \frac{\gamma_b S_b \text{tg} \varphi}{d} = C - \gamma_b h_b^{\text{ср}} \text{tg} \varphi, \quad (4)$$

где S_b – объем воды в пределах призмы смещения; d – горизонтальная проекция поверхности скольжения; $h_b^{\text{ср}}$ – среднее значение высоты столба воды вдоль всей поверхности скольжения (используется вся поверхность скольжения, включая необводненную).

Таким образом, для определения предельных параметров обводненного однородного откоса необходимо вычислить по формуле (4) значение величины приведенного сцепления массива и воспользоваться номограммой устойчивости однородных откосов.

Если проектируемый объект (дамба хвостохранилища, карьер и т. д.) находится в сейсмоактивном регионе, то их проектирование (расчет) необходимо производить с учетом возможного сейсмического воздействия. Механизм воздействия сейсмике на откос представляется следующим образом. В момент сейсмического события из гипоцентра (точка в массиве, где произошло высвобождение энергии, эпицентр – это его проекция на земную поверхность) начинают распространяться упругие сейсмические волны (волны напряжений), которые принято подразделять на продольные (создают нормальные напряжения и линейные деформации в массиве) и поперечные (создают касательные напряжения и угловые

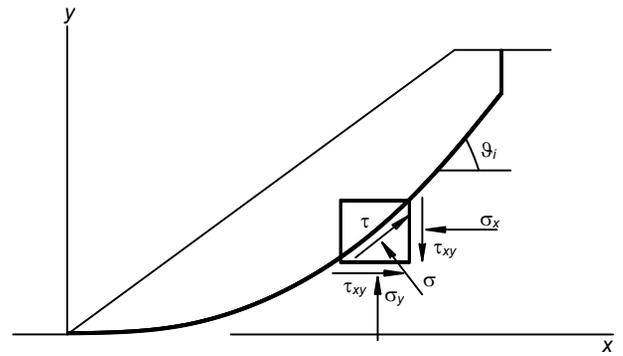


Рисунок 2. Напряженное состояние горных пород в окрестности поверхности скольжения.

деформации). Распространение волн приводит к упругим колебаниям среды (частиц горной породы) с некоторым ускорением. Согласно принципу Даламбера, ускорение порождает сейсмическую инерционную силу, направленную противоположно. Таким образом, на каждый отсек призмы смещения будет действовать сила, прямо пропорциональная его массе и ускорению частиц среды. Интенсивность сейсмического события (землетрясения) принято измерять в баллах. В нашей стране используется двенадцатибалльная система. Модуль сейсмической силы определяется по формуле [4]:

$$F_c = \frac{1}{1 - T_0^2} k_c P,$$

где T_0 – период собственных колебаний частиц породы (весь множитель носит название динамический коэффициент и в практических расчетах принимается равным единице); $k_c = a/g$ – коэффициент сейсмичности, равный отношению ускорения сейсмической волны к ускорению свободного падения, определяется согласно данным, приведенным ниже; P – вес рассматриваемого объема (отсека, блока):

Коэффициент сейсмичности [4, 5].

Расчетная сейсмичность, баллы ...	6	7	8	9	10
Коэффициент сейсмичности k_c	0,01	0,025	0,05	0,10	0,25

Направление действия сейсмической силы большинство исследователей принимают горизонтальным. С другой стороны, как было доказано раньше, общая реакция со стороны соседних отсеков направлена под углом $\vartheta_i - \varphi$ к горизонту в сторону массива, при этом она совершит максимальную (минимальную) работу. Таким образом, направление, противоположное данному, будет являться самым уязвимым с точки зрения устойчивости. Поэтому примем это направление за направление действия сейсмической силы на каждый отсек. То есть направление сейсмической силы будет меняться от отсека к отсеку, т. е. вдоль поверхности скольжения, что будет соответствовать максимально негативному влиянию сейсмике на откос, однако это всегда идет в запас устойчивости.

Рассмотренные задачи по оценке устойчивости откосов в различных условиях относятся к так называемому гравитационному типу оползневых явлений. То есть единственной активной силой, выводящей откос (призму смещения) из положения равновесия, является вес горных пород, обуславливаемый гравитацией. Вес горных пород формирует также напряженное состояние. Вертикальная компонента напряжений является активной, а горизонтальная – реактивной.

Однако в практике разработки месторождений часто встречаются случаи, когда горизонтальная компонента естественного поля напряжений является активной, кроме того, ее величина может превосходить вертикальную компоненту в несколько раз. В этом случае говорят о действии в массиве тектонических полей напряжений, обусловленных тектоническими процессами (субдукция, рифтогенез, коллизия, орогенез и др.), которые достаточно подробно описаны в курсах геотектоники и геодинамики недр. Задача по определению конструктивных элементов бортов карьера в условиях тектонических полей напряжений была поставлена сравнительно недавно.

Необходимо отметить, что определение ориентировки главных осей напряжений в пространстве и значений главных напряжений является сложной научной задачей. Не рассматривая причин возникновения

тектонических напряжений и определения их ориентировки и значений, перейдем к исследованию вопроса их учета при оценке устойчивости откосов бортов карьеров.

В силу неоднозначности вопроса необходимо сделать ряд принципиальных замечаний.

1. Разрушение горных пород, как и любых других материалов, при срезе происходит по некоторой поверхности, которую, как и раньше, будем называть поверхностью скольжения (разрушения). Если речь идет об идеально однородных откосах или откосах, которые можно привести к таковым посредством статистического усреднения физико-механических свойств, то поверхность скольжения является плавной и криволинейной. Если в массиве присутствуют ярко выраженная система трещин с падением в карьер или сплошные трещины (поверхности ослабления, включая тектонические нарушения) большого протяжения, то такой откос следует считать анизотропным, а поверхность скольжения будет иметь излом. Если массив разбит одиночными, разнонаклонными трещинами, соизмеримыми с размерами откоса, то поверхность скольжения будет ломаной, в большинстве своем совпадая с трещинами. Какой бы из перечисленных случаев ни имел место, откос все равно разрушается по некоторой поверхности, называть которую будем, как и раньше, поверхностью скольжения. Однако для каждого типа поверхности скольжения и каждого ее участка необходимо обосновать условие устойчивости или равновесия.

2. Призма смещения так же, как и любое другое тело, может перемещаться в пространстве под действием активных сил и реакций связей. Поэтому несмотря на то, что граничными условиями являются тектонические поля напряжений, условие устойчивости (частный случай движения) должно быть выражено через силы, а не напряжения.

3. Недопустимо оценивать устойчивость всей призмы смещения сравнением напряжений или сил в какой-либо точке поверхности скольжения. Другими словами, критерий устойчивости должен определяться суммами удерживающих и сдвигающих сил вдоль всей поверхности скольжения, разумеется, при выполнении условия сплошности (неразрывности) призмы смещения.

Установим условия устойчивости (разрушения) откосов, находящихся в условиях тектонического воздействия. Необходимо разработать методику расчета откосов при известном распределении напряжений в прибортовом массиве, т. е. получить аналитическое выражение, отвечающее условиям необходимости и достаточности равновесия призмы смещения, с помощью которого суммируются тектонические и гравитационные силы.

Таким образом, имеются плоский откос и известное поле распределения компонент напряжений (рис. 2). В случае, когда наиболее опасная поверхность скольжения определена, вдоль нее будут известны компоненты плоского поля напряжений. Кроме того, очевидно, что в предельном равновесии вдоль поверхности скольжения (как и в каждой отдельной точке поверхности скольжения) выполняется условие предельного кулоновского равновесия.

С другой стороны, действие тектонических полей в точке эквивалентно некоторой горизонтальной силе, действующей на элементарный отсек:

$$F_T = k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta dx, \quad (5)$$

где k_k – коэффициент концентрации тектонических (горизонтальных) напряжений в рассматриваемой точке поверхности скольжения; σ_T – тектоническое (горизонтальное) нормальное напряжение в нетронутом массиве (в естественном залегании).

Таким образом, к расчетной схеме по установлению условия равновесия отсека необходимо добавить горизонтальную сдвигающую тектоническую силу (5). В силу того, что тектоническая сила параллельна реакции ΔE , в условии равновесия отсека она войдет с тем же множителем. Заметим, что появление тектонической силы не изменяет закона распределения межблоковых реакций, поэтому дальнейшие операции по выводу условий равновесия призмы смещения на различных участках будут идентичны случаю гравитационных сил.

Тектоническое напряжение часто представляют в виде:

$$\sigma_T = \lambda \gamma H, \quad (6)$$

где H – глубина точки от поверхности (до начала разработки); λ – коэффициент пропорциональности, численно равный отношению горизонтальной составляющей поля тектонических напряжений к вертикальной. Численное значение коэффициента λ некоторые авторы для тектонических регионов оценивают величиной 1–10 (если тектоники нет, то будем считать $\lambda = 0$).

Коэффициент концентрации тектонических напряжений k_k является весьма значимой характеристикой. Он показывает степень рассеяния

тектонических напряжений в окрестности поверхности скольжения (открытой горной выработки) и определяется размерами карьера в плане, высотой и углом откоса, глубиной заложения поверхности скольжения. В первом приближении коэффициент концентрации может быть оценен по формуле

$$k_k = \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right),$$

где r_0 – радиус выработки (карьера) в плане (на рассматриваемой высоте); r – расстояние до рассматриваемой точки.

Так как k_k заведомо меньше единицы (при некоторых параметрах карьера может быть значительно меньше), то очевидно, что учет тектонической составляющей напряжений необходим при достаточно высоком значении λ .

Таким образом, условие равновесия откоса (призмы смещения) в условиях обводненности, сейсмичности и тектонических напряжений примет вид (интегралы заменены на суммы):

$$\sum_{\vartheta \in \varphi} \left[\frac{\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_a h_a \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta)}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta} \right] \Delta + \sum_{\vartheta \in \varphi} \left[\frac{\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_a h_a \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta)}{1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta} \right] \Delta + \sum_{\text{Берма}} \left[\gamma h (\operatorname{tg} \vartheta - \operatorname{tg} \varphi + k_c / (\cos \vartheta \cos \varphi)) + k_k \sigma_T \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta) - (C - \gamma_a h_a \operatorname{tg} \varphi) (1 + \operatorname{tg}^2 \vartheta) \right] \Delta = 0, \quad (7)$$

где h – высота отсека; Δ – ширина отсека.

Разумеется, не представляет никакого труда записать условие равновесия призмы смещения (7) через коэффициент устойчивости. В случае, когда поверхность скольжения не формируется, а совпадает с уже существующими поверхностями ослабления массива, для расчета баланса сил нужно использовать последнее слагаемое (7).

Отметим, что предлагаемая методика учета тектонических напряжений при оценке устойчивости откосов не требует проведения математического моделирования для определения напряженного состояния в окрестности поверхности скольжения. В связи с этим нет необходимости выдвигать гипотезы о модели среды (упругая, пластическая и т. д.) и обосновывать трудноопределимые показатели деформационных свойств массива, как правило, сложной структуры.

Для оценки влияния тектонических напряжений на устойчивость откосов введем показатель, который можно назвать коэффициентом вклада тектонических напряжений (в точке, т. е. для одного отсека). Данный коэффициент численно равен отношению работы тектонических сил к работе гравитационных сил на возможном перемещении всей призмы. Таким образом, с учетом выражения (7) коэффициент вклада определится зависимостью

$$k_T = \frac{k_k \lambda \gamma H \operatorname{tg} \vartheta (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta)}{\gamma h \operatorname{tg} \vartheta} = k_k \lambda (H / h) (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \vartheta). \quad (8)$$

Как следует из выражения (8), тектонические силы могут вносить весьма существенный вклад в устойчивость откосов, соизмеримый и даже превышающий вклад гравитационных сил. Средний коэффициент влияния вдоль всей поверхности скольжения будет характеризовать общий вклад тектонических напряжений в устойчивость призмы смещения в сравнении с гравитационным.

В отличие от действия подземных вод, сейсмика и тектоническая нагрузка приводят к изменению формы поверхности скольжения (силы зависят от угла наклона поверхности скольжения, а значит в функционал входит производная функции поверхности скольжения). Поверхность скольжения для случая тектонических напряжений находится аналогично случаю гравитационных сил, однако для этого необходимо располагать функцией коэффициента концентрации напряжений $k_k = k_k(x, y)$. Кроме того, решение данной задачи в аналитическом виде резко усложнится (в первом приближении коэффициент можно принять постоянным, средним). Несмотря на это, анализируя функционалы (7) и выражение (6), можно проследить некоторые закономерности поведения наиболее опасной поверхности скольжения в случае действия тектонических напряжений. Совершенно очевидно, что наиболее опасная поверхность скольжения под откосом свои наибольшие углы ϑ будет приурочивать к наибольшим значениям H . Это значит, что уже в нижних точках поверхности скольжения будет стремиться к своим максимальным углам наклона (предельным из условия неразрывности или сплошности призмы сме-

чения). Но в силу того, что угол наклона поверхности скольжения под откосом возрастает, в однородных массивах поверхность скольжения, ее большая часть будет близка к плоскости.

Таким образом, размер призмы смещения с увеличением тектонических напряжений будет уменьшаться. К этим же выводам приходит М. В. Рыльникова с соавторами [6]. И в общем данный факт объясним. Когда тектонические напряжения равны нулю, призма смещения увеличивается в размерах для увеличения размеров призмы активного давления, т. е. чтобы сдвигающих сил было достаточно для нарушения устойчивости откоса. Когда же действуют тектонические напряжения, в этом нет необходимости, т. е. сдвигающих активных сил достаточно для нарушения устойчивости откоса. Кроме того, уже и не нужна минимальная высота, необходимая для образования площадок среза H_{90} , или по крайней мере не требуется ее полных размеров.

В случае сильнотрещиноватых скальных массивов разрушение откоса будет происходить в виде отделения небольших участков (призм) по системам трещин и их перемещения вниз под действием собственного веса. Именно поэтому деформации скальных прибортовых массивов при действии тектонических полей напряжений не похожи на классические оползневые явления гравитационного типа с захватом достаточно обширных прим смещения и с более или менее выдержанной формой криволинейной поверхности скольжения, а также трещиной отрыва. Деформации откосов в этом случае будут больше напоминать осыпи и обрушения.

Андрей Викторович Жабко,
zhabkoav@mail.ru
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

ЛИТЕРАТУРА

1. Жабко А. В. Аналитическая геомеханика. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2016. 224 с.
2. Фисенко Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. М.: Недра, 1965. 378 с.
3. Лаврентьев М. А., Люстерник Л. А. Курс вариационного исчисления. 2-е изд. М.: Гостехиздат, 1950. 296 с.
4. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. М.: Трансжелдориздат, 1953. 827 с.
5. Емельянова Е. П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972. 308 с.
6. Оценка устойчивости борта Учалинского карьера в условиях действия тектонических сил / М. В. Рыльникова [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 1991. № 7. С. 54–64.

REFERENCES

1. Zhabko A.V. 2016, *Analytical geomechanics* [Analytical geomechanics]. Ekaterinburg, 224 p.
2. Fisenko G. L. 1965, *Ustoychivost' bortov kar'erov i otvalov* [The stability of pit walls and dumps]. Moscow, 378 p.
3. Lavrentyev M. A., Lyusternik L. A. 1950, *Kurs variatsionnogo ischisleniya* [Variational calculation course]. 2nd edition. Moscow, 296 p.
4. Shahunyants G. M. 1953, *Zemlyanoe polотно zheleznnykh dorog* [Earth railway bed]. Moscow, 827 p.
5. Emelyanova E. P. 1972, *Osnovnye zakonomernosti opolznevykh protsessov* [Main regularities of soil slips]. Moscow, 308 p.
6. Rylnikova M. V. 1991, *Otsenka ustoychivosti borta Uchalinskogo kar'era v usloviyakh deysviya tektonicheskikh sil* [Assessment of the stability of the Uchalinsky quarry side under the action of tectonic forces]. *Izvestiya vuzov. Gorniy zhurnal* [News of the higher institutions. Mining journal]. Issue 7. pp. 54–64.

Andrey Viktorovich Zhabko,
zhabkoav@mail.ru
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia