

Код МРНТИ 52.13.05



*С.Г. Тянь

Товарищество с ограниченной ответственностью «Гео инженеринг» (г. Караганда, Казахстан)

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ УГОЛЬНОГО РАЗРЕЗА

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования систем управления горным предприятием на примере K-Mine для расчета устойчивости бортов угольных разрезов. Проанализированы основные функциональные возможности, реализованные в программном комплексе. Раскрыта необходимость внедрения программного комплекса, как основы для создания геомеханической модели в качестве цифровой копии угольного разреза. Особое внимание уделено расчетам устойчивости различными методами в соответствии с нормами и правилами в области промышленной безопасности. Представлены примеры практических расчетов определения коэффициента запаса устойчивости для бортов разрезов и отвалов; оценки фактического и проектного состояний уступов и бортов разрезов, ярусов отвалов.

Ключевые слова: расчет устойчивости бортов, расчет коэффициента запаса устойчивости, 3D моделирование, геомеханические модели, цифровой рудник, промышленная безопасность.

Тұрақтылықтың геомеханикалық есептері көмір разрезінің ернеулері

Аңдатпа. Мақалада ашық көмір шахталары карьерінің қабырғаларының тұрақтылығын есептеу үшін K-Mine бағдарламалық жасақтамасын пайдалану мәселелері қарастырылады. Сондай-ақ, ол бағдарламалық жасақтамада жүзеге асырылатын негізгі функцияларды көрсетеді және геомеханикалық модель-кесудің сандық көшірмесін жасау үшін негіз ретінде оны енгізудің өзектілігін көрсетеді. Өнеркәсіптік қауіпсіздік стандарттары мен ережелеріне сәйкес әртүрлі әдістерді қолдана отырып, тұрақтылық коэффициентін есептеуге ерекше назар аударылады. Құжат карьерлер мен үйінділер қабырғаларының тұрақтылық коэффициентін қалай есептеу керектігін, сондай-ақ карьерлер орындықтары мен қабырғаларының, сондай-ақ үйінділер үшін көтергіштердің нақты және жобалық жағдайын бағалауды көрсетеді.

Түйінді сөздер: карьер қабырғасының тұрақтылығын есептеу, тұрақтылық коэффициентін есептеу, 3D модельдеу, геомеханикалық модельдер, сандық шахта, өнеркәсіптік қауіпсіздік.

Geomechanical calculation of pit wall stability for open-pit coal mine

Abstract. In opencast coal mining, the stability of bench slopes and open-pit walls is of great importance since it ensures the safety and efficiency of open-pit mining and provides for a rhythmical production of the company. The article considers the issues of using mining management systems based on the K-Mine software to calculate the pit wall stability of open-pit coal mines. It also shows the basic functionality implemented in the software and highlights the urgency of introducing it as the basis for creating a geomechanical model – a digital copy of the section. Particular attention is focused on calculating the stability factor using various methods in accordance with industrial safety standards and regulations. The paper demonstrates how to calculate the stability factor for pit walls and dumps, as well as estimate the actual and design status of benches and pit walls, along with dump lifts.

Key words: geomechanics, calculation methods, parameters of pit walls, benches and dumps, stability factor, 3D modeling, geomechanical models, digital mine, industrial safety, monitoring.

Введение

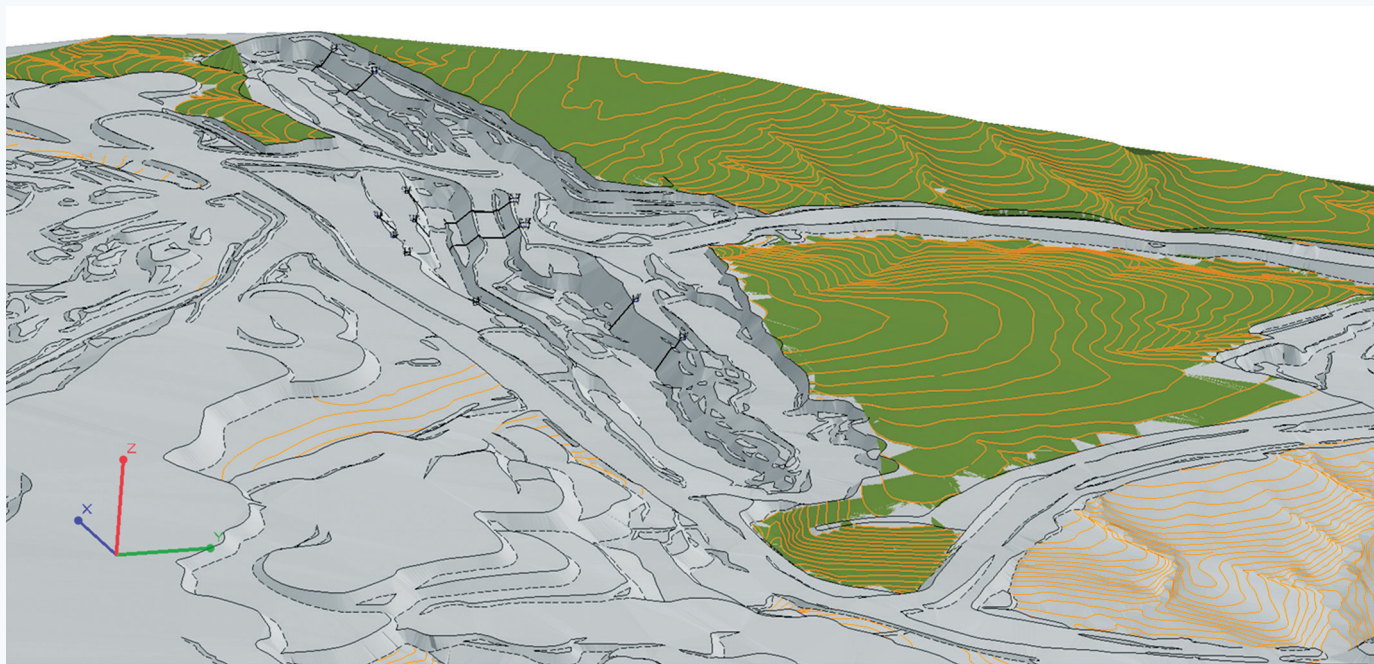
Одними из основных вопросов обработки пластовых месторождений полезных ископаемых открытым способом, безусловно, являются: рациональное извлечение угля, обеспечение безопасности ведения горных работ, а также снижение различных сопутствующих рисков. Нормы и правила в области промышленной безопасности Республики Казахстан устанавливают требования к способам и методам расчета устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов, организации систем наблюдений за развитием деформационных процессов, определяют меры по предупреждению рисков на всех стадиях проектирования, эксплуатации и ликвидации карьеров, разрезов и отвалов.

В настоящее время решение проблемы повышения устойчивости в разрезах представляет не только научный, но и практический интерес. Геомеханическое обеспечение устойчивости горных выработок – сложная

и многокомпонентная задача, включающая в себя изучение геометрии недр, механизмов возникновения и развития деформационных процессов, физико-механических свойств полезных ископаемых. Создание цифровых геомеханических моделей с помощью специализированного программного обеспечения для управления горным предприятием – это новые возможности управления производственными процессами, определения оптимальных углов откосов и обеспечение их устойчивости на открытых разработках, а также принятия оптимальных управленческих решений¹.

Высокая интенсивность ведения горных работ, различные горно-геологические условия разрезов, большой парк горно-транспортного оборудования требуют качественного управления и цифровой трансформации. Также для эффективного и безопасного функционирования угольных предприятий необходима достоверная и максимально полная информация о месторождениях.

¹Капутин Ю.Е. Вероятностное стратегическое планирование развития карьеров. – СПб.: Недра, 2019. – 316 с.



**Рис. 1. Подготовка 3D-моделей горнотехнических объектов для расчета устойчивости.
Сурет 1. Тұрақтылықты есептеу үшін тау-кен нысандарының 3D-модельдерін дайындау.
Figure 1. Preparation of 3D models of mining facilities for calculating stability.**

Достижение этой цели возможно путем создания геомеханических моделей месторождений².

Программное обеспечение K-Mine содержит максимально полный спектр прикладных задач, поддерживает максимальную скорость обработки данных, имеет удобный и интуитивно понятный интерфейс. Это не просто готовый инструмент для работы, это – система, которую специалисты настраивают индивидуально под пользователя с учетом горно-геологических условий и требований, продиктованных особенностями технологии ведения работ на предприятии.

С помощью указанных программных продуктов производится комплексная автоматизация процессов управления и инженерного сопровождения горных работ открытым способом, а также обеспечивается:

- создание цифровых двойников месторождений полезных ископаемых и объектов горной технологии;
- комплексное решение горно-геологических и горнотехнических задач: маркшейдерии, геологии, планирования и проектирования горных работ, интеграции с существующими системами диспетчерского управления транспортом, а также точного позиционирования буровых станков;
- совместное использование 3D моделей несколькими службами³.

Геомеханические модели и расчет устойчивости

Для угледобывающих предприятий проектирование устойчивых и экономически целесообразных параметров бортов разрезов и горных выработок – актуальное направление на всех стадиях планирования, проектирования горных работ и текущей эксплуатации рудников.

Рассмотрим детальнее программный комплекс расчета устойчивости бортов, методы расчетов которого максимально соответствуют нормам и правилам в области промышленной безопасности.

Программный комплекс предназначен для определения запаса устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов. Исходными данными для работы этого комплекса являются интегрированные 3D модели, включающие в себя актуальное состояние исследуемого объекта (разрез, карьер, отвал) или его участка, а также 3D модели геологической среды, описывающие геолого-структурные и прочностные свойства горного массива, составляющего основу исследуемого объекта³ (рис. 1) [1].

В алгоритмах работы программного комплекса расчета устойчивости бортов реализованы основные методы расчета:

- **метод алгебраического сложения сил** применяется для условий плоского борта при отсутствии неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления для однородного изотропного массива с горизонтальным залеганием слоев при отсутствии ослабленных контактов;
- **метод многоугольника сил** применяется для расчета устойчивости откосов, сложенных трещиноватыми горными породами и поверхностями ослабления большой протяженности.

Эти методы являются универсальными и используются для решения широкого круга задач по определению устойчивости бортов карьеров, разрезов и отвалов, насыпей и прочих инженерных

²Арсентьев А.И., Советов Г.А. и др. Планирование развития горных работ в карьерах. – М.: Недра, 1972. – 152 с.

³Использование геоинформационной системы K-Mine в различных сферах деятельности. // Сборник докладов III Международного научно-практического семинара «SVIT GIS-2016». – Кривой Рог: ФЛ-П Чернявский Д.А., 2016. – 280 с.



Рис. 2. Расчет коэффициента устойчивости с помощью цифровой геолого-маркшейдерской модели.
Сурет 2. Сандық геологиялық маркшейдерлік моделін қолдана отырып тұрақтылық коэффициентін есептеу.
Figure 2. Calculation of the stability coefficient using the digital geological surveying model.

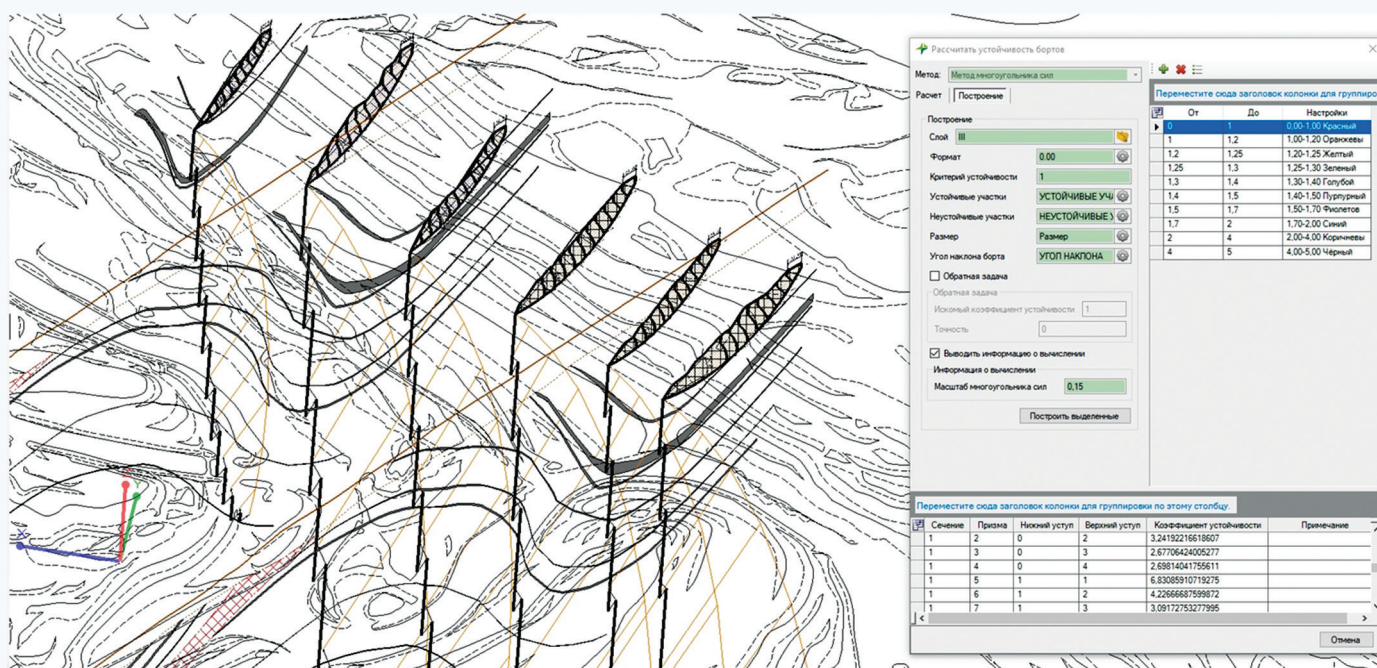


Рис. 3. Визуализация результатов расчетов на геомеханической модели.
Сурет 3. Жасалған геомеханикалық модельде есептеу нәтижелерін визуализациялау.
Figure 3. Visualization of the calculation results on the geomechanical model.

сооружений (определение устойчивого состояния бортов, определение коэффициента запаса устойчивости и других параметров)³⁻⁵.

Расчет коэффициента устойчивости проводится на цифровом двойнике разреза. Для этого используются цифровые геолого-маркшейдерские модели

(рис. 2), актуализируемые силами маркшейдерских служб предприятия. Модели для анализируемого участка борта разреза или отвала формируются путем построения множественных пересечений (разрезов) в границах, задаваемых пользователем. В расчетные схемы вводятся данные инженерных

⁴Рудько Г.І., Назаренко М.В., Хоменко С.А., Нецький О.В., Федорова І.А. Геоінформаційні технології в надрокористуванні: на прикладі ГІС К-Mine. – Київ: Академпрес, 2011. – 336 с.

⁵Методические указания по расчету устойчивости и несущей способности отвалов. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 126 с.

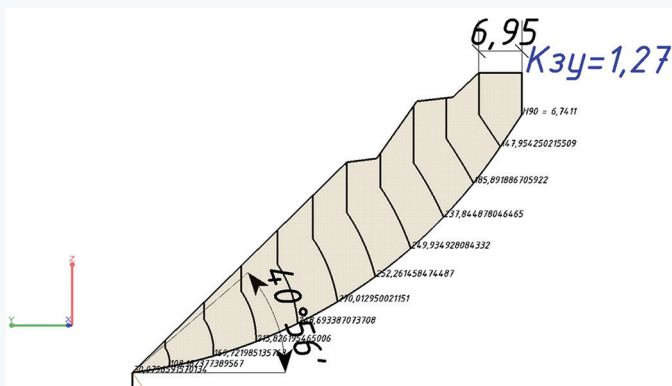


Рис. 4. Результаты геомеханических расчетов.
Сурет 4. Геомеханикалық есептеулердің нәтижелері.
Figure 4. Results of geomechanical calculations.

изысканий с расчетными значениями физико-механических свойств пород, слагающих толщу борта исследуемого участка, и прочих показателей³ [2].

В результате выполнения вычислений на цифровых геомеханических моделях отображаются данные о параметрах устойчивости выбранного участка с обозначением устойчивых, неустойчивых и недостаточно устойчивых участков (рис. 3). В составе программного комплекса также реализована возможность фильтрации выводимых результатов, подготовки отчета о проведенных расчетах, настройки параметров и выборе критериев расчета.

При расчете устойчивости бортов и уступов разреза, в том числе с учетом воздействия сейсмических сил и нагрузок от горного оборудования, с использованием теории предельного равновесия особой популярностью пользуется наиболее универсальный метод векторного сложения сил (многоугольника сил).

Представим детальнее пример расчета коэффициента устойчивости методом векторного сложения сил на примере угольного разреза. Метод отличается тем, что учитываются реакции между блоками, на которые по определенным признакам разбивается призма возможного обрушения (рис. 4).

При расчете методом многоугольника сил точность расчета зависит от расположения границ между смежными блоками и от направления реакции между ними. Для откоса, находящегося в предельном устойчивом состоянии с заданным коэффициентом запаса, многоугольник сил, построенный по наиболее напряженной поверхности скольжения для всей призмы возможного обрушения, должен замыкаться. Это означает, что его устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса, близким к введенному в прочностные характеристики пород угля (рис. 5). Если при расчете многоугольника сил не замыкается, то устойчивость откоса не соответствует принятому коэффициенту запаса. И расчет нужно произвести повторно по наиболее напряженной поверхности скольжения при других значениях коэффициентов запаса³ [3, 4].

Программный комплекс для расчета устойчивости учитывает множество факторов и особенностей развития геомеханических процессов и явлений, сопровождающих эксплуатацию разрезов, и дает возможность точно оценивать фактическое и проектное состояние уступов и бортов разрезов, ярусов отвалов; определять требуемые положения уступов, бортов разрезов, ярусов отвалов для обеспечения необходимого запаса устойчивости; формировать и визуализировать 3D карты предельно допустимых углов откосов; а также минимизировать площадь отчужденных земель и затрат на отвалообразование [1, 5].

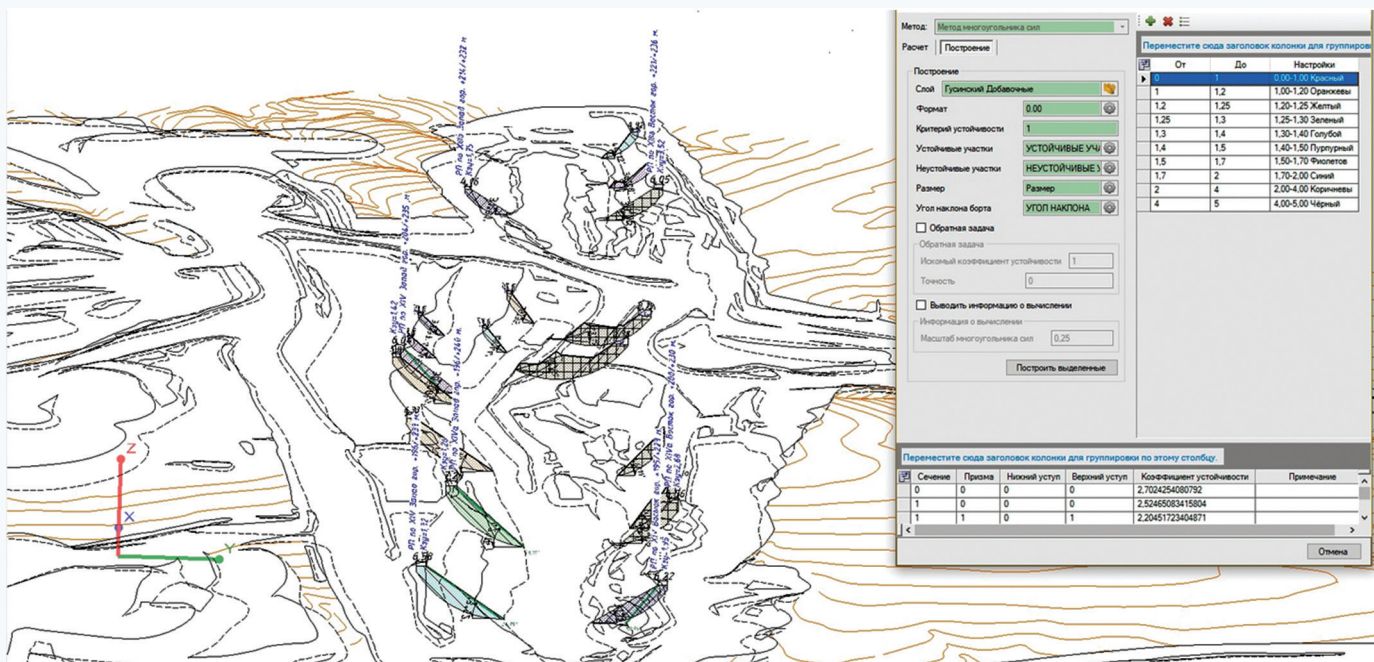


Рис. 5. Определение запаса устойчивости.
Сурет 5. Тұрақтылық қорын анықтау.
Figure 5. Determination of the stability margin.

Результаты использования K-MINE на угольных предприятиях

Заложенные в основу программного комплекса для расчета устойчивости алгоритмы и методы прошли многократную практическую поверку в условиях крупных горнодобывающих предприятий для определения устойчивого состояния бортов карьеров. Эффективность использования продукта «Устойчивость бортов» подтверждена успешным использованием на множестве предприятий.

Результаты использования – это:

- повышение безопасности ведения горных работ в разрезе и при формировании отвалов;

- определение максимально безопасных параметров конструкций отвалов, что предоставляет дополнительные возможности увеличения максимальной высоты отвалов, минимизируя площадь отчужденных земель и затрат на отвалообразование;

- оптимизация конечных контуров разреза на основе 3D геомеханической модели разреза для уменьшения объемов вскрышных пород и снижения себестоимости добычи полезных ископаемых.

Кроме того, в дальнейшем – это дополнительные перспективы в области планирования горных работ и повышения прибыли в условиях волатильного рынка угля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Назаренко В.М., Назаренко М.В., Хоменко С.А. Новые подходы при создании автоматизированных систем управления горными работами на базе геоинформационной системы K-MINE. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, 2013. – №6. – С. 155-168 (на русском языке)
2. 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. – Вып. 1. – С. 64-67 (на русском языке)
3. Шолох С.Н. Автоматизированная система управления горными работами. // Горный журнал Казахстана. – Алматы, 2019. – №8. – С. 8-11 (на русском языке)
4. Назаренко М.В., Хоменко С.А. K-MINE: комплексная интегрированная система планирования и управления горными работами. // Цветные металлы и минералы 2018 Сборник докладов X международного конгресса. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2018. – С. 1215-1218 (на русском языке)
5. Капустина Н.П., Войтова Н.А. Геоинформационная система K-MINE. // Современные информационные технологии в экономике, образовании и бизнесе: Сборник материалов I Межвузовской заочной студенческой научно-практической конференции. – 2014. – С. 198-200 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Назаренко В.М., Назаренко М.В., Хоменко С.А. K-MINE геоақпараттық жүйесі базасында тау-кен жұмыстарын басқарудың автоматтандырылған жүйесін құрудың жаңа тәсілдері. // Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені. – М.: Тау кітабы, 2013. – №6. – Б. 155-168 (орыс тілінде)
2. Назаренко Н.В., Хоменко С.А. «K-MINE: орнықтылықты есептеу» бағдарламалық кешеніндегі карьерлер мен үйінділер борттары кемерлерінің орнықтылығын есептеудің инженерлік әдістері. // Жер Қойнауын Ұтымды Игеру. – 2016. – Шығ. 1. – Б. 64-67 (орыс тілінде)
3. Шолох С.Н. Тау-кен жұмыстарын басқарудың автоматтандырылған жүйесі. // Қазақстанның тау-кен журналы. – Алматы, 2019. – №8. – Б. 8-11 (орыс тілінде)
4. Назаренко М.В., Хоменко С.А. K-MINE: комплексная интегрированная система планирования и управления горными работами. // Түсті металдар мен минералдар 2018: X халықаралық конгрестің есептер жинағы. – Красноярск: Ғылыми-инновациялық орталық – 2018. – Б. 1215-1218 (орыс тілінде)
5. Капустина Н.П., Войтова Н.А. K-MINE геоақпараттық жүйесі. // Экономика, білім және бизнестегі заманауи ақпараттық технологиялар: I ЖОО аралық сырттай студенттік ғылыми-тәжірибелік конференцияның материалдар жинағы. – 2014. – Б. 198-200 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Nazarenko V.M., Nazarenko M.V., Khomenko S.A. Novye podxody pri sozdanii avtomatizirovannyx sistem upravleniya gornymi rabotami na baze geoinformacionnoj sistemy K-MINE [New approaches to automated control systems for mining management based on K-MINE GIS]. // Mining information and analytical bulletin. – M.: Mining Book, 2013. – №6. – P. 155-168 (in Russian)

2. Nazarenko N.V., Homenko S.A. *Inzhenernye metody rascheta ustojchivosti ustupov bortov kar'erov i otvalovv programnom komplekse «K-MINE: Raschet ustojchivosti» [Engineering methods for calculating the stability of ledges of quarry sides and dumps in the software package «K-MINE: Stability calculation»]. // Racional'noe Osvoenie Nedr = Rational Development of Mineral Resources. – 2016. – Vol. 1. – P. 64-67 (in Russian)*
3. Sholoh S.N. *Avtomatizirovannaja sistema upravlenija gornymi robotami [Automated mining operations management system]. // Gornyj zhurnal Kazahstana = Mining Journal of Kazakhstan. – Almaty, 2019. – №8. – P. 8-11 (in Russian)*
4. Nazarenko M.V., Homenko S.A. *K-MINE: kompleksnaya integrirovannaya sistema planirovaniya i upravleniya gornymi robotami [K-MINE: a comprehensive integrated mining planning and management system]. // Cvetnye metally i mineraly 2018: Sbornik dokladov X mezhdunarodnogo kongressa = Non-ferrous Metals and Minerals 2018: Collection of reports of the X International Congress. – Krasnoyarsk: Nauchno-innovacionnyj centr = Scientific and Innovation Center, 2018. – P. 1215-1218 (in Russian)*
5. Kapustina N.P., Vojtova N.A. *Geoinformacionnaya sistema K-MINE [Geoinformation system K-MINE]. // Sovremennye informacionnye texnologii v e'konomike, obrazovanii i biznese: Sbornik materialov I Mezhvuzovskoj zaochnoj studencheskoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Modern information technologies in economics, education and business: Collection of materials of the I Intercollegiate Correspondence Student Scientific and Practical conference. – 2014. – P. 198-200 (in Russian)*

Сведения об авторах:

Тян С.Г., докторант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых» Карагандского Технического Университета им. А. Сагинова (г. Караганда, Казахстан), директор Товарищества с ограниченной ответственностью «ГЕО ИНЖЕНЕРИНГ» (г. Караганда, Казахстан), info@geo-in.kz; <https://orcid.org/0000-0002-3566-1437>

Авторлар туралы мәлімет:

Тян С.Г., А. Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің, «Пайдалы қазбалар кен орындарын игеру» кафедрасының докторанты (Қарағанды қ., Қазақстан), «ГЕО ИНЖЕНЕРИНГ» Жауапкершілігі шектеулі серіктестігінің директоры (Қарағанды қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Tyan S.G., Doctoral Candidate at the Department of «Development of Mineral Deposits» of the Karaganda Technical University named after A. Saginov (Karaganda, Kazakhstan), CEO of the «GEO ENGINEERING» Limited Liability Partnership (Karaganda, Kazakhstan)