

УДК 622.271:622.261.34 © Ф.Я. Умаров, У.Ф. Насиров, Ш.Ш. Заиров,  
Ш.В. Каримов, 2024

Алмалыкский филиал НИТУ МИСИС,  
100100, г. Алмалык, Республика Узбекистан  
✉ e-mail:karimov20-13@mail.ru

UDC 622.271:622.261.34 © F.Ya. Umarov, U.F. Nasirov, Sh.Sh. Zairov,  
Sh.V. Karimov, 2024

Almalyk Branch of National Research University  
of Science and Technology (MISIS),  
Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan  
✉ e-mail:karimov20-13@mail.ru

# Экономико-математическое моделирование процесса транспортировки горной массы от забоя до пунктов разгрузки в глубоких карьерах

## Economic and mathematical modeling of the process of transporting rock mass from the face to the unloading points in deep quarries

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11-51-56>

В данной статье освещены вопросы транспортирования горной массы из глубоких горизонтов карьера с использованием автомобильной транспортной системы. В работе дано описание экономико-математической модели распределения горной массы от забоев до пунктов разгрузки и обоснование оптимального плана перевозки с использованием комбинации методов потенциала, северо-западного угла и наименьших стоимостей. Целью работы является оптимизация работы при транспортировании горной массы по карьере (нижние и верхние горизонты). Используя экономико-математический метод моделирования для транспортной задачи, можно достичь минимизации расходов перевозки горной массы до пунктов разгрузки. Исследования в области моделирования процесса транспортировки горной массы в глубоких карьерах различными методами показывают, что оптимизировать работу транспортной системы при сложных горнотехнических условиях возможно только при построении экономико-математических моделей и сравнительном анализе результатов этих транспортных задач.

**Ключевые слова:** глубокий карьер, транспортная система, автосамосвал, экономико-математическое моделирование, полезные ископаемые, горная масса, метод потенциалов, расстояние транспортирования.

**Для цитирования:** Экономико-математическое моделирование процесса транспортировки горной массы от забоя до пунктов разгрузки в глубоких карьерах / Ф.Я. Умаров, У.Ф. Насиров, Ш.Ш. Заиров и др. // Уголь. 2024;(11):51-56. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-51-56.

### УМАРОВ Ф.Я.

Доктор техн. наук., профессор, директор  
Алмалыкского филиала НИТУ МИСИС,  
100100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

### НАСИРОВ У.Ф.

Доктор техн. наук, профессор,  
заместитель директора по научной работе  
и инновациям Алмалыкского филиала НИТУ МИСИС,  
110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

### ЗАИРОВ Ш.Ш.

Доктор техн. наук., профессор, начальник  
сектора научных исследований, инноваций  
и подготовки научно-педагогических кадров  
Алмалыкского филиала НИТУ МИСИС,  
110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан

### КАРИМОВ Ш.В.

PhD по техническим наукам, и.о. доцента  
кафедры «Горное дело»  
Алмалыкского филиала НИТУ МИСИС,  
110100, г. Алмалык, Республика Узбекистан,  
e-mail:karimov20-13@mail.ru

**Abstract**

*This article highlights the issues of transporting rock mass from deep horizons of a quarry using an automobile transport system. The paper describes an economic and mathematical model of the distribution of rock mass from the faces to the unloading points and substantiates the optimal transportation plan using a combination of methods of potential, Northwest corner and lowest costs, the purpose of which is to optimize the work during transportation of rock mass, along the quarry (lower and upper horizons). Using the economic and mathematical modeling method for the transport task, it is possible to minimize the cost of transporting rock mass to unloading points. Research in the field of modeling the process of transporting rock mass in deep quarries using various methods shows that optimizing the operation of the transport system under difficult mining conditions is possible only by building economic and mathematical models and comparative analysis of the results of these transport tasks.*

**Keywords**

*Deep quarry, transport system, dump truck, economic and mathematical modeling, minerals, rock mass, potential method, transportation distance.*

**For citation**

Umarov F.Ya., Nasirov U.F., Zairov Sh.Sh., Karimov Sh.V. Economic and mathematical modeling of the process of transporting rock mass from the face to the unloading points in deep quarries. *Ugol'*. 2024;(11):51-56. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11-51-56.

**ВВЕДЕНИЕ**

Транспортная составляющая оказывает значительное влияние на решение основных научных и проектных задач, а процесс транспортирования горной массы – основа открытой геотехнологии [1]. В связи с этим одной из основных задач рационального природопользования и технологии экологически безопасной разработки месторождений являются развитие и совершенствование карьерного транспорта. Особое место в рамках решения задачи занимают вопросы выявления особенностей и обоснования стратегии формирования горнотранспортных систем глубоких карьеров. Обновление и модернизация оборудования, проводимые в последние три десятилетия на угольных разрезах [2, 3, 4, 5, 6], характеризуются увеличением его единичной производственной мощности и производительности.

В исследованиях [7] применение компьютерного моделирования позволяет существенно сократить время и трудоемкость расчета вариантов транспортной системы, а следовательно, увеличить количество рассматриваемых вариантов, что дает более точную оценку наиболее выгодной конфигурации транспортной системы для данных условий карьера.

Транспортировка горной массы при открытой разработке представляет собой один из ключевых технологических процессов. С развитием горных работ на определенном месторождении увеличиваются объем работы по транспортировке горной массы, а также расходы на поддержание этого процесса. В глубоких карьерах затраты на

транспортировку горной массы с нижних горизонтов до пунктов приема превышают 60% от общих расходов. Практика показывает, что на каждые 100 м понижения уровня горных работ себестоимость транспортировки самосвалами возрастает на 20-30%. При этом экологическая обстановка в карьере ухудшается [8, 9, 10].

В современных рыночных условиях деятельность любого предприятия направлена на прибыль, которая определяется соотношением доходов, получаемых при выполнении заданных объемов перевозок горной массы, и расходов на ее транспортирование. Поэтому одной из главных задач является задача повышения эффективности транспортного процесса, которая позволяет прежде всего сократить расходы предприятия и, как следствие, повысить его прибыль [11, 12, 13, 14]. При моделировании процесса транспортирования горной массы с использованием большегрузных карьерных автосамосвалов необходимо учитывать: наличие горной массы в забоях, число автосамосвалов, выделенных для перемещения горной массы, расстояние транспортирования и другие параметры. Основным показателем при оценке степени использования автосамосвалов является расстояние транспортирования, учитывающее горизонтальное перемещение и подъем горной массы из карьера. По результатам установленной зависимости эксплуатационной скорости, а также количества рейсов от приведенного расстояния получают эталонную производительность автосамосвалов, служащую для определения производительности автосамосвалов. Показатели развития технологического автомобильного транспорта включают среднесписочное число автомобилей, грузоподъемность парка автосамосвалов и среднюю грузоподъемность одного среднесписочного автосамосвала. Существующие исследования в области математического моделирования [15, 16, 17, 18, 19] перемещения горной массы показывают использование различных методов расчета и программных комплексов.

В работе [20] при исследовании эксплуатационных факторов на производительность парка автомобильного транспорта карьеров методом наименьших квадратов определен коэффициент уравнения регрессии и разработаны однофакторные зависимости производительности от расстояния транспортирования, скорости движения автосамосвала и времени, затрачиваемого на погрузочно-разгрузочные операции, а также двухфакторные зависимости, влияющие на производительность карьера.

В работе [21] при описании диспетчерской модели экскаваторно-автомобильного комплекса рассмотрена программно-целевая модель при планировании погрузки и перевозок, где транспортный поток карьерных самосвалов обоснован тремя основными свойствами: неопределенность, конечность, зависимость расстояния от времени. Применением имитационного моделирования доказано, что для описания вероятностно-распределенных временных параметров предпочтен метод гамма-распределения.

В работе [22] при выполнении исследований использовались как общенаучные, так и специальные методы, включая научное обобщение, методы комплексной оценки технического уровня, математическое моделирование и аппарат линейного программирования. Решение дан-

ной задачи базируется на составлении дифференциального уравнения движения, для чего были использованы уравнения Лагранжа второго рода, а также соответствующие выражения кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции.

Изменения только эксплуатационных показателей техники или параметров автодороги не помогут эффективно решить транспортную задачу. Необходимо составить оптимальный путь транспортирования, оптимальную схему передвижения карьерных автосамосвалов в глубоких горизонтах. В глубоких карьерах расстояние транспортирования для разных карьерных автомобильных дорог достигает разных длин – от 4 м до 6-8 км в одном направлении и более.

Исходя из выполненного анализа и исследований, было выбрано и применено создание комбинированного экономико-математического моделирования транспортной задачи.

**МЕТОДЫ**

Оптимизация транспортной системы в карьерах является одним из важных направлений эффективного использования транспортного средства в карьере. Существует несколько методов и способов организации процесса транспортировки в глубоких карьерах. Простым методом оптимизации работы транспортных средств является построение экономико-математической модели. При исследовании были рассмотрены следующие методы моделирования:

- двойственный симплекс-метод;
- методы линейного программирования транспортных задач;
- методы решения задач безусловной оптимизации;
- прямые методы решения задач условной оптимизации.

Проанализировав экономико-математические методы моделирования, нами был выбран метод линейного программирования транспортных задач. Это один из несложных методов моделирования, позволяющий выявить более эффективный план транспортирования горной массы по карьере и за его пределы (рис. 1). Решение транспортной задачи линейного программирования включает два основных этапа: построение опорного решения (начального плана перевозок) и построение оптимального решения.

Используемый математический метод расчета направлен на минимизацию выполняемой работы при транспортировании горной массы с помощью составления оптимального плана перевозки (табл. 1).

В табл. 1 даны значения запасов и приемной способности, которые означают, что на  $Z_{1-n}$  имеется определен-



Рис. 1. Схема расположений и варианты транспортировки горной массы от ( $Z_n$  – забоев) до ( $PR_n$  – пунктов разгрузки)  
 Fig. 1. A layout and options for transportation of rock mass from ( $Z_n$  – faces) to ( $PR_n$  – unloading stations)

Таблица 1

**Транспортная задача**  
 A transportation problem

Забой экскаватора	Пункты назначения					Запасы
	$PR_1$	$PR_2$	$PR_3$	$PR_4$	$PR_n$	
$Z_1$	$L_{1,1}$	$L_{1,2}$	$L_{1,3}$	$L_{1,4}$	...	300
$Z_2$	$L_{2,1}$	$L_{2,2}$	$L_{2,3}$	$L_{2,4}$	...	170
$Z_3$	$L_{3,1}$	$L_{3,2}$	$L_{3,3}$	$L_{3,4}$	...	220
$Z_4$	$L_{4,1}$	$L_{4,2}$	$L_{4,3}$	$L_{4,4}$	...	130
$Z_n$	$L_{n,1}$	$L_{n,2}$	$L_{n,3}$	$L_{n,4}$	...	$n$
Приемная способность	250	80	310	180	$n$	$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^n PPK$

Таблица 2

**Опорный план транспортировки горной массы от забоев до пунктов разгрузки**

A reference plan of rock mass transportation from faces to unloading stations

Забой экскаватора	Пункты назначения					Запасы
	$PR_1$	$PR_2$	$PR_3$	$PR_4$	$PR_n$	
$Z_1$	$L_{1,1}$	$L_{1,2}$	$L_{1,3}$	$L_{1,4}$	...	300
$Z_2$	$L_{2,1}$	$L_{2,2}$	$L_{2,3}$	$L_{2,4}$	...	170
$Z_3$	$L_{3,1}$	$L_{3,2}$	$L_{3,3}$	$L_{3,4}$	...	220
$Z_4$	$L_{4,1}$	$L_{4,2}$	$L_{4,3}$	$L_{4,4}$	...	130
$Z_n$	$L_{n,1}$	$L_{n,2}$	$L_{n,3}$	$L_{n,4}$	...	$n$
Приемная способность	250	80	310	180	$n$	$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^n PPK$

ный объем горной массы,  $m^3$  и  $PR_{1-n}$  имеет определенную приемную способность горной массы,  $m^3$ . Где  $L_{1,1} - L_{n,4}$  – это расстояние между разрабатываемыми забоями и пунктами назначения в км.

Для решения задачи и получения оптимального плана перевозки необходимо по первому предварительному этапу построить опорное (начальное) решение (табл. 2). Для этого с использованием метода северо-западного угла



**Применение метода северо-западного угла**  
Applications of the North-West Corner Method

Таблица 3

Забой экскаватора	Пункты назначения					Запасы
	PR <sub>1</sub>	PR <sub>2</sub>	PR <sub>3</sub>	PR <sub>4</sub>	PR <sub>n</sub>	
Z <sub>1</sub>	L <sub>1,1</sub>	L <sub>1,2</sub>	L <sub>1,3</sub>	L <sub>1,4</sub>	...	300
Z <sub>2</sub>	L <sub>2,1</sub>	L <sub>2,2</sub>	L <sub>2,3</sub>	L <sub>2,4</sub>	...	170
Z <sub>3</sub>	L <sub>3,1</sub>	L <sub>3,2</sub>	L <sub>3,3</sub>	L <sub>3,4</sub>	...	220
Z <sub>4</sub>	L <sub>4,1</sub>	L <sub>4,2</sub>	L <sub>4,3</sub>	L <sub>4,4</sub>	...	130
Z <sub>n</sub>	L <sub>n,1</sub>	L <sub>n,2</sub>	L <sub>n,3</sub>	L <sub>n,4</sub>	...	n
Приемная способность	250	80	310	180	n	$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^n PPK$

что целевая функция по формуле (2) направлена к минимуму, доказывая минимизацию расходов.

$$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^m PR_n \cdot R_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$R_1 = 250L_{1,1} + 50L_{1,2} + 30L_{2,2} + 140L_{2,3} + 170L_{3,3} + 50L_{3,4} + 130L_{4,4} = x_1 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Но для того чтобы план был наиболее оптимальным, применение комбинации методов моделирования даст более хороший результат, чем развитие одного метода. Один из наиболее подходящих методов для комбинации – это метод наименьших стоимостей, который также направлен на минимизацию расходов при выполнении транспортировки горной массы (табл. 4). Сущность метода в том, что выбираются наименьшие значения расстояния транспортирования  $L_{1,1} - L_n$  в строке ( $Z_1 - Z_n$ ). Например, если расстояние в значениях  $L_{1,1}, L_{1,4}, L_{2,2}, L_{2,3}, L_{3,3}, L_{4,4}$  являются самыми меньшими по отношению к другим клеткам  $L_{n,}$  то горная масса из забоев распределяется по этим расстояниям к пунктам разгрузки.

Таблица 4

**Опорный план транспортировки по методу наименьших стоимостей**  
Reference transportation plan using the Least Cost Method

Забой экскаватора	Пункты назначения					Запасы
	PR <sub>1</sub>	PR <sub>2</sub>	PR <sub>3</sub>	PR <sub>4</sub>	PR <sub>n</sub>	
Z <sub>1</sub>	L <sub>1,1</sub>	L <sub>1,2</sub>	L <sub>1,3</sub>	L <sub>1,4</sub>	...	300
Z <sub>2</sub>	L <sub>2,1</sub>	L <sub>2,2</sub>	L <sub>2,3</sub>	L <sub>2,4</sub>	...	170
Z <sub>3</sub>	L <sub>3,1</sub>	L <sub>3,2</sub>	L <sub>3,3</sub>	L <sub>3,4</sub>	...	220
Z <sub>4</sub>	L <sub>4,1</sub>	L <sub>4,2</sub>	L <sub>4,3</sub>	L <sub>4,4</sub>	...	130
Z <sub>n</sub>	L <sub>n,1</sub>	L <sub>n,2</sub>	L <sub>n,3</sub>	L <sub>n,4</sub>	...	n
Приемная способность	250	80	310	180	n	$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^n PPK$

строится начальный план перевозки, выполняющий распределение имеющейся горной массы в разрабатываемых забоях.

Линии в табл. 2 означают распределение горной массы с использованием метода северо-западного угла. Так как  $L_{1,1}$  является северо-западным углом таблицы, то распределение горной массы начинается с этого момента (табл. 3).

Распределение горной массы должно выполняться так, чтобы в пунктах назначения PR не было бы нехватки горной массы или же лишнего груза. То есть, если приемная способность пункта назначения PR равняется 170 м<sup>3</sup>, то отправляемая горная масса из разных забоев не должна превышать 170 м<sup>3</sup> груза.

Правило: Количество заполненных клеток (базисных клеток) в первоначальном плане должно быть равно  $m + n - 1$ , где  $m$  – количество строк;  $n$  – количество столбцов.

После распределения горной массы и проверки правильности заполнения опорной табл. 1 выполняем расчет математической функции по начальному плану.

Экономико-математическая модель по формуле (1) расчета показывает,

перевозки рассчитывается целевая функция математической модели:

$$R_2 = 250L_{1,1} + 50L_{1,4} + 80L_{2,2} + 90L_{2,3} + 220L_{3,3} + 130L_{4,4} = x_1 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Но для того, чтобы проверить, оптимален ли предлагаемый опорный план, выполняются следующие шаги. Первый (предварительный) этап включает:

- 1-1 — построение опорного решения;
- 1-2 — присвоение и расчет системы потенциалов;
- 1-3 — проверка первоначального плана на оптимальность (табл. 5).

Таблица 5

**Транспортная задача с учетом потенциалов**  
Transportation problem with consideration of the potentials

Пункты назначения (PR)						
PR <sub>1</sub>	PR <sub>2</sub>	PR <sub>3</sub>	PR <sub>4</sub>	PR <sub>n</sub>	Запасы	
250L <sub>1,1</sub>	50L <sub>1,2</sub>	0L <sub>1,3</sub>	0L <sub>1,4</sub>	–	300	U <sub>1</sub>
0L <sub>2,1</sub>	30L <sub>2,2</sub>	140L <sub>2,3</sub>	0L <sub>2,4</sub>	–	170	U <sub>2</sub>
0L <sub>3,1</sub>	0L <sub>3,2</sub>	170L <sub>3,3</sub>	50L <sub>3,4</sub>	–	220	U <sub>3</sub>
0L <sub>4,1</sub>	0L <sub>4,2</sub>	0L <sub>4,3</sub>	130L <sub>4,4</sub>	–	130	U <sub>4</sub>
L <sub>n,1</sub>	L <sub>n,2</sub>	L <sub>n,3</sub>	L <sub>n,4</sub>	–	n	U <sub>n</sub>
250	80	310	180	n		
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>n</sub>		
					$\sum_{i=1}^n Z = \sum_{j=1}^n PPK$	

$U_1, U_2, U_3, U_4, U_n$  – потенциалы строк,  $V_1, V_2, V_3, V_4, V_n$  – потенциалы столбцов.

Если опорное решение не является оптимальным, то переходят к второму (общему) этапу, который включает:

II-1 — улучшение плана перевозок;

II-2 — исправление системы потенциалов;

II-3 — проверка улучшенного плана на оптимальность.

Расчеты потенциалов ведутся по следующему порядку:

$$\begin{array}{lll} 1. V_1 - U_1 = L_{1,1} & 5. V_2 - U_1 = L_{1,2} & 9. V_3 - U_1 = L_{3,1} \\ 2. V_1 - U_2 = L_{2,1} & 6. V_2 - U_2 = L_{2,2} & 10. V_3 - U_2 = L_{3,2} \\ 3. V_1 - U_3 = L_{3,1} & 7. V_2 - U_3 = L_{3,2} & 11. V_3 - U_3 = L_{3,3} \\ 4. V_1 - U_4 = L_{4,1} & 8. V_2 - U_4 = L_{4,2} & 12. V_3 - U_4 = L_{4,3} \end{array}$$

После расчета и заполнения пустых клеток проверяется опорное решение на оптимальность. Для этого определяют, отрицательны ли нарушения именно в тех клетках, где вставлены значения ноль по следующей формуле:

$$l_{1,3} = V_3 - U_1 - L_{1,3} < 0 \quad (3)$$

$$l_{1,4} = V_4 - U_1 - L_{1,4} \leq 0 \quad (4)$$

$$l_{2,1} = V_1 - U_2 - L_{2,1} \leq 0 \quad (5)$$

$$l_{2,4} = V_4 - U_2 - L_{2,4} \leq 0 \quad (6)$$

$$l_{3,1} = V_1 - U_3 - L_{3,1} \leq 0 \quad (7)$$

$$\ln = V_{1+n} - U_{1+n} - L_{1+n} \leq 0 \quad (8)$$

Если в неравенстве имеется нарушение, то план перевозки является неоптимальным. Оптимизация плана перевозки по данной методике возможна при его повторном шаговом расчете потенциалов и неравенстве, которые выполнены в исследованиях [23, 24].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Если неравенство удовлетворяет требованиям при ведении расчета, то полученный новый план является оптимальным. Для второго полученного плана рассчитывается целевая математическая функция (формула 10), и выполняется сравнительный анализ, который показывает оптимальность плана:

$$R_1 = 250L_{1,1} + 50L_{1,2} + 30L_{2,2} + 140L_{2,3} + 170L_{3,3} + 50L_{3,4} + 130L_{4,4} = x_1 \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$R_2 = 250L_{1,1} + 50L_{1,4} + 80L_{2,2} + 90L_{2,3} + 220L_{3,3} + 130L_{4,4} = x_2 \rightarrow \min. \quad (10)$$

Если второй план оптимален при значениях  $x_1 > x_2$ , то это позволяет сделать вывод об отправке горной массы

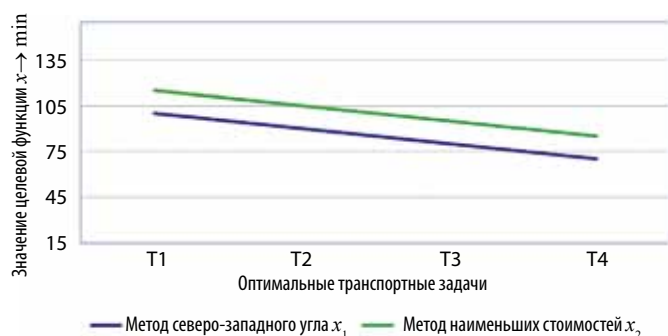


Рис. 2. Показатели целевых функций математической модели по отношению к нескольким вариантам транспортных задач

Fig. 2. Indicators of target functions of the mathematical model in relation to several variants of the transportation problems

по второму плану, где по применяемой методике наименьших стоимостей оптимизируется выполняемая транспортная задача, являющаяся экономически выгодной.

Из определения опорного плана вытекает, что существует оптимальный план, содержащий не более, чем  $m + n - 1$  положительных значений. Сущность этих методов состоит в том, что опорный план находят последовательно за  $m + n - 1$  шагов, на каждом из которых в транспортной таблице заполняют одну клетку [25].

Примечание: При построении опорного решения или при его улучшении количество клеток, занятых перевозками, может оказаться меньше, чем  $(m + n - 1)$ . В этом случае нельзя построить систему потенциалов, и такой план называется вырожденным. Для решения этой задачи в клетку (или клетки) без перевозок проставляют фиктивную перевозку малого объема. При этом объемы перевозок добавляют в клетки, чтобы план стал невырожденным, то есть количество заполненных клеток равнялось бы  $(m + n - 1)$  [26].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ эксплуатационных показателей карьерных транспортных систем позволяет установить взаимосвязь с горнотехническими условиями глубокого карьера, являющегося основным при планировании работы карьерного транспорта комплекса.

При использовании различных методов моделирования транспортных задач исследованиями определено увеличение производительности и коэффициента использования горнотранспортного оборудования при эксплуатации его в нижних и верхних горизонтах глубоких карьеров.

Установлено повышение эффективности процесса транспортировки горной массы при разработке экономико-математической модели распределения горной массы от забоя до пунктов разгрузки в глубоких карьерах с условием оптимальности плана перевозки.

## Список литературы • References

1. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Engineering & Mining Journal*. 2012;213(1):30-32.
2. Gruenhagen J.H., Parker R. Factors driving or impeding the diffusion and adoption of innovation in mining: A systematic review of the literature. *Resources policy*. 2020;(65):101540.
3. Humphreys D. Mining productivity and the fourth industrial revolution. *Mineral Economics*. 2020;33(1):115-125.
4. Lama O., Alayo J., Aparicio E. et al. Improvement of the Global Efficiency of Mining Equipment Through Total Productive Maintenance – TPM. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, 2021, pp. 336-344.
5. Löow J., Abrahamsson L., Johansson J. Mining 4.0 – The impact of new technology from a work place perspective. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019;36(4):701-707.
6. Mohammadi M., Rai P., Gupta S. Performance measurement of mining equipment. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2015;5(7):240-248.
7. Яковлев В.Л., Бахтурин Ю.А., Журавлев А.Г. Основные аспекты формирования и новые научные направления исследований транспортных систем карьеров // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2015. № 4. С. 67-72.

- Yakovlev V.L., Bahturin Yu.A., Zhuravlev A.G. Main aspects of forming and new scientific directions of research of open pit mining transport systems. *Prirodnye resursy Arktiki Subarktika*. 2015;(4):67-72. (In Russ.).
8. Насиров У.Ф., Заиров Ш.Ш., Каримов Ш.В. Исследование и оценка технологического автотранспорта для эффективной транспортировки горной массы в глубоких карьерах // Уголь. 2023. № 12. С. 67-72. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-67-72. Nasirov U.F., Zairov Sh.Sh., Karimov Sh.V. Research and evaluation of process fleet for effective haulage of rock mass in deep open pits. *Ugol'*. 2023;(12):67-72. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-67-72.
  9. Zairov S., Ravshanova M., Karimov S. Intensification of technological processes in drilling and blasting operations during open-cut mining in Kyzylkum region. *Mining of Mineral Deposits*. 2018;12(1):54-60.
  10. Zairov S., Ravshanova M., Karimov S. Scientific and technical fundamentals for explosive destruction of the mass composed of rocks with different hardness. *Mining of Mineral Deposits*. 2017;(11):54-60.
  11. Вуейкова О.Н., Ларин О.Н. Вопросы повышения эффективности работы карьерного автотранспорта // Вестник ОГУ. 2011. № 10 (129). С. 26-33. Vuyeykova O.N., Larin O.N. The problem of enhancing the effectiveness of the career of motor transport. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011;(10):26-33. (In Russ.).
  12. Krause A. Modelling open pit shovel-truck systems using the machine repair model. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2007;(107):469-476.
  13. Журба А.В. Моделирование транспортного процесса на участке угольного разреза // Труды КГТУ. 2006. № 4. С. 126-132. Zhurba A.V. Modeling of the transport process on a coal mine site. *Trudy KGTU*. 2006;(4):126-132. (In Russ.).
  14. Салахийев Р.Г. Имитационное моделирование и автоматизированное управление горнотранспортными работами в карьерах // Горный журнал. 2012. № 1. С. 82-85. Salakhiev R.G. Simulation modeling and automated control of mining transportation works in open pits. *Gornyy zhurnal*. 2012;(1):82-85. (In Russ.).
  15. Бахтурин Ю.А. Моделирование работы сложных транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 1. С. 82-90. Bakhturin Yu.A. Modeling of operation of complex open-pit transportation systems. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2011;(1):82-90. (In Russ.).
  16. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. С. 113-120.
  17. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. Моделирование параметров транспортных систем глубоких карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № S56. С. 336-349. Zhuravlev A.G., Skorokhodov A.V. Modeling of parameters for deep open pits transportation systems. *Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten'*. 2015;(S56):336-349. (In Russ.).
  18. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирование // Проблемы недропользования. 2015. № 2. С. 53-60. Zhuravlev A.G., Skorokhodov A.V. To the question of grounding excavator-truck sets capacity by computer simulation. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2015;(2):53-60. (In Russ.).
  19. Ларин О.Н., Вуейкова О.Н. Факторный анализ производительности карьерного автотранспорта Сарбайского карьера // Транспорт: наука, техника, управление. 2011. № 1. С. 29-32. Larin O.N., Vuyeykova O.N. Factor analysis of mining motor transport productivity at the Sarbaisky open-pit mine. *Transport. Nauka, tekhnika, upravlenie*. 2011;(1):29-32. (In Russ.).
  20. Ахметова М.И. Комплексная оценка и способы повышения показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. техн. наук / КазНИТУ. Алматы, 2019. С. 132.
  21. Воронова А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезом: дис. ... канд. техн. наук / КузГТУ. Кемерово, 2015. С. 185.
  22. Плоскостное и пространственное математическое моделирование движения карьерного автотранспорта / К.М. Басс, С.Н. Куваев, В.В. Плахотник и др. // Научный вестник НГУ. 2013. № 1 (30). С. 10-15. Bass K.M., Kuvaev S.N., Plakhotnik V.V., Krivda V.V. Planar and spatial mathematical modeling of quarry vehicle movement. *Nauchnyy vestnik NGU*. 2013;(1):10-15. (In Russ.).
  23. Naimova R., Karimov S., Qushshayev U., O'Lmasova M. Applications of Economic and Mathematical Modeling in the Organization of Transportation of Rock Mass in Deep Quarries. AIP Publishing ICPPMS – 2022. "Scopus and Web of science indexed", pp. 18-28.
  24. Описание математической модели распределения горной массы от забоя до пункта приема на глубоких горизонтах карьера / Р.Ш. Наимова, Ш.М. Мавлонов, Н.Б. Юсупов и др. // Горный журнал Казахстана. 2021. № 5. С. 30-36. Naimova R.Sh., Mavlonov Sh.M., Yusupov N.B. Karimov Sh.V. Description of a mathematical model of rock mass distribution from the mine face to the receiving point at deep levels of an open-pit mine. *Gornyy zhurnal Kazahstana*. 2021;(5):30-36. (In Russ.).
  25. Тюхтина А.А. Математические модели логистики. Учебно-методическое пособие. Нижний Новгород, 2016. С. 65.
  26. Резниченко С.С., Подольский М.П., Ашихмин А.А. Экономическо-математические методы и моделирование в планировании и управлении горным производством. М.: Недра, 1991. С. 429.

#### Authors Information

**Umarov F.Ya.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

**Nasirov U.F.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy Director on Research and Innovations, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

**Zairov Sh.Sh.** – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Sector of Scientific Research, Innovations and Training of Scientific and Pedagogical Staff, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan

**Karimov Sh.V.** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Almalyk Branch of National Research University of Science and Technology (MISIS), Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan, e-mail: karimov20-13@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.08.2024

Поступила после рецензирования: 17.10.2024

Принята к публикации: 28.10.2024

#### Paper info

Received August 15, 2024

Reviewed October 17, 2024

Accepted October 28, 2024