УДК 622.00

К.Р. Аргимбаев, Д.Н. Лигоцкий, М.О. Бовдуй, К.В. Миронова

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОТЕРЬ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАГАЮЩЕГО ЭКСКАВАТОРА

Приведена технология формирования техногенного месторождения с последующей отработкой с использованием шагающего экскаватора, получено эмпирическое уравнение, описывающее забой шагающего экскаватора, построена 3D-модель забоя шагающего экскаватора при различных глубинах копания, выведена математическая формула треугольника потерь, образующихся в результате пересечения рабочих зон шагающего экскаватора. Данная технология позволит по-иному взглянуть горнодобывающим предприятиям на свою политику в области промышленных отходов и активно формировать, разрабатывать хвостохранилища.

Ключевые слова: формирование техногенного месторождения, шагающий экскаватор, потери, 3D-модель, забой, рабочая зона, секция.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-35-42

Техногенные месторождения — это уникальный источник многих редких и рассеянных элементов [1—3]. К примеру, основной источник для получения германия — золы ТЭЦ, источником рения является пыль обжига молибденовых концентратов, а отходы переработки бокситов и нефелинов могут дать галлий. Техногенные месторождения становятся всё более важным источником многих видов минерального сырья. Суммарное содержание полезных компонентов, накапливающихся в техногенных месторождениях за 20—30 лет, сопоставимо, а иногда и превышает их количество в ежегодно добываемых рудах [4—8].

Итак, мы предлагаем уникальную технологию формирования посекционного техногенного месторождения. Формирование производится из дамб различных конструкций, как показано на рис. 1. Секции делятся перегородками из скальной вскрыши. Ширина перегородки равна минимальной ширине рабочей площадки экскаватора, а ширина секции — удвоенному радиусу рабочей зоны шагающего экскаватора.

Выемка техногенной смеси осуществляется в пределах выбранной секции, горный транспорт располагается на дамбе или скальной перегородке, транспортировка техногенного сырья производится непосредственно на обогатительную фабрику для дальнейшей переработки или использования в различных отраслях промышленности. Укладка сме-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 5. С. 35–42.
© К.Р. Аргимбаев, Д.Н. Лигоцкий, М.О. Бовдуй, К.В. Миронова. 2018.

си производится как односторонним выпуском, так и рассредоточенным выпуском по длине секции.

Целесообразность разработки техногенного месторождения определяется технологией разработки месторождения и типом применяемого оборудования. Одной из основных целей является снижение стоимости добычи [9, 10].

Выемка техногенной смеси производится с помощью шагающего экскаватора в пределах секции с расположением его на дамбе или скальной перегородки секции (рис. 2).

На сегодняшний день шагающий экскаватор является одним из самых высокопроизводительных выемочно-погрузочных оборудований. К особенностям данной техники можно отнести большой радиус рабочей зоны, низкое удельное давление на площадку установки, глубину копания, но траектория черпания ковша не всегда предсказуема [11, 12].

Для того, чтобы изучить поведение ковша экскаватора и выявить уравнение, которое описывало бы кривую добычного забоя, был проведен ряд исследований методом маркшейдерской съемки с использованием тахеометра SOKKIA 650 RX и призменного отражателя. Для получения достоверных данных были вырыты котлованы различной глубины. Количество и расстояние между пикетами определялось по инструкции топографической съемки масштаба 1:500.

Шагающий экскаватор ЭШ 10/70, изображенный на рис. 3, был предоставлен компанией ОА «БКО», исследование проводилось в карьере «Окладнево».

После проведения натурного исследования был произведен аппроксимационный анализ полученных данных с помощью программы Mathematica 11 от компании Wolfram. При подборе эмпирического уравнения, которое описывало бы кривую котлована, были рассмотрены различные кривые и типы уравнений, а по наиболее подходящим были выявлены зависимости, которые представлены на рис. 4.

Также по полученным данным маркшейдерской съемки было произведено 3D-моделирование в программе Autocad CIVIL 3D (рис. 5).

Итак, анализируя приведенные данные, полученные графики и результаты компьютерного моделирования, можно утверждать, что характер забоя шагаю-

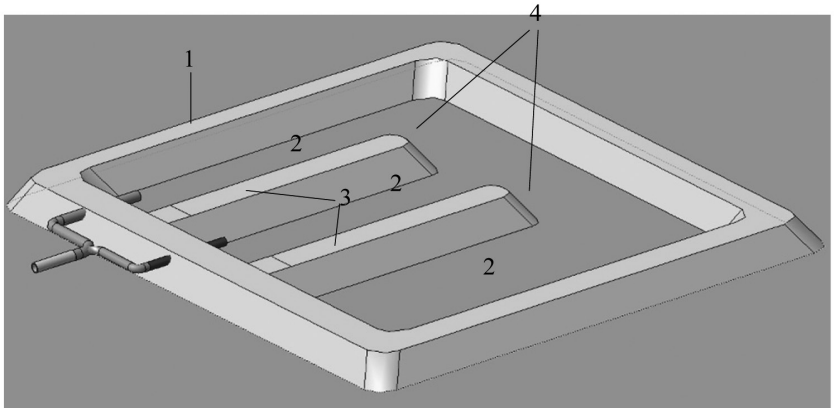

Рис. 1. 3D-модель сформированного техногенного месторождения: 1 — дамба различной конструкции; 2 — секции укладки техногенного сырья; 3 — перегородка из скальной вскрыши; 4 — промежуток между скальной перегородкой и дамбой

Fig. 1. 3D model of a man-made waste deposit: 1—variable structure dam; 2—sections to place mine waste; 3—divide wall made of hard overburden; 4—clearance gap between the hard rock divide wall and dam

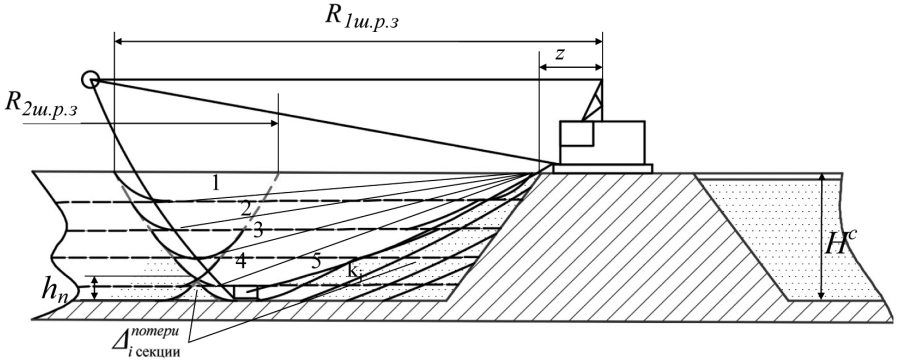

Рис. 2. Порядок отработки секции с использованием шагающего экскаватора: H^c — высота секции, м; $R_{1ш.р.з.}$ — радиус рабочей зоны 1-го экскаватора, м; $R_{2ш.р.з.}$ — радиус рабочей зоны 2-го экскаватора, м; $t_{сл}$ — мощность слоя материала, м; $\Delta^{потери}_{i\ секции}$ — величина потерь при пересечении рабочих зон экскаваторов в i-ой секции, а также не добытый материал в силу ограниченности технических параметров выемочно-погрузочного оборудования; $h_п$ — высота потерь, м; 1, 2, 3, 4, 5, k_j — порядок отработки блоков материала; z — безопасное расстояние до бровки уступа, м

Fig. 2. Sequence of mine waste treatment in a section using a walking excavator: H^c—section height, m; $R_{1ш.р.з}$—radius of operating zone of excavator 1, m; $R_{2ш.р.з.}$— radius of operating zone of excavator 2, m; $t_{сл}$—thickness of waste layer, m;$\Delta^{потери}_{i\ секции}$—loss due to intersection of operating zones of excavators in an i-th section and nonmined material due to technical constraints of mining–loading equipment; $h_п$—height of loss, m; 1, 2, 3, 4, 5, k_j—sequence of block-wise development; z—safe distance to the bench edge, m

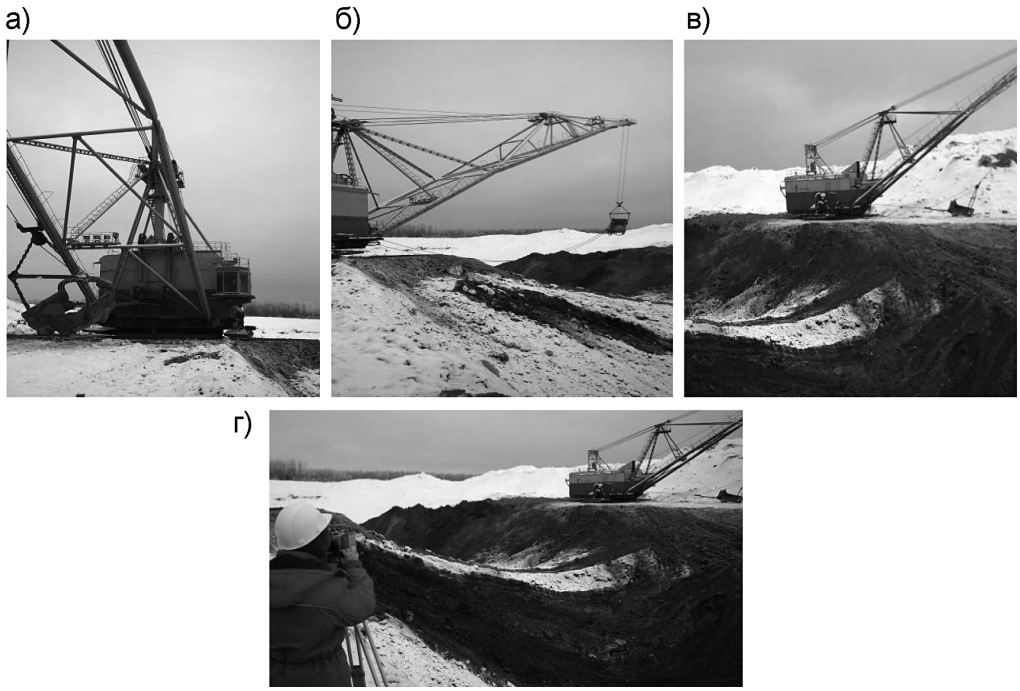

Рис. 3. Работа шагающего экскаватора и производство съемки добычных забоев: шагающий экскаватор ЭШ 10/70 (а); процесс выемочных работ (б); завершение процесса выемочных работ (в); производство маркшейдерской съемки (г)

Fig. 3. Operation of a walking excavator and production face surveying: walking excavator ESH-10/70 (a); extraction (b); completion of extraction (v); surveying (g)

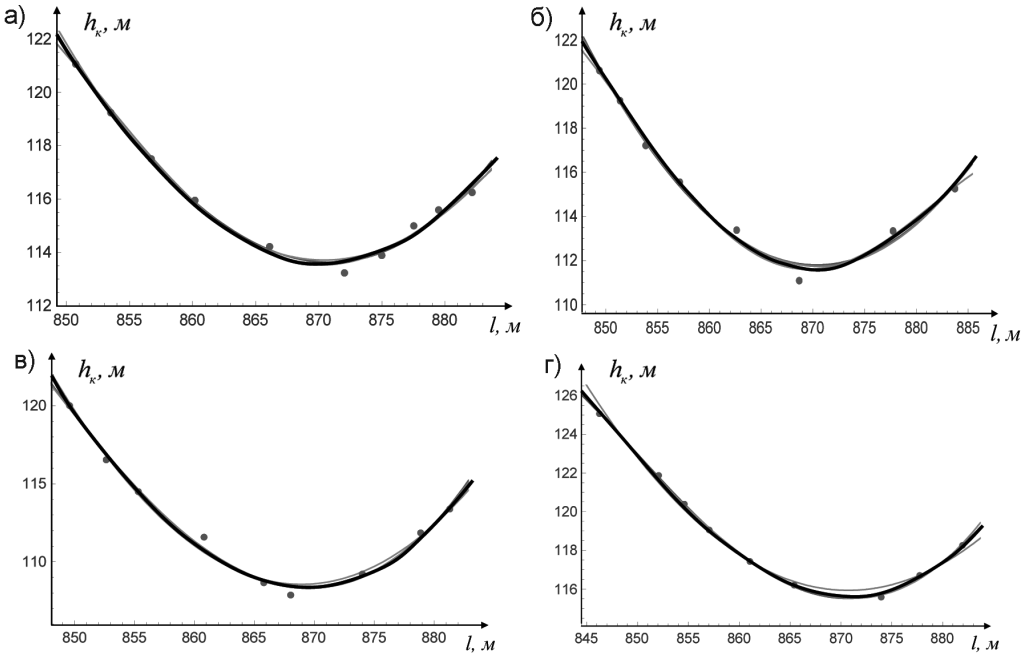

Рис. 4. Графики добычных забоев шагающего экскаватора и их аппроксимирующие кривые различных уравнений: забой № 1 (а); забой № 2 (б); забой № 3 (в); забой № 4 (г)

Fig. 4. Plots of production faces of walking excavators and approximating curves based on different equations: face 1 (a); face 2 (b); face 3 (v); face 4 (g)

щего экскаватора представляется уравнением

$$y = -a \cdot x^2 + b \cdot x - c$$

где *a, b* — эмпирические коэффициенты, зависящие от модели шагающего экскаватора; *c* — константа уравнения.

Далее установим шагающие экскаваторы друг напротив друга и найдем точки пересечений рабочих зон шагающего экскаватора и составим систему уравнений для нахождения координат точек пересечения рабочих зон, при

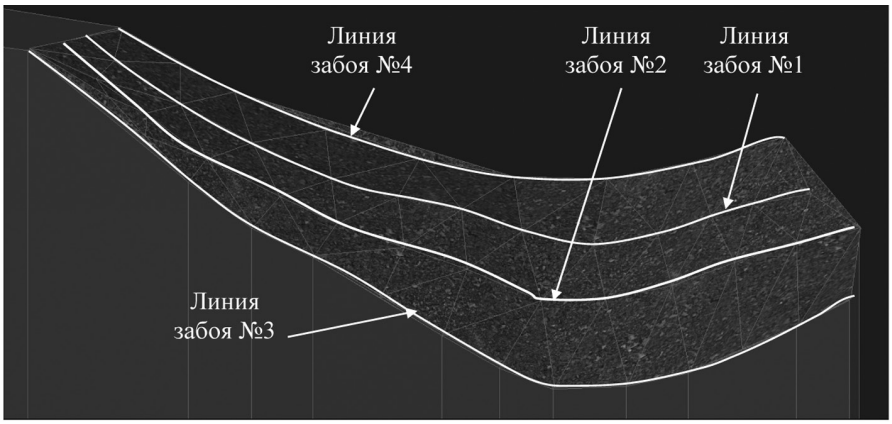

Рис. 5. 3Д модель, объединяющая все забои шагающего экскаватора ЭШ-10/70

Fig. 5. 3D model integrating all face areas of walking excavator ESH-10/70

этом примем координаты расположения первого экскаватора $x_{ш1} = 0$ и $y_{ш1} = 0$

$$\begin{cases}(-a\cdot x)^2+(b\cdot y)^2-c=R^2_{1P.З.}\\(-a\cdot x-x_{ш2})^2+(b\cdot y-y_{ш2})^2-c=R^2_{2P.З.}\end{cases}$$

где $x_{ш2}$, $y_{ш2}$ — координаты местоположения 2-го экскаватора; $R_{1P.З.}$ и $R_{2P.З.}$ — радиусы рабочих зон первого и второго экскаватора; x и y — точки пересечения рабочих зон экскаваторов.

Решая данную систему уравнения, выразим x

$$x=\frac{c+by\cdot y_{ш2}}{-a\cdot x_{ш2}}$$

где c — постоянная величина.

$$c=\frac{R^2_{2P.З.}-x^2_{ш2}-y^2_{ш2}-R^2_{1P.З.}}{-2}$$

При $x_{э2} \neq 0$, когда экскаваторы находятся на одном уровне относительно друг друга, подставляем x в уравнение кривой первой рабочей зоны экскаватора и получаем квадратное уравнение

$$\begin{gathered}(-b\cdot y)^2\cdot(y^2_{ш2}+x^2_{ш2})-\\-2\cdot y_{ш2}\cdot c\cdot(-b\cdot y)+\\+(c^2-R^2_{1P.З.}\cdot x^2_{ш2})=0\end{gathered}$$

Для упрощения решения введем переменные

$$f=(y^2_{ш2}+x^2_{ш2});\ g=-2\cdot y_{ш2}\cdot c;$$
$$m=c^2-R^2_{1P.З.}\cdot x^2_{ш2}$$

Тогда

$$D=g^2-4\cdot f\cdot m$$

Если $D < 0$ — рабочие зоны экскаваторов не пересекаются, это приводит к наибольшим потерям техногенного сырья (данный случай не рассматривается);

$D = 0$ — рабочие зоны экскаваторов имеют одну общую точку пересечения;

$$y_2=\frac{-g+\sqrt{D}}{2\cdot f};\ x_2=\frac{c+ay\cdot y_{ш2}}{x_{ш2}}$$

$D > 0$ — рабочие зоны экскаваторов имеют две точки пересечения, достигается наименьшая величина потерь техногенного сырья;

$$y_1=\frac{-g+\sqrt{D}}{2\cdot f};\ x_{1,2}=\frac{c+ay_{1,2}\cdot y_{ш2}}{x_{ш2}}$$

В дальнейших расчетах используем точку пересечения рабочих зон с координатами (x_2, y_2), так как выемка осуществляется ниже уровня стояния экскаватора «обратная лопата».

При $x_{э2} = 0$ экскаваторы расположены не на одном уровне (выше или ниже по отношению друг к другу), поэтому ищем решение через y и получаем

$$y_2=\frac{c}{2\cdot y_{ш2}\cdot(-a)};\ x_2=\pm\sqrt{R^2_{1P.З.}-\frac{c^2}{y_{ш2}}}$$

Для дальнейшего решения зададим следующие условия:

При $D < 0$, $x = y = x_2$

$$x_{э2}\neq 0;\ y_{ш1}=y_{ш2}=0;\ |b|=a-H^c;$$
$$y_2=\frac{-g-\sqrt{D}}{2\cdot g};\ x_2=\frac{c-a\cdot y_2\cdot y_{ш2}}{x_{ш2}}$$

где b — нижний предел интегрирования, для определения площади потерь, м.

Тогда высота потерь составит

$$h_{п.}=(H^c+a)-y_2\ ,\ м$$

Площадь потерь в i-ой секции

$$S_{i\ секции}=\left|\int_{-b}^{-y_2}\sqrt{R^2_{1P.З.}-y_2^2}dy-\int_{-b}^{-y_2}\sqrt{R^2_{2P.З.}-(y_2-y_{э2})^2}+x_{ш2}dy\right|,\ м^2$$

Следовательно

$$S_{потерь} = \left(\frac{1}{2} \left| \tan^{-1} \cdot \left(\frac{b}{\sqrt{R_{1P.З.}^2 - b^2}} \right) \cdot R_{1P.З.}^2 - \right. \right.$$

$$- \tan^{-1} \cdot \left(\frac{y_2}{\sqrt{R_{1P.З.}^2 - y_2^2}} \right) \cdot R_{1P.З.}^2 + b \cdot \sqrt{R_{1P.З.}^2 - b^2} - y_2 \cdot \sqrt{R_{1P.З.}^2 - y^2} \left. \right| \right) -$$

$$- \left(\left| \frac{1}{2} \cdot \left(-y_2 \cdot \sqrt{R_{2P.З.}^2 - y_2^2} - R_{2P.З.}^2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y_2}{\sqrt{R_{2P.З.}^2 - y_2^2}} \right) + \right. \right. \right.$$

$$\left. \left. \left. + b \cdot \sqrt{R_{2P.З.}^2 - b^2} + R_{2P.З.}^2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b}{R_{2P.З.}^2 - b^2} \right) - y_2 \cdot x_{ш2} + b \cdot x_{ш2} \right| \right) , \text{ м}^2$$

Результаты проведенного исследования позволят предложить новую модель формирования техногенного месторождения, решить множество вопросов в области безопасности ведения горных работ с помощью шагающего экскаватора, а также выявленное эмпирическое уравнение забоя шагающего экскаватора позволит рассчитать потери добываемого техногенного сырья, которые возникают в результате пересечения рабочих зон двух шагающих экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Danilov A.S., Smirnov U.D., Pashkevich M.A.* The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV // Russian Journal of Ecology, 2015, 46 (1), pp. 14—19.

2. *Данилов А.С., Смирнов Ю.Д., Пашкевич М.А.* Система экологического мониторинга окружающей среды, основанная на использовании БПЛА // Международный журнал экологии и развитии. — 2015. — № 27. — С. 98—105.

3. *Pashkevich M., Petrova T.* Ecological and geochemical features of technogenic massif transformation at 'Severonickel' (Russia) // International Journal of Ecology and Development, 2014, 29 (3), pp. 110—114.

4. *Аргимбаев К.Р.* Промышленные отходы горного производства и их использование на примере Лебединского ГОКа // Молодой ученый. — 2011. — № 6. — Т.1. — С. 12—15.

5. *Arvas Ö., Keskin B., Yilmaz H.I.* Effect of sewage sludge on metal content of grassland soil and herbage in semiarid lands // Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2013, 2(37), pp. 179—187.

6. *Bozkurt M.A., Yarilgaç D.T., Yazici D.A.* The use of sewage sludge as an organic matter source in apple trees // Polish Journal of Environmental Studies, 2010, 19(2), pp. 267—274.

7. *Carabassa V.D., Nabais D.C., Roiloa S.R., Rodríguez-Echeverría D.S.* Revegetation of abandoned copper mines: The role of seed banks and soil amendments // Web Ecology, 2013, 28(4), pp 420—422.

8. *Idrissi S., Tissir E.H., Boumhidi I., Chaibi N.* Robust H+ control for uncertain T-S fuzzy systems via delay partitioning approach // International Journal of Ecology and Development, 2014, 28 (2), pp. 96—108.

9. *Холодняков Г.А., Аргимбаев К.Р.* Технология открытой разработки нетрадиционного месторождения полезных ископаемых // Записки Горного института. — 2016. — Т. 216. — С. 82—88.

10. *Аргимбаев К.Р., Миронова К.В., Бовдуй М.О.* Методы ликвидации потерь и оптимизация процессов открытых горных работ при отработке техногенного месторождения // Проблемы недропользования. — 2017. — 2 (12). — С. 145—145.

11. *Гавришев С.Е.*, *Бурмистров К.В.*, *Корнилов С.Н.*, *Томилина Н.Г.* Обоснование технологических схем транспортирования горной массы с применением карьерных подъемников при разработке месторождений открыто-подземным способом // Горный журнал. — 2016. — № 5 — С. 41—47.

12. *Arriagada C., Sampedro I., Garcia-Romera I., Ocampo J.* Improvement of growth of Eucalyptus globulus and soil biological parameters by amendment with sewage sludge and inoculation with arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi // Science of the Total Environment, 2012, 17(407), pp. 4799—4806. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Аргимбаев Каербек Рафкатович[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: diamond-arg@mail.ru,
Лигоцкий Дмитрий Николаевич[1] — кандидат технических наук, доцент, e-mail: ligozkij@rambler.ru,
Бовдуй Майя Олеговна[1] — студент, e-mail: m.bovduj@yandex.ru,
Миронова Кристина Владимировна[1] — студент, e-mail: mironova.k97@bk.ru,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 5, pp. 35–42.

K.R. Argimbaev, D.N. Ligotskiy, M.O. Bovduy, K.V. Mironova

TECHNOLOGY OF FORMATION MAN-MADE DEPOSITS AND DETERMINATION OF LOSS IN MINING OPERATIONS USING WALKING EXCAVATOR

Majority of mines operating for decades dump their waste without regard for the potential of the waste management. When starting development of accumulated waste as man-made mineral deposits, some mining companies are faced with numerous issues connected with mining safety, optimization of process-dependent parameters, stability of mining and transportation machinery, selection of mining and loading equipment, etc. These issues should be addressed at the early stage of generation of a man-made deposit of mine waste so that its further management requires minimum expenditure. The economic efficiency evaluation should take into account both the benefit from incremental products and the reduction in expenses connected with the creation and operation of tailings ponds, waste storage, prevention or mitigation of ecological impact by mineral processing plants. The reduced content of valued components in tailings, even by hundredths of a percent, can result in the considerable effect owing to the increased production output and money saving due to reduction in cost of crushing and grinding which take 40–50% of all expenses in the traditional mineral processing. The article presents the technology of generating a man-made deposit of mine waste and its further development using a walking excavator. An empirical formula describes the face area of the walking excavator, 3D model shows the walking excavator face areas in case of different digging depths. The mathematical formula defines the loss triangle as a result of intersection of operating zones of walking excavators. The proposed technology offers a mine a new outlook for the mine waste management philosophy and will enable efficient generation and development of tailings.

Key words: man-made deposit generation, walking excavator, loss, 3D model, face, operating zone, section.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-5-0-35-42

AUTHORS

Argimbaev K.R.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: diamond-arg@mail.ru,
Ligotsky D.N.[1], Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: ligozkij@rambler.ru,
Bovdyi M.O.[1], Student, e-mail: m.bovduj@yandex.ru,
Mironova K.V.[1], Student, e-mail: mironova.k97@bk.ru,
[1] Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Danilov A.S., Smirnov U.D., Pashkevich M.A. The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV. *Russian Journal of Ecology*, 2015, 46 (1), pp. 14—19.

2. Danilov A.S., Smirnov Yu.D., Pashkevich M.A. *Mezhdunarodnyy zhurnal ekologii i razvitii*. 2015, no 27, pp. 98—105.

3. Pashkevich M., Petrova T. Ecological and geochemical features of technogenic massif transformation at 'Severonickel' (Russia). *International Journal of Ecology and Development*, 2014, 29 (3), pp. 110—114.

4. Argimbaev K.R. *Molodoy uchenyy*. 2011, no 6, vol. 1, pp. 12—15.

5. Arvas Ö., Keskin B., Yilmaz H.I. Effect of sewage sludge on metal content of grassland soil and herbage in semiarid lands. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2013, 2(37), pp. 179—187.

6. Bozkurt M.A., Yarilgaç D.T., Yazici D.A. The use of sewage sludge as an organic matter source in apple trees. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, 19(2), pp. 267—274.

7. Carabassa V.D., Nabais D.C., Roiloa S.R., Rodríguez-Echeverría D.S. Revegetation of abandoned copper mines: The role of seed banks and soil amendments. *Web Ecology*, 2013, 28(4), pp 420—422.

8. Idrissi S., Tissir E.H., Boumhidi I., Chaibi N. Robust H+ control for uncertain T-S fuzzy systems via delay partitioning approach. *International Journal of Ecology and Development*, 2014, 28 (2), pp. 96—108.

9. Kholodnyakov G.A., Argimbaev K.R. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016, vol. 216, pp. 82—88.

10. Argimbaev K.R., Mironova K.V., Bovduy M.O. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2017. no 2 (12), pp. 145—145.

11. Gavrishev S.E., Burmistrov K.V., Kornilov S.N., Tomilina N.G. *Gornyy zhurnal*. 2016, no 5, pp. 41—47.

12. Arriagada C., Sampedro I., Garcia-Romera I., Ocampo J. Improvement of growth of Eucalyptus globulus and soil biological parameters by amendment with sewage sludge and inoculation with arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi. *Science of the Total Environment*, 2012, no 17(407), pp. 4799—4806.

«Неделя горняка-2018»