

УДК 622.271:551.509(470.21)

ПРОБЛЕМЫ ЗАГАЗОВАННОСТИ ВНУТРИКАРЬЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ ВЕДЕНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

А. А. ПЕТРОВ¹, научный сотрудник, petrov@goi.kolasc.net.ru

А. В. ЗОРИН², доцент, канд. геогр. наук

И. В. МЕЛИК-ГАЙКАЗОВ³, директор по горным работам, канд. техн. наук

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

² Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

³ ПАО «АКРОН», Москва, Россия

Введение

При разработке месторождений открытым способом одной из основных проблем промышленной и экологической безопасности производства работ является достижение нормативных характеристик состава атмосферы карьера, так как превышение предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосфере внутрикарьерного пространства в результате работы горного оборудования и проведения массовых взрывов приводит к вынужденной остановке работы всего карьера и, соответственно, к существенным экономическим потерям. Актуальность решения данной задачи возрастает с увеличением глубины карьеров, так как ухудшаются условия естественного воздухообмена в их атмосфере.

Продолжительность периодов загрязнения атмосферы внутрикарьерного пространства в большой степени зависит от метеоусловий, ведущих к скоплению загрязняющих веществ в рабочей зоне карьера. Многократные и продолжительные формирования инверсий и штилевых условий в атмосфере карьера способствуют длительным периодам ее загрязнения значительно выше ПДК (рис. 1) [1].

Исследования предыдущих лет в области аэрологии карьеров осуществляли на основе моделирования процессов, проходящих в атмосфере карьера, в частности по созданию математических моделей аэрогазодинамики карьерных пространств в условиях сложной орографии и температурной стратификации атмосферы [2].

Развитие методов вычислительной гидродинамики (CFD) позволило лучше понять распределение загрязняющих веществ в атмосфере глубоких карьеров. Карьеры, расположенные в высоких широтах, особенно в Арктике и субарктике, сталкиваются с проблемой снижения интенсивности естественного воздухообмена из-за температурной инверсии воздуха, которая преобладает в течение большей части зимы, иногда регистрируется и в летний период. В зарубежных исследованиях также приведены примеры использования трехмерных CFD-моделей для анализа проблемы роста загрязняющих веществ в атмосфере внутрикарьерного пространства во время инверсии [3–7]. С их помощью решали задачи оценки энергии процесса естественного воздухообмена в карьере, взаимодействия с искусственно созданными свободными струями, распространения примесей от источников загрязнения, их химических превращений в атмосфере.

Разработана автоматизированная система комплексного мониторинга состояния атмосферы глубоких карьеров, включающая мониторинг метеоусловий, приводящих к скоплению загрязняющих веществ в атмосфере карьера, и мониторинг газового состава атмосферы внутрикарьерного пространства, характеризующий уровни загрязнения. Рассмотрена возможность снижения загазованности внутрикарьерного пространства в летний период интенсификацией процессов естественного воздухообмена при создании растительного покрова на предохранительных бермах карьера.

Ключевые слова: атмосфера внутрикарьерного пространства, аэрогазодинамика, система мониторинга, метеоусловия, газовый состав атмосферы, температурная инверсия, прогноз, подстилаящая поверхность, растительный покров.

DOI: 10.17580/gzh.2019.06.09

В технической литературе предложены способы принудительного проветривания карьеров [8–10]. Расчеты показали, что для реализации этой идеи в условиях глубоких карьеров необходимо значительное число технических средств вентиляции, что потребует огромных (до сотен Вт энергии на 1 м³ воздуха) дополнительных энергетических затрат. Кроме того, рассматривали различные технические решения для интенсификации естественного воздухообмена в атмосфере карьеров, которые также не нашли широкого применения.

Одним из возможных и экономически целесообразных решений проблемы загазованности атмосферы рабочих зон карьера является планирование горных работ на основе прогноза состояния атмосферы внутрикарьерного пространства. Прогноз основан



Рис. 1. Пример загазованности в результате образования инверсии радиационного выхолаживания (карьер «Железный», АО «Ковдорский ГОК»)

на синоптических методах расчета температурных стратификаций по принципам аэрологической диаграммы и программном комплексе расчета аэрации карьерного пространства. Необходимым условием для составления достоверного прогноза является получение фактической информации о состоянии атмосферы внутри-карьерного пространства на базе мониторинговой сети измерительных постов наблюдений.

Состав и функции системы комплексного мониторинга атмосферы внутрикарьерного пространства

Для решения проблемы загазованности внутрикарьерного пространства и повышения промышленной и экологической безопасности открытых горных работ в Горном институте КНЦ РАН разработана методология прогноза состояния атмосферы глубоких карьеров на основе изучения влияющих на нее природных и производственных факторов. Аппаратурной базой методологии является автоматизированная система комплексного мониторинга аэрологического состояния внутрикарьерного пространства [11]. В состав системы входят мониторинг метеоусловий, газового состава внутрикарьерного пространства и снегосъемка.

Анализ фактической метеоинформации, характеризующей аэрологическое состояние внутрикарьерного пространства, позволяет выявлять закономерности возникновения неблагоприятных метеоусловий и определять периоды развития инверсионных и штилевых состояний атмосферы карьера, ведущих к скоплению вредных примесей. Мониторинг газового состава атмосферы дает возможность получать фактические данные о содержании загрязняющих веществ и соотносить уровни загрязнения с той или иной метеоситуацией в карьере. Снегосъемка позволяет получать суммарную величину выпадений загрязняющих веществ за период от образования устойчивого снежного покрова до начала снеготаяния и дифференцировать загрязнение по глубине карьера.

Система мониторинга базируется на программно-аппаратном комплексе автоматизированного контроля параметров атмосферы карьера, позволяющем получать фактические данные о состоянии внутрикарьерного пространства в оперативном режиме. Основой аппаратного обеспечения системы является сеть автоматических измерительных постов, расположенных по разным бортам карьера на различных горизонтах. В состав каждого поста входит метеорологическое оборудование для измерения метеопараметров внутрикарьерного пространства и комплекс газоаналитического оборудования для контроля газового состава атмосферы карьера [12, 13].

Программное обеспечение включает в себя комплекс системных программ, выполняющих сервисные функции по управлению аппаратным обеспечением мониторинговой сети, и прикладных программ, реализующих задачи по формированию информационного ресурса и предоставлению информации пользователю. Информационный ресурс системы мониторинга формирует базу данных количественных и качественных показателей, характеризующих состояние атмосферы внутрикарьерного пространства.

На основе фактических данных системы мониторинга и синоптической информации, получаемой по общедоступным каналам, рассчитывают прогноз метеоусловий, приводящих к скоплению загрязняющих веществ в рабочей зоне карьера.

Первым этапом при составлении прогноза является определение синоптической ситуации над регионом по данным гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды общего доступа. Оценивают возможность возникновения синоптических ситуаций, способствующих развитию температурных инверсий в приземном слое атмосферы над регионом.

На втором этапе при расчете суточного прогноза аэрологического состояния внутрикарьерного пространства прогнозируют температуру воздуха в «отправной точке» системы мониторинга T_{mp} (измерительный пост мониторинговой сети на границе замкнутого контура карьера). Прогноз рассчитывают в 7 и 19 ч (время, характеризующее окончание ночного и дневного периодов суток). При этом определяют адвективную поправку T_a как разность температур в начале T_n и конце T_k траектории («отправная точка»), полученную по синоптическим картам:

$$T_a = T_n - T_k \tag{1}$$

Изменения температуры воздуха рассчитывают на 24 ч по формулам:

$$T_{mp} = -0,2T_a + 0,4N \text{ (на ночь)} \tag{2}$$

и

$$T_{mp} = -0,2T_a - AN - B\alpha \text{ (на день)}, \tag{3}$$

где N – разность (в баллах) между ожидаемой облачностью на горизонте замкнутого контура в «основной точке» и фактической облачностью в начале траектории, откуда должна поступить воздушная масса; A и B – коэффициенты, учитывающие влияние климатических условий месяца года (скорости ветра, влажности почвы, суммарной радиации и эффективного излучения) на изменения температуры воздуха; α – разность между значениями альbedo в пункте, для которого составляют прогноз, и в районе, откуда придет воздушная масса.

Значения величин N , коэффициентов A , B и альbedo приведены ниже.

		Облачность				
Облачность, %	0	25	50	75	100	
N , балл	0	3	5	8	10	

Коэффициенты A и B при скорости ветра ≤ 6 м/с

Месяц	1–2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	–0,4	0	0	0,4	1	1,2	1,1	0,9	0,6	0,2	0,1
B	4	7	12	16	18	20	19	17	13	9	5

Учет коэффициентов A и B при большей скорости ветра не требуется, так как в этом случае карьер проветривается за счет естественной аэрации.

Альbedo подстилающей поверхности

Почва сухая	0,17
Почва влажная	0,11
Песок	0,35
Растительный покров	0,18
Снег талый	0,60
Снег свежий	0,85
Снег загрязненный	0,45
Вода	0,22

На третьем этапе рассчитывают прогнозируемые температуры воздуха T в точках мониторинга аэрологического состояния внутрикарьерного пространства на 19 ч по следующей формуле:

$$T = 0,2(2T_{19} + T_{07} + T_{01} + T_{19 \text{ пред.сут}}), \quad (4)$$

где $T_{\text{пред.сут}}$ – температура воздуха за предшествующие сутки.

Для повышения надежности прогноза рассчитывают температуру воздуха по всем точкам наблюдений в 21 ч по формуле

$$T = T_{d21} - 2, \quad (5)$$

где T_{d21} – температура точки росы в 21 ч; определяется по психрометрическим таблицам (данные температуры и влажности воздуха в 21 ч).

Для автоматического расчета суточного прогноза температурных инверсий атмосферы внутрикарьерного пространства в составе системы комплексного мониторинга реализован программный модуль графической визуализации ежечасного фактического и суточного прогностического распределения температуры воздуха атмосферы карьера по высоте для определения инверсионных и конвективных состояний внутрикарьерного пространства. Возможность образования слоев воздуха, затрудняющих развитие конвективных потоков в атмосфере карьера, определяется при сопоставлении взаимного расположения прогностических кривых стратификации и кривых состояния атмосферы, построенных по сухоадиабатическому градиенту $1^\circ/100 \text{ м}$, характеризующих нормальное развитие конвекции и определяющих благоприятные условия проветривания. Отклонение прогностической кривой стратификации выше кривой состояния атмосферы характеризует ухудшение условий проветривания, ниже – улучшение условий проветривания. Все необходимые данные для определения состояния атмосферы внутрикарьерного пространства отображаются в виде графика на главной странице информационного ресурса (рис. 2).

Количество энергии, поступающей с ветровым потоком, прямо пропорционально скорости ветра и площади карьера по замкнутому контуру. При углублении карьера и сохранении площади контакта с ветровым потоком поступление механической энергии, ее удельный расход на единицу массы воздуха по высоте воздушного столба внутри карьера быстро убывает, что приводит к ослаблению течений воздуха на дне карьера. При входе в карьерное пространство естественного ветрового потока он расширяется в среднем под углом в 15° . В результате этого в атмосфере карьера формируются две циркуляционные зоны: прямоочная – в верхней части карьера и рециркуляционная – во всем остальном объеме карьера. Если первая зона с течением времени остается практически постоянной, то вторая значительно расширяется с увеличением глубины карьера.

На базе 3D-модели карьера, созданной в системе автоматизированного планирования, проектирования и сопровождения горных работ MINEFRAME [14], по характеристикам ветра на замкнутом контуре карьера (данные поступают в автоматическом режиме) определяют размеры зон циркуляции в объеме карьера (рис. 3).

По плоскостям румбов строят разрезы, которые позволяют наглядно установить румбовые точки карьера по замкнутому контуру. В зависимости от направления ветра над контуром карьера определяют точку, в которой расположение плоскости меняется на 15° , и в результате пересечения плоскости с границами объема

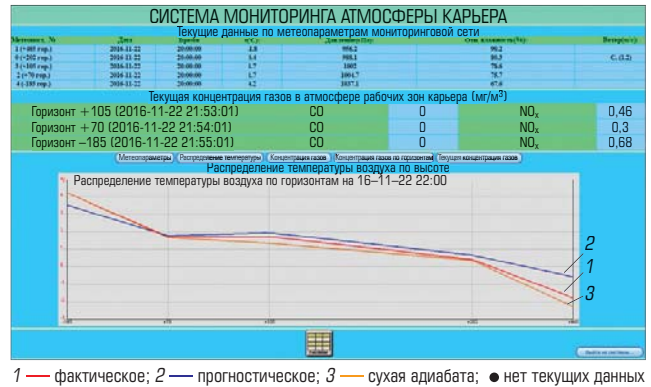


Рис. 2. График ежечасного фактического и суточного прогностического распределения температуры воздуха атмосферы карьера

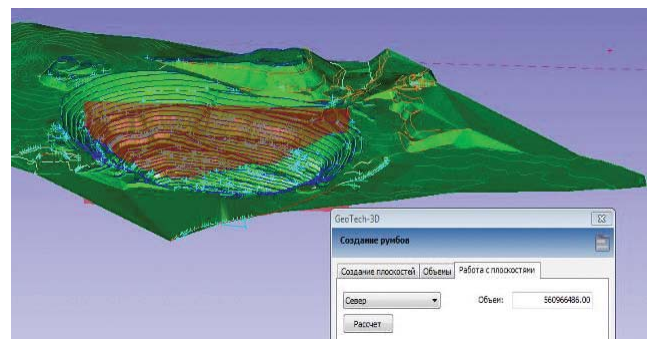


Рис. 3. Определение объемов зон циркуляции по 3D-модели карьера «Железный» при северном направлении ветра

карьера вычисляют объемы прямоочной и рециркуляционной зон. Модель позволяет рассчитать, при каком направлении ветра на замкнутом контуре, в какой части карьера расположены прямоочная зона циркуляции и рециркуляционная и определить их объем.

Для наглядного представления фактических данных мониторинга средствами системы моделирования MINEFRAME созданы 3D-модели карьера с визуализацией параметров состояния атмосферы внутрикарьерного пространства (А. А. Андреев, Горный институт КНЦ РАН). На основе 3D-моделей рассчитывают и моделируют распределение температур воздуха по глубине карьера, распределение скоростей ветра в объеме карьера, области распространения углекислого газа и оксидов азота в атмосфере карьера (рис. 4).

В составе информационного ресурса системы мониторинга разработан программный модуль автоматического расчета суточного прогноза состояния атмосферы карьера на основе фактических метеоданных.

Прогноз аэрологического состояния внутрикарьерного пространства позволит обоснованно осуществлять планирование горных работ, переносить сроки проведения массовых взрывов, управлять транспортными потоками, что, в свою очередь, обеспечит повышение промышленной и экологической безопасности производства, улучшение условий труда работников, увеличение срока эксплуатации оборудования, улучшение экономических показателей предприятия.

Аэрологическая эффективность создания растительного покрова на предохранительных бермах карьера

Одним из способов использования энергии естественных процессов для решения проблемы активизации воздухообмена в карьере может быть создание растительного покрова на предохранительных бермах карьера по технологии Горного института КНЦ РАН [15].

При изменении состояния подстилающей поверхности в горизонтальном плане возникают разнонаправленные воздушные потоки термического характера. Чаще наблюдаются горизонтальные потоки от скальной поверхности к поверхности с растительным покровом. Это объясняется тем, что бермы с растительным покровом характеризуются повышенной влажностью воздуха и пониженной относительно скальных поверхностей температурой воздуха. При этом возникают и обратные компенсационные потоки. Температурные градиенты между различными подстилающими поверхностями в среднем составляют $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а максимальные могут достигать значений $7,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ и более.

Мониторинг стратификации температуры воздуха, способствующей возникновению в карьере конвекционных потоков (рис. 5), показал, что создание растительного покрова на предохранительных бермах приводит к увеличению вертикальных инверсионных состояний атмосферы на 20 % и увеличению инверсионного градиента на $2\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ за время наблюдения в теплый период года.

Кроме того, создание на бермах растительного покрова повышает содержание кислорода в атмосфере карьера, что создает благоприятные условия для аэрации всего карьера, способствует снижению содержания вредных примесей. Растения, поглощая углекислый газ, расщепляют его и усваивают углерод для синтеза органических веществ. Освобождающийся кислород выделяется в атмосферу.

При определении интенсивности фотосинтеза (ИФ) учитывается количество CO_2 , усваиваемое единицей листовой поверхности за единицу времени. ИФ измеряется преимущественно в $\text{мг CO}_2/(\text{дм}^2\cdot\text{ч})$ или в $\text{мкмоль CO}_2/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$. Для характеристики активности фотосинтеза используется также количество O_2 , выделяемое единицей листовой поверхности за единицу времени. В среднем за сутки растениями горной тундры поглощается более 100 мг CO_2 и выделяется более 70 мг O_2 .

Травянистые многолетники (в том числе злаки и осоки) имеют потенциальную интенсивность фотосинтеза от 50 до $100\text{ мг CO}_2/(\text{г сухой массы}\cdot\text{ч})$. Листья многолетних трав занимают сравнительно большой объем приземного пространства. Большую продуктивность фотосинтеза многолетних трав можно объяснить тем, что они находятся в лучших условиях освещения, и поэтому у них выше интенсивность фотосинтеза в дневные часы и больше его продолжительность, особенно во второй половине дня. Важны также показатели удлинённости листьев, т. е. отношение длины к ширине. Выгодна форма удлинённых листьев (злаки).

Растительный покров на бермах из многолетних трав с мощной корневой системой и удлинённой формой листьев обладает высокой интенсивностью фотосинтеза, в процессе которого выделяется значительный объем кислорода. Зеленые растения выполняют исключительно важную функцию: поддерживают постоянное

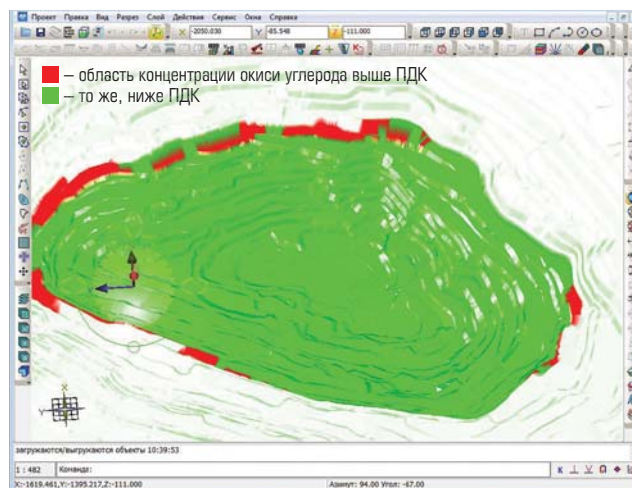


Рис. 4. Зона распространения оксида углерода в атмосфере карьера



Рис. 5. Мониторинг температурного режима воздуха на бермах карьера «Железный» (гор. +190 м)

содержание кислорода в воздухе. Это актуально, так как при разработке месторождений открытым способом уменьшение кислорода происходит из-за его затрат на процессы окисления откосов горных выработок и обнажений пород, отбитой горной массы, отвалов пород, крепления выработок, а также ввиду работы двигателей внутреннего сгорания горного оборудования и транспортных средств [16].

Таким образом, изменение состояния подстилающей поверхности на нижних и средних горизонтах способствует развитию внутрикарьерной циркуляции по горизонтальной и вертикальной осям карьера, что способствует перемешиванию воздушных масс, а значит, — снижению концентраций вредных примесей в объеме карьера. Аналогичные изменения на средних и верхних горизонтах содействуют развитию общеобменной циркуляции с окружающей средой, что будет способствовать выносу вредных примесей за пределы атмосферы карьера и поступлению чистых масс воздуха. На предохранительных бермах с растительным покровом создается особый микроклимат с повышенным содержанием кислорода, что способствует нормализации газового состава воздуха, снижению содержания вредных примесей и улучшению условий труда в карьере.

Заключение

С целью повышения промышленной и экологической безопасности открытых горных работ в Горном институте КНЦ РАН разработана автоматизированная система мониторинга состояния атмосферы карьера, в состав которой входят: мониторинг метеоусловий, приводящих к скоплению загрязняющих веществ

в рабочей зоне карьера; мониторинг газового состава внутрикарьерного пространства, характеризующий уровни загрязнения, и снегосъемка, показывающая распределение загрязнения по гребне карьера.

Активизации воздухообмена в глубоком карьере способствует создание растительного покрова на его предохранительных бермах.

Библиографический список

- Zorin A. V. *Аэрология карьеров*. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мурманск : Изд-во МГТУ, 2015. – 119 с.
- Kozyrev S. A., Amosov P. V. Моделирование распределения воздушных потоков в глубоких карьерах // *Горный журнал*. 2014. № 5. С. 7–12.
- Raj K., Bandopadhyay S. CFD model validation of pollutant transport in open pit mine under air inversion // *The Future for Mining in a Data-Driven World : SME Annual Conference and Expo*. – Phoenix, 2016.
- Xing Peng, Guo-Liang Shi, Jun Zheng, Jia-Yuan Liu, Xu-Rong Shi et al. Influence of quarry mining dust on PM_{2.5} in a city adjacent to a limestone quarry: Seasonal characteristics and source contributions // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 550. P. 940–949.
- Tartakovsky D., Stern E., Broday D. M. Dispersion of TSP and PM₁₀ emissions from quarries in complex terrain // *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 542. P. 946–954.
- Raj K., Bandopadhyay S. CFD modeling of cloud cover for pollutants dispersion in deep open-pit mines under arctic air inversion // *Creating Value in a Cyclical Environment : SME Annual Conference and Expo*. – Denver, 2017.
- Meisuh B. K., Kankam C. K., Buabin T. K. Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete // *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. P. 16–22.
- Nikolaev A. B. Установка для проветривания неглубоких карьеров и очистки выдаваемого воздуха от пыли // *ГИАБ*. 2015. № 2. С. 250–254.
- Хазинс В. М., Спивак А. А. Интенсификация вентиляции карьера конвективной струей // *Взрывное дело*. 2015. № 114/71. С. 309–324.
- Fedotov V., Denisov V. Загрязнения воздушной среды и пути их снижения на открытых объектах горнодобывающего комплекса // *Инженерная защита*. 2016. № 1(12). С. 10–13.
- Месяц С. П., Петров А. А. Методология оценки состояния атмосферы внутрикарьерного пространства глубоких карьеров // *ГИАБ*. 2015. Спец. выпуск 56. Глубокие карьеры. С. 499–509.
- Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
- Месяц С. П., Петров А. А., Семкин С. В. Концепция автоматизации экологического мониторинга состояния атмосферы глубоких карьеров // *Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов : сб. ст. по итогам Всероссийской науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов*. – Апатиты : Реноме, 2014. Т. 1. С. 159–166.
- Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э., Белогородцев О. В. Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME // *Горный журнал*. 2015. № 8. С. 53–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.12
- Месяц С. П., Тарасов Г. Е., Мельников Н. Н., Петров А. А., Инков В. Н. Способы повышения промышленной и экологической безопасности при ведении открытых горных работ // *Горный журнал*. 2010. № 9. С. 102–106.
- Данилова А. С., Паршуков А. Б., Машкович К. И., Калинина О. В. Разработка «Проекта нормативов предельно допустимых выбросов» для транспортных подразделений и инфраструктуры ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» // *Цветные металлы*. 2015. № 2. С. 42–46.

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 67–71
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.09

Gas pollution of in-pit space in open mining: Problems and solutions

Information about authors

A. A. Petrov¹, Researcher, petrov@goi.kolasc.net.ru

A. V. Zorin², Associate Professor, Candidate of Geographical Sciences

I. V. Melik-Gaikazov³, Director for Mining, Candidate of Engineering Sciences

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

²Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

³PJSC Acron, Moscow, Russia

Abstract

One of the main problems in open mining is to ensure the environmental and industrial safety, since large-scale blasting and operation of vehicles and other diesel equipment lead to gas pollution of in-pit space above the maximum allowable concentrations. The urgency of solving the problem increases with deepening of open pits due to the deterioration of natural air exchange, especially during calm and temperature inversions.

One of the possible and economically feasible solutions to the problem of gas contamination in the open pit working areas is planning of mining operations based on prediction of the in-pit atmosphere state. As part of this solution, an automated integrated atmosphere monitoring system is developed for deep open pit mines. This system includes monitoring of weather conditions leading to accumulation of pollutants in open pit mine air and monitoring of gas composition of in-pit air characterizing pollution levels. On the basis of the actual data obtained from the monitoring system and the synoptic information from public channels, the forecast of weather conditions such that lead to the accumulation of pollutants in working areas of open pit is made.

The authors discuss feasibility of intensifying natural air exchange in in deep open pit mines with a view to reducing gas pollution of the in-pit space by creating a vegetation cover on the protective berms using the technology of the Mining Institute, Kola Science Center of the RAS.

Keywords: in-pit space air, aerodynamics, monitoring, weather conditions, air gas composition, temperature inversion, prediction, underlying surface, vegetation cover.

References

- Zorin A. V. *Aerology of open pits*. 2nd enlarged and revised edition. Murmansk : Izdatelstvo MGUT, 2015. 119 p.
- Kozyrev S. A., Amosov P. V. Modeling of distribution of air flows in deep open pits. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 5. pp. 7–12.

- Raj K., Bandopadhyay S. CFD model validation of pollutant transport in open pit mine under air inversion. *The Future for Mining in a Data-Driven World : SME Annual Conference and Expo*. Phoenix, 2016.
- Xing Peng, Guo-Liang Shi, Jun Zheng, Jia-Yuan Liu, Xu-Rong Shi et al. Influence of quarry mining dust on PM_{2.5} in a city adjacent to a limestone quarry: Seasonal characteristics and source contributions. *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 550. pp. 940–949.
- Tartakovsky D., Stern E., Broday D. M. Dispersion of TSP and PM₁₀ emissions from quarries in complex terrain. *Science of The Total Environment*. 2016. Vol. 542. pp. 946–954.
- Raj K., Bandopadhyay S. CFD modeling of cloud cover for pollutants dispersion in deep open-pit mines under arctic air inversion. *Creating Value in a Cyclical Environment : SME Annual Conference and Expo*. Denver, 2017.
- Meisuh B. K., Kankam C. K., Buabin T. K. Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. Vol. 8. pp. 16–22.
- Nikolaev A. V. Installation for airing not deep pits and clean issued by the air of dust. *GIAБ*. 2015. No. 2. pp. 250–254.
- Khazins V. M., Spivak A. A. Intensification of mining quarry ventilation by convective jet. *Vzryvnoe delo*. 2015. No. 114/71. pp. 309–324.
- Fedotov V., Denisov V. Air pollution and the ways to reduce them on open objects of the mining complex. *Inzhenernaya zashchita*. 2016. No. 1(12). pp. 10–13.
- Mesyats S. P., Petrov A. A. Assessment methodology for in-pit atmosphere state in deep open-pits. *GIAБ*. 2015. Special issue 56. Deep open pits. pp. 499–509.
- Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. pp. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
- Mesyats S. P., Petrov A. A., Semkin S. V. Automation concept for ecological monitoring of deep open pit mine atmosphere. *Ecological Strategy of Mining Industry – New Outlook on Resource Development : Proceedings of the All-Russian Scientific-Technical Conference with International Participation*. Apatity : Renome, 2014. Vol. 1. pp. 159–166.
- Lukichev S. V., Navogitsyn O. V., Semenova I. E., Belogorodtsev O. V. Mine planning and design in MINEFRAME. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 8. pp. 53–58. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.12
- Mesyats S. P., Tarasov G. E., Melnikov N. N., Petrov A. A., Inkov V. N. Methods of increase of industrial and ecological safety in opencast mining works. *Gornyi Zhurnal*. 2010. No. 9. pp. 102–106.
- Danilova A. S., Parshukov A. B., Mashkovich K. I., Kalinina O. V. Development of the «Project of standards of maximum permissible discharges» for vehicle pools and infrastructure of the Polar Division of «Norilsk Nickel» MMC. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 2. pp. 42–46.