

Б.Р. Ракишев, А.С. Ковров, В.В. Федотов

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АРМИРУЮЩИХ СВОЙСТВ КОРНЕВЫХ СИСТЕМ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СКЛОНАХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОТКОСАХ

Предложена геомеханическая модель откоса с корневыми системами древесно-кустарниковой растительности в виде характерных фитоанкеров. Рассчитаны коэффициенты запаса устойчивости откоса с учетом геометрических параметров и физико-механических характеристик пород. Выполнена геомеханическая оценка армирующих свойств корневых систем на оползнеопасных склонах.

ГЕОМЕХАНИЧНА ОЦІНКА АРМУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОРЕНЕВИХ СИСТЕМ ДЕРЕВИННОЇ РОСЛИННОСТІ НА СХИЛАХ І ТЕХНОГЕННИХ УКОСАХ

Запропонована геомеханічна модель укосу з корневими системами деревинно-кустарникової рослинності у вигляді характерних фітоанкерів. Розраховано коефіцієнти запаса стійкості укосу з урахуванням геометричних параметрів та фізико-механічних характеристик порід. Виконана геомеханічна оцінка армуючих властивостей корневих систем на зсувонебезпечних схилах.

GEOMECHANICAL ASSESSMENT OF REINFORCING PROPERTIES OF THE LIGNOSA ROOT SYSTEMS ON THE HILLSIDES AND TECHNOGENIC SLOPES

The geomechanical model of the slope with the lignosa root systems introduced as the characteristic phytoanchor is proposed. The safety factors of the slope with consideration of the geometric parameters and physical-mechanical properties of the rocks are calculated. Geomechanical assessment of the root systems reinforcing properties for the landslide-prone slopes is carried out.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие древесно-кустарниковой растительности на склонах является важным противозрозионным и противооползевым мероприятием, завершающим этапом биологической рекультивации нарушенных земель, обеспечивающим их устойчивость как в геотехническом, так и в экологическом контексте. При классической оценке устойчивости склонов наличие или отсут-

ствие древесной растительности в расчетах обычно не используется. Посадка деревьев на склонах рассматривается как мероприятие, обеспечивающее дополнительный «запас устойчивости». Корневые системы деревьев и кустарников на склонах проявляют свойства своеобразных фитоанкеров, обуславливающих дополнительные удерживающие силы при оползневых процессах. Величины этих сил зависят от размеров и конфигурации зоны распространения

корней, густоты их распределения в грунте и их средней прочности. Такие вопросы обычно рассматриваются вне пределов компетенции инженеров, но они довольно хорошо изучены в сфере лесоводства, где сформировалась самостоятельная дисциплина – корневедение.

В значительной степени именно благодаря армирующему (закрепляющему) действию корней древесно-кустарниковой растительности склон удерживается от обрушения в процессе развития оползневых процессов. Поэтому посадка деревьев на оползнеопасных участках рассматривается как важное защитное агролесомелиоративное мероприятие. Особое прикладное значение эти мероприятия имеют в практике биологической рекультивации нарушенных земель при открытой и подземной разработке месторождений полезных ископаемых для создания устойчивого растительного покрова на откосах породных отвалов и нерабочих бортах карьеров.

Иногда древесные породы на склонах могут, напротив, способствовать интенсификации оползневых процессов, что обусловлено значительным надземным весом деревьев, повышенной парусностью их крон, способностью корней к образованию глубоких трещин в грунте, поднятием подземных вод к поверхности и увлажнению грунтов за счет всасывающего действия корней.

При численном моделировании устойчивости откосов и склонов обычно учитываются только геометрические параметры исследуемого объекта, физико-механические характеристики пород, гидрологические характеристики и т.д. Наличие растительности, как правило, не учитывается в расчетах, поскольку армирующая функция корней трудно поддается математической формализации. Тем не менее, используя современные программные комплексы для анализа геотехнических систем, оценка армирующих свойств корневых систем древесно-кустарниковой растительности на склонах представляется достаточно реальной.

Целью данной работы является оценка армирующих свойств корневых систем древесно-кустарниковой растительности на склонах с использованием программы конечно-элементного анализа Phase2. В предложенной геомеханической модели склона (откоса) корневые системы деревьев и кустарников представлены в виде своеобразных анкеров (фитоанкеров) морфологически подобными натурным объектам.

Лесотехническая рекультивация.

Биологическая рекультивация нарушенных земель в горнодобывающих регионах является важным направлением оптимизации техногенных ландшафтов, составной частью мероприятий по оздоровлению окружающей природной среды. Биологический этап рекультивации включает комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на создание устойчивого растительного покрова на поверхности техногенных массивов пород. Задачи восстановления земель сводятся в основном к восстановлению топографии и продуктивности земель до их первоначального состояния и созданию благоприятных условий для последующего землепользования. Мировая практика показывает, что эти задачи в значительной степени решаются посредством проведения фито-рекультивации техногенных ландшафтов, так как установление устойчивых растительных сообществ (фитоценозов), в конечном счете, предопределяет стабильность и продуктивность техноэкосистемы в целом [1]. Пионерные виды растений обладают способностью приспосабливать морфологически корневую систему к почвенному субстрату и адекватно реагировать на изменяющиеся условия среды. Деревья и кустарники с мощной корневой системой, способной глубоко проникать в породный субстрат, являются наилучшим выбором для нужд лесотехнической рекультивации. С помощью таких видов можно эффективно закреплять склоны техногенных насыпных массивов и препятствовать эрозионным процессам в откосах бортов карьеров и породных отвалов.

Ключевой задачей успешной рекультивации является создание устойчивых фитоценозов, способных не только существовать на техногенной территории, но и выступать в качестве средообразующей силы, ускоряющей естественное восстановление нарушенных земель. Так, например, полная фиторекультивация нерабочего борта на одном из крупнейших бурогольных разрезов «Хамбах» (Рейн-Вестфальский бурогольный бассейн, Германия) обеспечила не только защиту от масштабных оползневых явлений, а также создала предпосылки для восстановления естественной природной среды.

Армирующие свойства корневых систем растений. Разные виды древесно-кустарниковой растительности обладают специфичными корневыми системами, отличающимися морфологической неоднородностью, что создало предпосылки для разработки соответствующей классификации. На рис. 1 представлены наиболее типичные корневые системы древесно-кустарниковой растительности по классификации П.К. Красильникова [2].

Стержневая интенсивно ветвящаяся или стержнево-пальчатая системы, представленные многими представителями рода дуб, имеют стержневой корень, который ветвится почти на всем протяжении, а боковые корни расположены по нему более или менее равномерно (рис. 1, а). Поверхностно-стержневая система характеризуется хорошо развитыми стержневым и боковыми корнями (рис. 1, б), причем последние располагаются в поверхностном горизонте почвы (пихта сибирская, сосна обыкновенная на средневлажных и глубоких почвах). Колоколовидно-стержневая система (рис. 1, в) отличается наличием выраженного стержневого корня, а основные боковые корни дуговидной формы вначале растут пологонаклонно, а затем крутонаклонно (липа крупнолистная, ряд представителей рода ильмовых). Поверхностно-стержнево-якорная или поверхностно-стержнево-гребенчатая система (рис. 1, г) отличается от поверхностно-стержневой

хорошо выраженными якорными корнями, расположенными вблизи стержневого корня (лиственница сибирская, сосна обыкновенная).

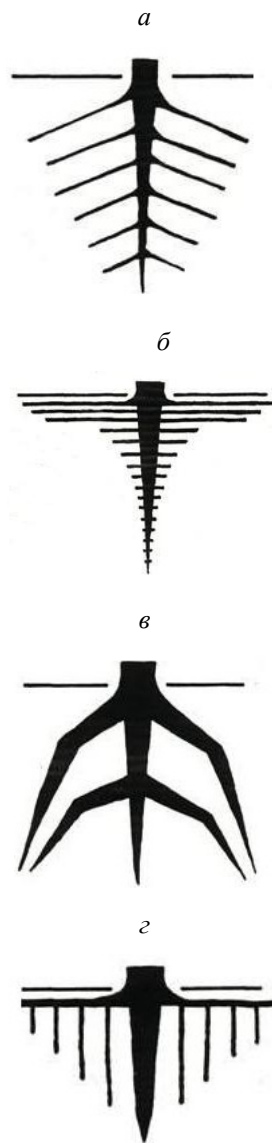


Рис. 1. Типы первичных корневых систем деревьев и кустарников (по П.К. Красильникову, 1970)

Глубина проникания корней зависит от породы дерева, его возраста, почвенно-грунтовых условий. В корневедении [3, 4]

выделяют породы с «поверхностным укоренением» – до 0,6 м (ель обыкновенная и др.), с неглубоким проникновением корней – 0,6 – 1,5 м (береза повислая, береза бородавчатая, липа крупнолистная, пихта белая и др.), средним проникновением корней – 1,5 – 3,0 м (тополь, клен остролистный, орех грецкий, бук европейский, каштан съедобный и др.), с глубоким проникновением – 3 – 5 м (сосна обыкновенная, ель сибирская и др.) и очень глубоким – более 5 м (дуб черешчатый, клен явор). Эти глубины могут изменяться в довольно широких пределах в зависимости от возраста, почвенно-грунтовых условий. У большинства пород максимальная глубина проникания корней достигается в возрасте 25 – 40 лет, после чего она почти не увеличивается. В возрасте 10 – 15 лет глубина проникания корней чаще всего составляет 50 – 75% от максимальной величины. В подзолистых (лесных) почвах глубина проникания корней обычно меньше, чем в черноземах (составляет не более 1,5 – 2 м). На заболоченных участках глубина проникания корней может уменьшаться до 0,6 м.

В исследованиях устойчивости склонов с растительностью, выполненных в работе [5], сопротивление слоя почвогрунта сдвигу в пределах грунтово-корневого слоя определялось в виде интегрального показателя удельного сцепления, рассчитан стандартным методом при инженерно-геологических изысканиях (без учета корней), и дополнительной частью удельного сцепления, определяемого в зависимости от насыщенности этого слоя корнями. Предлагаемый способ привязан к существующим методам расчета устойчивости склонов, точность которых невысока и находится примерно на уровне $\pm(20 - 30)\%$.

Тем не менее, армирующие свойства древесно-кустарниковой растительности на откосах обеспечивают дополнительную устойчивость откоса. В работе [6] показано, что экзогенные геологические процессы почти отсутствуют в откосах с уклоном до 40° и покрытии растительностью более 70%. В зависимости от густоты фитоцено-

за, в корневой зоне формируется характерная фитоанкерная структура, позволяющая связывать почвогрунт в единый монолит. Такой подход целесообразен, если речь идет о степени влияния экзогенных процессов ветровой и водной эрозии, а также ряда климатических факторов на устойчивость растительного покрова или фитоценоза на поверхности склона. В данном случае термин «устойчивость» имеет отношение не ко всему склону, а к незначительной его части, распространенную на глубину проникновения корневой системы растений. Если склон рассматривается как геотехническая система, то ее устойчивость обусловлена как физико-механическими характеристиками грунта, так и внешними факторами и фитоценозом на поверхности склона.

Численное моделирование устойчивости откосов. Для оценки устойчивости гипотетического откоса, сложенного однородным массивом пород (рис. 2), выбрана инженерная программа конечно-элементного анализа Phase2 компании Rocscience Inc. (www.rocscience.com), предназначенная для анализа устойчивости горных выработок и техногенных массивов при открытой и подземной разработке полезных ископаемых. Программа позволяет выполнять анализ устойчивости откосов методом конечных элементов, анализируя процесс снижения предела прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction Method) в породном массиве.

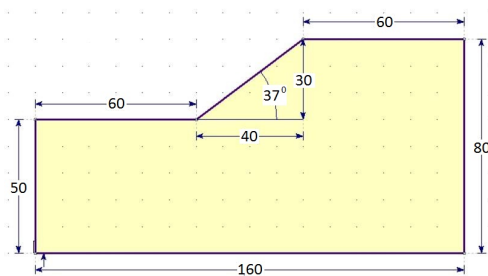


Рис. 2. Геометрические параметры гипотетического откоса

Функция снижения прочности на сдвиг (Shear Strength Reduction) в Phase2 позволяет автоматически выполнять конечно-элементный анализ и вычислять критический коэффициент снижения прочности КСП (SRF, Strength Reduction Factor) для выбранной модели, который по своему смыслу является эквивалентным коэффициенту запаса устойчивости (КЗУ) откоса.

Откос находится в устойчивом состоянии, если $KЗУ \geq 1$. При уменьшении сопротивления пород или грунта сдвигу и возникновении обрушения откоса $KЗУ \leq 1$ [7].

Рассмотрим однородный откос с произвольно выбранным углом наклона $\alpha = 37^\circ$, сложенного лессовыми суглинками. Для почвогрунта приняты следующие физико-механические свойства: модуль деформации $E = 20\text{М Па}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$, объемный вес грунта $\gamma = 0,017\text{ МН/м}^3$, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 0,040\text{ МПа}$, сцепление $C = 0,040\text{ МПа}$, угол внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$. В оценке

устойчивости откоса принят критерий Мора-Кулона, наиболее часто используемый в геотехнических расчетах грунтов и мягких пород.

Согласно результатам расчетов рассматриваемый откос находится в предельно устойчивом состоянии, а $KЗУ = 1,14$. Две зоны максимальных сдвиговых деформаций в верхней части откоса ($e_{max} = 0,015$) и на уровне нижней бровки ($e_{max} = 0,042$) идентифицируют потенциальную поверхность скольжения (рис. 3, а). Общие смещения пород варьируют в диапазоне $d = 0,131 - 0,225\text{ м}$ (рис. 3, б).

Поскольку геометрические параметры имеют первостепенное значение при оценке устойчивости откосов, были выполнены расчеты КЗУ при различных углах наклона откоса в диапазоне $\alpha = 30 - 70^\circ$ и высотах уступа $h = 15 - 40\text{ м}$ с учетом физико-механических характеристик породного массива.

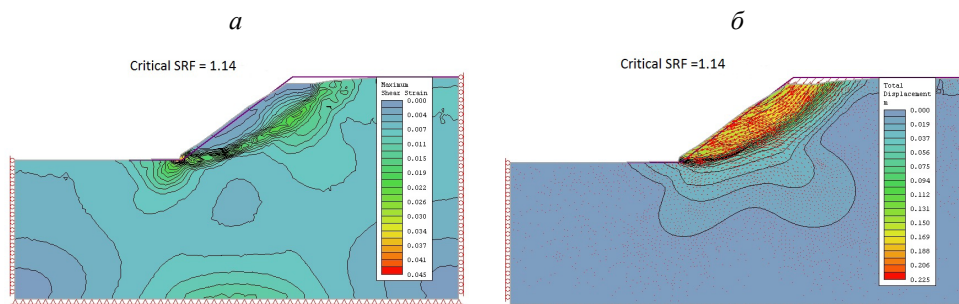


Рис. 3. Графическое изображение максимальных сдвиговых деформаций (а) и смещений (б) в откосе

На рис. 4 показано, что значения КЗУ уменьшаются с увеличением высоты откоса и угла его наклона.

При этом явление обрушения ($KЗУ = 1,0$) возникает при следующих геометрических параметрах: $H_3 = 25\text{ м}$ и

$\alpha = 65^\circ$, $H_4 = 30\text{ м}$ и $\alpha = 55^\circ$, $H_5 = 35\text{ м}$ и $\alpha = 50^\circ$, $H_6 = 40\text{ м}$ и $\alpha = 45^\circ$. В целом, при заданных геометрических параметрах и физико-механических характеристиках устойчиво откоса обеспечивается при $\alpha \leq 40^\circ$.

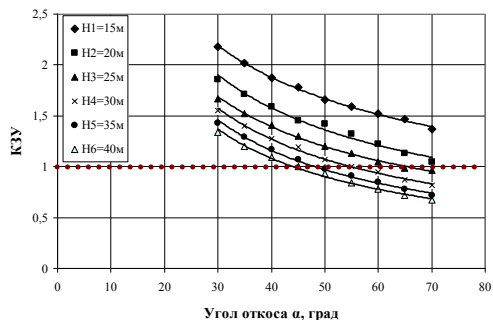


Рис. 4. Зависимость КЗУ откоса от геометрических параметров

Анализ геомеханической устойчивости откоса, армированного корневой системой деревьев. Рассмотрим вышеописанный склон при условии наличия на его поверхности древесно-кустарниковой растительности.

Учитывая результаты численного моделирования, представленные на рис. 3, очевидно, что зоны максимальных деформаций находятся в пределах нижней бровки откоса. Принимая во внимание некоторые опасения относительно снижения устойчивости склонов с учетом веса деревьев, парусности их крон, меньшей приживаемостью растительных сообществ в верхней части склона, возникает предположение о целесообразности осуществления частичной фиторекультивации склона в пределах нижней его части.

В гипотетической модели откоса с учетом армирующих свойств корневых систем деревьев принимается схема посадки деревьев в три ряда: средний ряд – у основания нижней бровки откоса, а два остальных ряда – на расстоянии $l = 4 - 5$ м от среднего ряда (рис. 5). При этом один ряд деревьев следует высаживать непосредственно на откосе. В модели принимается среднее расстояние горизонтального распространения корней до 5 м.

С одной стороны, подобное расположение древесной растительности противоречит общепринятым практикам лесотехнической рекультивации. Однако, учитывая

потенциальное расположение поверхности скольжения массива пород у нижней бровки откоса, целесообразно выполнить геомеханическую оценку армирующих свойств корневых систем древесно-кустарниковых растений на склоне в программе Phase2.

Геометрические параметры откоса задаются по вышеописанному алгоритму. Для учета армирующих свойств корней деревьев в нижней части откоса задаем сложную форму гипотетического фитоанкера приближенную морфологически корневым системам древесной растительности, представленным на рис. 1.

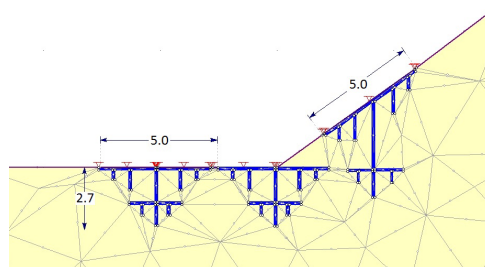


Рис. 5. Геометрические параметры и расположение корневых систем древесной растительности (гипотетических фитоанкеров) на откосе

Параметры сложного фитоанкера следующие: нормальная жесткость – 100000 кПа/м; жесткость на сдвиг – 10000 кПа/м.

Графическое изображение максимальных деформаций и смещений в откосе с учетом армирующих свойств корней деревьев на склоне представлено на рис. 6. Согласно результатам расчетов устойчивость откоса, закрепленного древесной растительностью, увеличилась на 44,7% ($KЗУ = 1,65$) по сравнению с незакрепленным. Круглоцилиндрическая поверхность скольжения является менее выраженной, а нижняя ее часть выходит в область верхнего фитоанкера, где максимальные сдвиговые деформации увеличились на порядок, и достигают значений $e_{max} = 0,45$. Вторая зона сдвиговых деформаций ($e_{max} = 0,150$) наблюдается на уровне нижней бровки

между верхним и центральным фитоанкерами (рис. 6, а). Общие смещения пород увеличились в 2 раза и варьируют в диапа-

зоне $d = 0,65 - 1,43$ м (рис. 6, б). Смещения пород в области закрепления фитоанкерами практически отсутствуют.

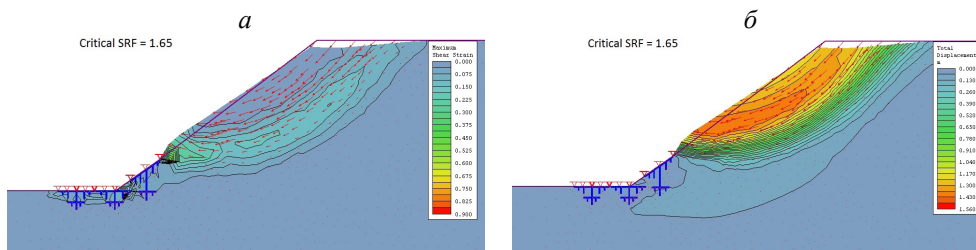


Рис. 6. Графическое изображение максимальных деформаций (а) и смещений (б) в откосе с учетом армирующих свойств корней деревьев на склоне

Результаты расчетов КЗУ для закрепленного откоса, представленные на рис. 7, свидетельствуют об увеличении устойчивости на 8 – 26% для рассматриваемого диапазона геометрических параметров. При этом явление обрушения откоса ($KЗУ = 1,0$) возникает при следующих геометрических параметрах: $H_4 = 30$ м и $\alpha = 62^\circ$, $H_5 = 35$ м и $\alpha = 60^\circ$, $H_6 = 40$ м и $\alpha = 52^\circ$.

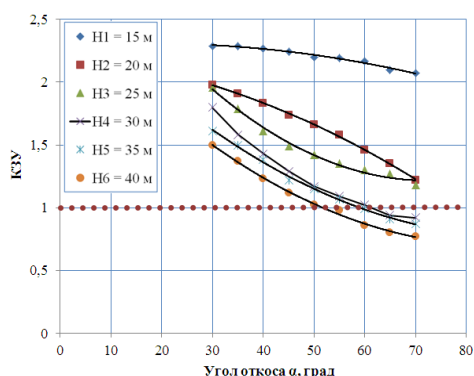


Рис. 7. Зависимость КЗУ от геометрических параметров с учетом фитоанкеров

В целом, при заданных геометрических параметрах и физико-механических характеристиках устойчивость откоса с фитоанкерами обеспечивается при $\alpha \leq 52^\circ$, что на

12° больше, чем без проведения фиторекультивационных мероприятий.

Таким образом, результаты геомеханической оценки армирующих свойств корневых систем на оползнеопасных склонах свидетельствуют о достаточной эффективности фиторекультивации естественных и техногенных склонов при условии правильного выбора видов древесной растительности и способа их высадки на склоне. Установлено, что устойчивость откоса, закрепленного древесной растительностью в нижней части, увеличивается на 44,7% по сравнению с незакрепленным откосом. Также проведение фиторекультивационных мероприятий на откосе обеспечивает его устойчивое состояние при более крутых углах наклона.

ВЫВОДЫ

Закрепление оползнеопасных склонов с помощью деревьев и кустарников является наиболее экологичным способом защиты поверхности от эрозии, т.к. при этом создаются зеленые насаждения, выполняющие многие фитомелиоративные функции. Геомеханическая оценка влияния корневых систем на устойчивость земной поверхности носит междисциплинарный характер, так как находится на стыке биоло-

гических и геотехнических наук. В биологическом контексте (морфология, физиология, экология растений) исследования корневых систем развиваются в рамках научного направления, получившего название корневедение. Геомеханические аспекты армирующих свойств корневых систем древесно-кустарниковых растений на склонах и состояние корнесодержащих слоев грунта изучены в меньшей степени. Ком-

плексная задача специалистов в области дендрологии, геологии и геомеханики применительно к засаживанию склонов заключается в учете как геомеханических характеристик откосов, физико-механических свойств грунтов и пород, биологических и экологических особенностей древесных пород, армирующих характеристик корневых систем и возможно других факторов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковров А.С. Экосистемный подход при лесотехнической рекультивации техногенных ландшафтов / А.С. Ковров // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: НГУ, 2013. – № 40. – С. 194 – 203.

2. Красильников П.К. Классификация корневых систем деревьев и кустарников / П.К. Красильников // Лесоведение. – 1970. – № 3. – С. 35 – 44.

3. Калинин М.И. Корневедение / М.И. Калинин. – М.: Экология, 1991. – 173 с.

4. Рыжков И.Б. Влияние корневой системы древесной растительности на устойчивость склонов / И.Б. Рыжков, Р.Ф. Мустафин, А.А. Арсланов // Вестник МГСУ. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 210 – 214.

5. Арсланов А.А. Расчет устойчивости склонов при наличии древесно-кустарниковой растительности / А.А. Арсланов, И.Б. Рыжков, Р.Ф. Мустафин // Российский электронный научный журнал. – Режим доступа: <http://journal.bsau.ru/directions/06-00-00-agricultural-sciences/315/>.

6. Автономов А.Н. Комплексная оценка биологической устойчивости экзогенных склоновых экологических систем / А.Н. Автономов // Вопросы современной науки и практики. Университет им В.И. Вернадского. – 2013. – № 4(48). – С. 30 – 33.

7. Ковров А.С. Моделирование устойчивости борта карьера методом конечных элементов / А.С. Ковров // Форум гірників: матеріали міжнар. конф. – Д.: НГУ, 2010. – Т. 4. – С. 94 – 102.

ОБ АВТОРАХ

Ракишев Баян Ракишевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой открытых горных работ Казахского национального исследовательского технического университета им. К.И. Сатпаева.

Ковров Александр Станиславович – к.т.н., доцент кафедры экологии Национального технического университета.

Федотов Вячеслав Викторович – ассистент кафедры экологии Национального технического университета.