

## ПРОФИЛАКТИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ОТКРЫТОЙ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

И.А. Панфилов<sup>1,2,3</sup>, О.А. Антамошкин<sup>1,2</sup>, Н.В. Федорова<sup>1,2</sup>, Ф.Ф. Дерюгин<sup>4</sup>, В.Е. Бянкин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,  
e-mail: oleslav24@gmail.com

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>4</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

**Аннотация:** Приведены сведения о профилактике загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений. Дана оценка актуальности проблемы загрязнения атмосферы. Предложена система минимизации загрязнения атмосферы за счет соблюдения ограничивающих критериев. Предложена математическая модель, целевой функцией которой является минимум пылевыведения, а ограничивающими условиями – переменные факторы. Дана справка о разработке основ экологии горнопромышленных регионов. Сформулированы подходы к постановке исследований технологий минимизации объема пыли и установления системных связей и закономерностей в процессе управления состоянием атмосферы. Предложена типизация пыли и источников пылеобразования. Произведено ранжирование окрестностей карьера на зоны по опасности загрязнения пылью. Исследована интенсивность пылевыведения при осуществлении технологических процессов. Приведены результаты исследования источников образования и концентрации пыли в карьерной атмосфере в сравнении с аналогами. Дана оценка технологий связывания пыли. Предложен интегральный показатель состояния атмосферы карьера. Разработан алгоритм управления состоянием атмосферы, включающий этапы управления риском загрязнения. Приведены результаты моделирования путей решения проблемы методом полного перебора. Установлено, что эффективность мероприятий по минимизации загрязнения пылью описывается функцией. Каждый из объектов пыления имеет индивидуальную характеристику, которая может оперативно пополняться. Система прогнозирования величины выбросов пыли включает в себя разработку выходной функции, модели технологических процессов и переходной функции. Предлагаемая система контроля состояния атмосферы обеспечивает увеличение эффективности атмосферно-охранной стратегии.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, загрязнение атмосферы, математическая модель, экология, отходы, снижение отходов, пыль, устойчивая добыча ресурсов.

**Для цитирования:** Панфилов И. А., Антамошкин О. А., Федорова Н. В., Дерюгин Ф. Ф., Бянкин В. Е. Профилактика загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11-1. – С. 252–264. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_252.

---

## Prevention of air pollution during openpit mining of ore deposits

I.A. Panfilov<sup>1,2,3</sup>, O.A. Antamoshkin<sup>1,2</sup>, N.V. Fedorova<sup>1,2</sup>, F.F. Deryugin<sup>4</sup>, V.E. Byankin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: oleslav24@gmail.com

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

---

**Abstract:** The article contains information about the prevention of air pollution during open-pit mining of ore deposits. The assessment of the relevance of the problem of atmospheric pollution is given. A system of minimizing atmospheric pollution by complying with the restriction criteria is proposed. A mathematical model is proposed, the objective function of which is the minimum of dust emission, and the limiting conditions are variable factors. A reference is given on the development of the fundamentals of ecology of mining regions. Approaches to the formulation of research technologies for minimizing the volume of dust and establishing system connections and patterns in the process of controlling the state of the atmosphere are formulated. The typification of dust and sources of dust formation is proposed. The surroundings of the quarry were ranked into zones according to the danger of dust pollution. The intensity of dust emission during the implementation of technological processes is investigated. The results of the study of the sources of dust formation and concentration in the quarry atmosphere in comparison with the analogs are presented. The assessment of dust binding technologies is given. An integral indicator of the state of the atmosphere of the quarry is proposed. An algorithm for controlling the state of the atmosphere, including the stages of pollution risk management, has been developed. The results of modeling the ways of solving the problem by the method of full search are presented. It is established that the effectiveness of measures to minimize dust pollution is described by the function. Each of the dusting objects has an individual characteristic, which can be quickly replenished. The system for predicting the magnitude of dust emissions includes the development of an output function, a model of technological processes and a transition function. The proposed system for monitoring the state of the atmosphere provides an increase in the effectiveness of the atmospheric protection strategy.

**Key words:** ore deposits, air pollution, mathematical model, ecological, waste, zero waste, dust, sustainable resource use.

**For citation:** Panfilov I. A., Antamoshkin O. A., Fedorova N. V., Deryugin F. F., Byankin V. E. Prevention of air pollution during openpit mining of ore deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11-1):252-264. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_111\_0\_252.

---

### Введение

Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом обеспечивает 2/3 мирового потребления рудного и нерудного сырья и 1/3 твердого топлива и является источником загрязнения экосферы, деградации животного и растительного мира, опустынивания и

потери биологического и ландшафтного разнообразия. Специфика добычи минерального сырья характеризуется тем, что в атмосферу прилегающих территорий выделяется пыль, включающая в себя активные фракции [1 – 4].

Технологическая цепь карьера оснащена высокопроизводительным, неред-

ко уникальным оборудованием, и в ходе эксплуатации оптимизируется по критериям эффективного использования [5–7]. Поэтому система мониторинга состояния окружающей среды должна исходить из условий непрерывности добычного процесса и поузловой оценки эффективности пылеподавления на этапах технологической цепи [8, 9].

Вопросы экологии горнопромышленных районов исследованы в трудах Д.М. Бронникова, Е.И. Шемякина, Г.М. Малахова и др. Вопросы образования пыли при дроблении горных пород взрывом изучали Н.В. Мельников, В.В. Ржевский, В.В. Адушкин, С.Д. Викторов, Н.Н. Казаков, и др. [10–12].

Управление качеством атмосферы на уровне отдельных предприятий характеризуется недостаточно полным учетом влияния источников загрязнения на качество воздуха [13–15].

Одним из направлений снижения опасности пылевого загрязнения является разработка природоохранных технологий добычи минерального сырья [16–18].

Увеличивается роль технологий утилизации мобильных и токсичных компонентов, хранящихся отходов добычи и переработки минерального сырья [19–21]. Это направление реализуется путем создания нетрадиционных технологий, приходящих на смену традиционным способам добычи минерального сырья [22, 23].

Цель работы — минимизация опасно-го загрязнения атмосферы при использовании технологических процессов за счет внедрения критериев ограничения. Данная цель в работе достигается решением следующего ряда задач:

- анализ теории и практики управления качеством воздуха;
- исследование системных связей и закономерностей процесса загрязнения воздушной среды;

- разработка алгоритма реализации атмосферно-охранной стратегии;
- разработка программного обеспечения системы минимизации загрязнения.

### **Методы**

Банк данных о состоянии атмосферы региона комплектуется в ходе исследований механизма образования и процесса миграции пыли, в том числе моделированием процессов пыления и исследованием возможностей технологий корректировки количества и качества техногенной пыли.

Натурными исследованиями устанавливаются, а аналитическими методами описываются закономерности миграции пылевых выбросов карьера в экосистемы окружающей среды [24].

Принципы взаимодействия природоохранного органа, природопользователей и воздушной среды детализируются путем исследования системных связей и закономерностей в процессе управления [25].

На основе созданной модели разрабатывается методика оптимального управления. С использованием полученных данных разрабатывается алгоритм минимизации загрязнения атмосферы и программное обеспечение снижения риска загрязнения воздушной среды.

### **Результаты**

Карьерная пыль представляет собой измельченные в ходе технологических процессов частицы пород и полезного ископаемого, в том числе мельчайшие, размерами до 0,05 мм [2]. По крупности и опасности для окружающей среды пыль, начиная с крупности 0,05 мм, ранжирована нами в табл. 1.

Источники пылеобразования характеризуются табл. 2.

Из данных табл. 2 следует, что главную роль в запылении атмосферы игра-

Таблица 1

**Типизация пыли**  
**Dust typing**

Крупность, мм	Уровень опасности	Свойства
0,05 – 0,025	минимальная	загрязняет поверхность растений и покров животных, снижает качество растительных ресурсов
0,025 – 0,005	средняя	покрывает поверхность живого вещества и затрудняет дыхательные функции
<0,005	максимальная	проникает в организм человека и животных и ослабляет жизненные процессы

ют процесс взрывного отделения минерального сырья от массива, а также его перемещение и погрузка.

В процессах отбойки и транспортировки 1 м<sup>3</sup> угля или породы образуется 153 г пыли размерами менее 0,05 мм. Больше всего пыли образуется при взрывном отделении угля от массива – 42%, что дает основание считать приоритетным направлением исследований модернизацию технологии отбойки.

Увеличение запыленности в интервале 500 – 1000 м от источника пыления объясняется отклонением пылевидных частиц от центра факела за счет диффузных процессов.

Карьер и его окрестности ранжированы на зоны влияния на состояние атмосферы (рис. 1):

- весьма опасного загрязнения (радиус 2000 м);
- опасного загрязнения (2000 – 4000 м);

Таблица 2

**Выход пыли по источникам ее образования**  
**Dust output by sources of its formation**

Процесс	Операции пылеобразования	Доля, %	Выход, г/м <sup>3</sup>	Кол-во, кг
Взрывное отделение от массива	раскрытие трещин	10	23	2500
	соударение при взлете	5	6	700
	соударение при падении	4	4	730
	удар падающих кусков по лежащим	23	27	4195
	Итого	43	60	8120
Перемещение и погрузка горной массы	удар ковшом	8	13	1467
	раздавливание ковшом	5	17	1491
	скатывание при наборе в ковш	3	3	465
	соударение при разгрузке в кузов	11	20	2179
	Итого	27	53	5590
Транспорт и разгрузка	истирание и раздавливание шинами	15	26	2856
	разгрузка из самосвалов	14	11	2107
	Итого	29	37	4963
Обрушение	вывалы и гравитационное дробление	1	4	152
	Всего	100	154	18 825

Примечание: объемы пыли измерены пооперационно по традиционной методике.

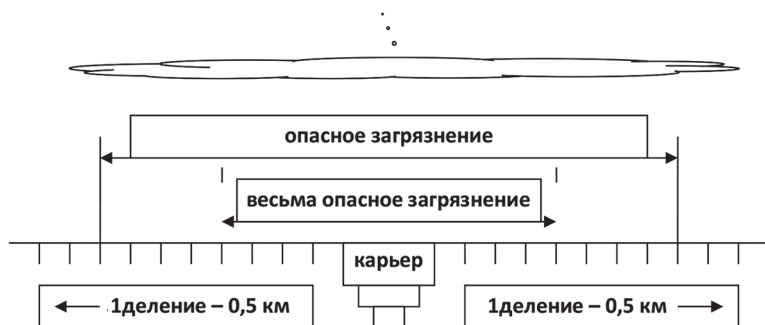


Рис. 1. Ранжирование окрестностей карьера на зоны  
 Fig. 1. Ranking of quarry neighborhoods into zones

• загрязнения в пределах ПДК (более 4000 м).

В табл. 3 приводятся результаты исследования источников образования пыли при работе горного оборудования в карьере.

Даже при использовании защитных мероприятий запыленность карьерных дорог превышает санитарные нормы на порядок, а при отсутствии средств пылеподавления — на 2 порядка (табл. 4).

В рамках рекультивации нарушенных горными работами земель выращивают травы и кустарники с использованием плодородного слоя толщиной до 8 см. Разравнивание отвалов пород с образованием слоя почвы и внесением удобрений улучшает приживаемость и рост растений, однако полного восстановления качества почв не происходит, а опас-

ные процессы в захороненных отходах усиливаются.

Наиболее доступным способом кратковременного уменьшения уровня пыли является орошение дорог. Обработка верхнего слоя дорожного полотна вяжущими материалами снижает стоимость содержания карьерных автодорог.

Положительные результаты приносит обработка дорог раствором сульфитно-спиртовой барды. Нами применено пылесвязывающее вещество — универсин, применение которого снижает запыленность до санитарных норм на срок 10... 30 сут.

Перспективно использование нефтяных, битумных и других эмульсий, особенно их водных растворов.

Анализ литературных публикаций и данных практики дает основание ут-

Таблица 3

**Результаты исследования источников образования пыли**  
**Results of the study of dust sources**

Источник пыления	Высота выброса, м	Пылеобразующая способность, г/м <sup>3</sup>	Интенсивность пыления, г/с
Погрузка	25	30,4	4,3
Бурение	67	21,2	1,5
Транспортирование	14	14,1	8,4
Бульдозерные работы	7	7,5	0,4

Примечание: объемы пыли измерены пооперационно по стандартной методике. Высота выброса определена по данным зондирования. Интенсивность пыления зависит от свойств минералов и применяемой техники и определяется прямыми измерениями по стандартным методикам.

Таблица 4

**Концентрация пыли в карьерной атмосфере**  
**Dust concentration in a quarry atmosphere**

Карьер	Объект	Меры защиты	Запыленность, мг/м <sup>3</sup>
<b>Автомобильная дорога</b>			
Зырянковский	грунтовые на скальных породах	без защиты	1 – 100
Сибайский	щебеночные на скальных породах	без защиты	40
Сорский	щебеночные на скальных породах	без защиты	36
Лебединский	с железобетонным покрытием	без защиты	1 – 180
<b>Кабина автосамосвала</b>			
Коунарский	без покрытия	без защиты	147
Златоустовский	грунтовые на глине	орошаемые	12
Блявинский	грунтовые на щебне	без защиты	20 – 120
Соколовский	с бетонным покрытием	орошаемые	4
Боснийский	без покрытия	без защиты	10

верждать, что применяемые технологии связывания тонких фракций пыли на поверхности отвалов малоэффективны. Более эффективные технологии связывания пыли при погрузочных, транспортных и разгрузочных работах пеной влияют на распределение пыли только в пределах карьера.

Интегральный показатель состояния атмосферы карьера определяется суммированием пылевого загрязнения от работы технологического оборудования (табл. 5).

Связь управляющих воздействий с параметрами выбросов пыли устанавливается с помощью математического моделирования (см. рис. 2).

В области влияния карьера выделяются участки, для которых дифференцировано осуществляется экспертная оценка экологической значимости территории и концентрации пыли.

Нами использован известный метод вычисления усредненного показателя пылевого загрязнения  $Z_{cp}$  (24):

$$Z_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n \frac{Э_n}{Э_{cp}}}{N}, \quad (1)$$

где  $Э_n$  – экологическая значимость;  $Э_{cp}$  – среднее значение экологической значимости;  $Q_n$  – комплексный показатель загрязнения;  $N$  – количество экологи-

Таблица 5

**Запыленность воздуха на рабочих местах**  
**Dust content in the workplace**

Источник	Запыленность, мг/м <sup>3</sup>		Зона влияния, м
	минимум	максимум	
Экскаваторы	45	860	25
	59	930	20
	78	970	15
Автосамосвалы	12	540	55
Буровые станки	13	90	10
Бульдозеры	22	130	8

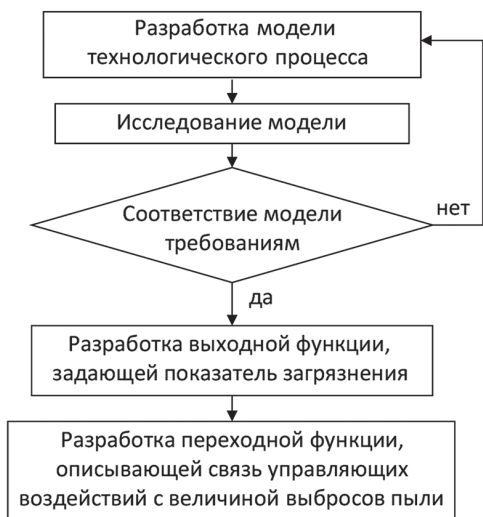


Рис. 2. Схема управления риском загрязнения атмосферы

Fig. 2. Atmospheric pollution risk management scheme

чески значимых участков зоны влияния карьера.

Количественное значение нагрузки на атмосферу ( $\text{мг/м}^3$ ) находится путем суммирования фонового и технологического загрязнений.

Количественные значения пылевых загрязнений определяются с помощью объединяющего множества оператора :

$$\Omega(n, m, a, b, c), \quad (2)$$

где  $\Omega$  – оператор;  $n$  – количество оцениваемых участков зоны влияния объекта;  $m$  – объем пыли,  $\text{м}^3$ ;  $a$  – величины выброса пыли;  $b$  – параметры выброса пыли;  $c$  – природные условия миграции пыли.

Алгоритм управления состоянием карьерной атмосферы:



Рис. 3. Схема управления риском загрязнения атмосферы

Fig. 3. Atmospheric pollution risk management scheme

Таблица 6

**Результаты моделирования времени**  
**Time simulation results**

Аналитически полученная величина			Номер эксперимента					Средняя
			1	2	3	4	5	
Количество мер по модернизации технологий	4	80	75	72	64	74	69	71
	5	160	119	133	142	148	127	134
	6	320	276	225	254	298	300	271
	7	640	597	574	353	405	506	487
	8	1280	835	1100	942	1029	740	929
	9	2560	2030	1589	1796	1604	1920	1788
	10	5120	2980	3217	4706	4210	3643	3751

$$\bar{X} = \Omega(Y, Z), \quad (3)$$

где  $\bar{X}$  – совокупность координат участка запыления атмосферы;  $Y$  – совокупность управляющих воздействий по охране атмосферы;  $Z$  – множество возмущающих воздействий.

Оператор представляет собой среднюю скорость выхода газозадушной смеси в атмосферу (м/с) и конструируется путем суммирования участвующих в процессе переменных факторов.

Алгоритм управления атмосферой карьера представлен на рис. 3.

Нами проведены машинные эксперименты с моделированием путей поиска

оптимального решения методом полного перебора количественных показателей запыления при одном источнике пыли (табл. 6).

Скорость возрастания эффективности мероприятий по минимизации загрязнения пылью от количества этапов улучшения технологии носит убывающий характер, близкий к функции вида  $f(x) = 0,0428x^{-0,8559}$  с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,84$ .

Комплекс осуществляет управление процессом, оперируя числовыми двумерными матрицами фаз процесса (рис. 4).

Взаимодействие карьера с окружающей средой поясняется на рис. 5.

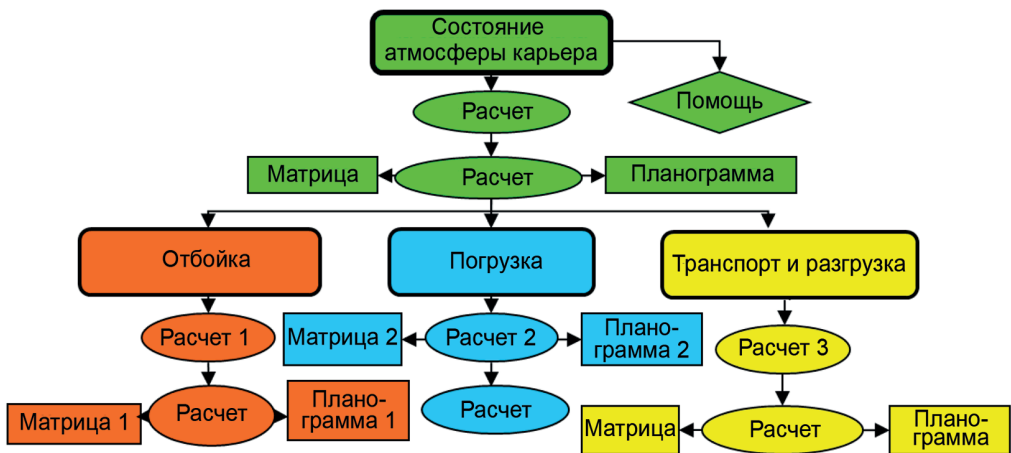


Рис. 4. Схема комплекса компьютерных программ

Fig. 4. The scheme of the complex of computer programs



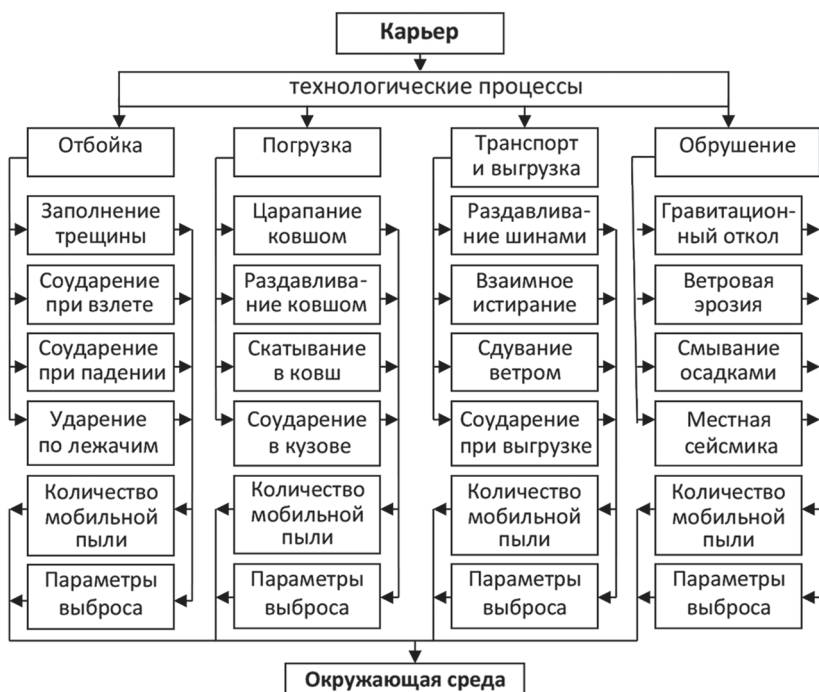


Рис. 5. Взаимодействие карьера с окружающей средой

Fig. 5. Interaction of the quarry with the environment

Объем технологической пыли может быть уменьшен применением, кроме буровзрывной отбойки, альтернативных технологий, в том числе:

- выемка экскаваторами с ковшом активного действия, оснащенным пневмомолотами и разрушающим породу в процессе черпания;
- отбойка гидромониторами;
- отбойка взрыванием химических взрывчатых веществ типа эрдокс, кардокс или гидрокс;
- отбойка фрезой с погрузкой сырья загребующими лапами на перегружатель.

Результаты настоящего исследования перекликаются с данными исследований специалистов затронутого направления горного дела и могут быть востребованы при проектировании новых предприятий [27 – 30] и модернизации действующих, а так же как методическое пособие при подготовке горных инженеров [31 – 32].

## Выводы

1. В процессах отбойки и транспортировки  $1 \text{ м}^3$  твердого минерального сырья образуется около  $150 \text{ г}$  пыли размерами менее  $0,05 \text{ мм}$ , больше всего при взрывном отделении сырья от массива (42%).

2. Наибольшей пылеобразующей способностью и интенсивностью пыления характеризуется погрузка сырья.

3. Каждый из объектов пыления имеет индивидуальную характеристику, которая может оперативно пополняться.

4. Профилактика загрязнения воздушной среды при открытой разработке рудных месторождений осуществляется путем использования модели технологических процессов.

5. Предлагаемая система контроля состояния атмосферы способствует увеличению эффективности атмосферно-охранный стратегии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З., Кожиев Х. Х. Минимизация влияния горного производства на окружающую среду // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 6. — С. 26–29. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.
2. Валиев Н. Г., Пропп В. Д., Вандышев А. М. Кафедре горного дела УГГУ — 100 лет // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 130–143.
3. Лискова М. Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2017. — Т. 16. — № 1. — С. 82–88.
4. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. 2017, vol. 61, pp. 40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.
5. Босиков И. И., Ключев Р. В. Методы системного анализа природно-промышленной системы горно-металлургического комплекса. — Владикавказ: СКГМИ, 2015. — 124 с.
6. Hebblewhite B. K. Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management / Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019, pp. 99–308.
7. Качурин Н. М., Стась Г. В., Корчагина Т. В., Змеев М. В. Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отвалов шахт Восточного Донбасса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2017. — № 1. — С. 170–182.
8. Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Комащенко В. И., Разоренов Ю. И. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22. — № 6. — С. 35–39. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39.
9. Diego I., Torno S., Torano J., Menendez M, Malcolm G. A practical use of CFD for ventilation of underground works // Tunnelling and Underground Space Technology. 2011, vol. 26, pp. 189–200.
10. Shutaleva A., Martyushev N., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental behavior of youth and sustainable development // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 1, article 250. DOI: 10.3390/su14010250.
11. Крупская Л. Т., Орлов А. М., Голубев Д. А., Колобанов К. А., Филатова М. А. Оценка экологической опасности накопленных отходов переработки минерального сырья закрытых горных предприятий в Приамурье и Приморье // Горные науки и технологии. — 2020. — № 5(3). — С. 208–223. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223.
12. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremenkov E. A., Sorokova S. N., Mengxu Q. Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation // Materials. 2023, vol. 16, no. 2, article 726. DOI: 10.3390/ma16020726.
13. Уфимцев В. И., Андроханов В. А., Куприянов О. А., Уфимцев Ф. Г. Плодородный слой почвы как фактор восстановления зональных фитоценозов на отвалах угольной промышленности // Вестник КузГТУ. — 2019. — № 6(136). — С. 64–71. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-64-71.
14. Бригида В. С., Кожиев Х. Х., Сарян А. А., Джигоева А. К. Пространственно-временные задачи геоэкологии — междисциплинарный подход // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 4. — С. 20–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.
15. Игнатьева М. Н., Юрак В. В., Душин А. В., Стровский В. Е. Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к экономике замкнутого цикла // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 2. — С. 73–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.
16. Марков С. О., Мурко Е. В., Непша Ф. С. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса // Горные науки и технологии. — 2021. — № 6(4). — С. 259–266. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266.

17. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.
18. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite // *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620–626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.
19. Корчагина Т. В., Степанов Ю. А., Бурмин Л. Н. Метод оценки экологических показателей воздействия на окружающую среду в районах размещения угольных предприятий // *Уголь*. – 2018. – № 8. – С. 119–123. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.
20. Чотчаев Х. О., Бурдзиева О. Г., Заалишвили В. Б. Зонирование высокогорных территорий по геоэкологическим нагрузкам, обусловленным геодинамическими и климатическими воздействиями // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – № 11(1). – С. 81–94.
21. Rezanov V. A., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Grinek A. V., Skeebe V. Y., Lyosin A. V., Karlina A. I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails // *Metals*. 2022, vol. 12, no. 12, article 2135. DOI: 10.3390/met1212135.
22. Сафронова О. С., Ламанова Т. Г., Шеремет Н. В. Результаты исследования естественного восстановления растительного покрова на вскрышных отвалах, возникших в 1990-е годы в Республике Хакасия // *Уголь*. – 2018. – № 7. – С. 68–77. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-68-71.
23. Филимонов В. А., Горина Л. Н. Особенности разработки системы управления охраной труда на основе процессного подхода // *Записки Горного института*. – 2019. – Т. 235. – С. 113. DOI: 10.31897/gpi.2019.1.113.
24. Torno S., Torano J., Ulecia M., Allende C. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 34, pp. 73–81.
25. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control / *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. 2017, pp. 7–16. **PMSE**

## REFERENCES

1. Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Gabaraev O. Z., Kojiev H. H. Minimizing the impact of mining on the environment. *Ecology & Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 26–29. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-26-29.
2. Valiev N. G., Propp V. D., Vandyshev A. M. The Mining Department of UGSU is 100 years old. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 130–143. [In Russ].
3. Liskova M. Yu. The negative impact exerted on the environment by enterprises for the extraction and enrichment of potassium-magnesium salts. *Perm journal of petroleum and mining engineering*. 2017, vol. 16, no. 1, pp. 82–88. [In Russ].
4. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.019.
5. Bosikov I. I., Klyuev R. V. *Metody sistemnogo analiza prirodno-promyshlennoy sistemy gorno-metallurgicheskogo kompleksa* [Methods of system analysis of the natural-industrial system of the mining and metallurgical complex], Vladikavkaz, SKGMI, 2015, 124 p.
6. Hebblewhite B. K. Geotechnical risk in mining methods and practice: critical issues and pitfalls of risk management. *Proceedings of the First International Conference on Mining Geomechanical Risk*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019, pp. 99–308.
7. Kachurin N. M., Stas G. V., Korchagina T. V., Zmee M. V. Geomechanical and aerogasodynamic consequences of mining the territories of the mining branches of the mines of Eastern

Donbass. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2017, no. 1, pp. 170–182. [In Russ].

8. Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Komashchenko V. I., Razorenov Yu. I. Ecological aspects of ore tailings storage in the mining region. *Ecology & Industry of Russia*. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 35–39. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2018-6-35-39.

9. Diego I., Torno S., Torano J., Menendez M., Malcolm G. A practical use of CFD for ventilation of underground works. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011, vol. 26, pp. 189–200.

10. Shutaleva A., Martyushev N., Nikonova Z., Savchenko I., Abramova S., Lubimova V., Novgorodtseva A. Environmental behavior of youth and sustainable development. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1, article 250. DOI: 10.3390/su14010250.

11. Krupskaya L. T., Orlov A. M., Golubev D. A., Kolobanov K. A., Filatova M. A. Assessment of the environmental hazard of accumulated waste from processing of mineral raw materials of closed mining enterprises in the Amur region and Primorye. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020, no. 5(3), pp. 208–223. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-3-208-223.

12. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremkov E. A., Sorokova S. N., Mengxu Q. Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 2, article 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

13. Ufimtsev V. I., Androkhanov V. A., Kupriyanov O. A., Ufimtsev F. G. Fertile soil layer as a factor of restoration of zonal phytocenoses on coal industry dumps. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2019, no. 6(136), pp. 64–71. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2019-6-64-71.

14. Brigida V. S., Kozhiev Kh. Kh., Saryan A. A., Dzhioeva A. K. Time-space problems in geocology: An inter-disciplinary approach. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 4, pp. 20–32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.

15. Ignatieva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. Technogenic mineral formations: problems of transition to a closed-cycle economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 73–89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-4-0-20-32.

16. Markov S. O., Murko E. V., Nepsha F. S. Granulometric composition of dump arrays of Kuzbass sections. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, no. 6(4), pp. 259–266. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266.

17. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. DOI: 10.1016/j.hydromet.2015.08.022.

18. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 189, pp. 620–626. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.083.

19. Korchagina T. V., Stepanov Yu. A., Burmin L. N. Method for assessing environmental impact indicators in the areas of coal enterprises. *Ugol'*. 2018, no. 8, pp. 119–123. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-8-119-123.

20. Chotchaev H. O., Burdzieva O. G., Zaalishvili V. B. Zoning of high-altitude territories by geocological loads caused by geodynamic and climatic influences. *Geology and geophysics of the South of Russia*. 2021, no. 11(1) pp. 81–94. [In Russ].

21. Rezanov V. A., Martyushev N. V., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Kukartsev V. A., Grinek A. V., Skeebeba V. Y., Lyosin A. V., Karlina A. I. Study of melting methods by electric resistance welding of rails. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 12, article 2135. DOI: 10.3390/met12122135.

22. Safronova O. S., Lamanova T. G., Sheremet N. V. Results of the study of the natural restoration of vegetation cover on overburden dumps that arose in the 1990s in the Republic of Khakassia. *Ugol'*. 2018, no. 7, pp. 68–77. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-68-71.

23. Filimonov V. A., Gorina L. N. Features of the development of a labor protection management system based on a process approach. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 113. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.113.

24. Torno S., Torano J., Ulecia M., Allende C. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013, vol. 34, pp. 73–81.

25. Carriere R., McGuire C., McLaren E., Witow D. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*. 2017, pp. 7–16.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Панфилов Илья Александрович<sup>1,2</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: crook\_80@mail.ru, НОЦ Технологии искусственного интеллекта МГТУ им. Н.Э. Баумана, Антамошкин Олеслав Александрович<sup>1,2</sup> — д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией, e-mail: oleslav24@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5976-5847,

Федорова Наталья Владимировна<sup>1,2</sup> — канд. экон. наук, доцент, доцент, e-mail: nvfed@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0391-8266,

Дерюгин Федор Федорович<sup>3</sup> — инженер-исследователь, e-mail: deryugin040301@yandex.ru,

Бянкин Владислав Евгеньевич<sup>3</sup> — лаборант-исследователь, e-mail: borck3420@gmail.com,

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,

<sup>3</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Для контактов:** Антамошкин О.А., e-mail: oleslav24@gmail.com.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.A. Panfilov<sup>1,2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Assistant Professor, e-mail: crook\_80@mail.ru,

Digital Material Science: New Materials

and Technologies, Bauman Moscow State

Technical University, 105005, Moscow, Russia,

O.A. Antamoshkin<sup>1,2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Head of Laboratory, e-mail: oleslav24@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5976-5847,

N.V. Fedorova<sup>1,2</sup>, Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor,

Assistant Professor, e-mail: nvfed@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-0391-8266,

F.F. Deryugin<sup>3</sup>, Research Engineer,

e-mail: deryugin040301@yandex.ru,

V.E. Byankin<sup>3</sup>, Laboratory Assistant-Researcher,

e-mail: borck3420@gmail.com,

<sup>1</sup> Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University

of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia,

<sup>3</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russia.

**Corresponding author:** O.A. Antamoshkin, e-mail: oleslav24@gmail.com.

Получена редакцией 06.07.2023; получена после рецензии 01.10.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 06.07.2023; received after the review 01.10.2023; accepted for printing 10.10.2023.