

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫБРОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ

А.В. Стриженок¹, Т.А. Петрова¹, В.В. Пронин², И.В. Шмонин³, П.А. Безрученко¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru

² ООО «КРУ-Взрывпром», Кемерово, Россия

³ АО «УК «Кузбассразрезуголь», Кемерово, Россия

Аннотация: В настоящее время уголь продолжает оставаться одним из наиболее востребованных энергоресурсов во всем мире, а добыча угля, особенно открытым способом, ежегодно приводит к деградации значительных площадей, оказывая комплексное и продолжительное негативное воздействие на все компоненты природной среды. Источником наиболее интенсивных залповых выбросов на угольных разрезах являются взрывные работы. Выполнить инструментальное определение интенсивности выброса при массовых взрывах невозможно, поскольку нахождение людей и оборудования в зоне проведения взрывных работ запрещено. Поэтому возникает необходимость использования достоверных расчетных методик для определения интенсивности выбросов с целью осуществления моделирования негативного воздействия массовых взрывов на компоненты природной среды. Выполнен анализ существующих методик расчета интенсивности выброса при проведении массовых взрывов, проведен выбор методики и расчет интенсивности выброса на примере модельных взрывааемых блоков, выполнена верификация полученных расчетных значений приземной концентрации на основании результатов натурных наблюдений, что позволило дать комплексную оценку возможности использования расчетных методик интенсивности выброса при проведении массовых взрывов на разрезах и выделить ряд недостатков и упрощений, которые требуют корректировки для повышения точности расчета.

Ключевые слова: массовый взрыв, интенсивность выброса, формирование пылегазового облака, пыление, приземная концентрация, расчетная методика, экспериментальные наблюдения, моделирование негативного воздействия.

Благодарность: Исследования проведены в рамках мероприятия № 1 Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р.

Для цитирования: Стриженок А. В., Петрова Т. А., Пронин В. В., Шмонин И. В., Безрученко П. А. Обоснование возможности использования расчетных методик для оценки интенсивности выброса загрязняющих веществ при проведении массовых взрывов на угольных разрезах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 114–130. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_114.

Justification of the possibility of using calculation methods to assess the intensity of pollutant emissions during mass blasting in coal open mines

A.V. Strizhenok¹, T.A. Petrova¹, V.V. Pronin², I.V. Shmonin³, P.A. Bezruchenko¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia, e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru

² ООО «KRU-Vzryyprom», Kemerovo, Russia

³ JSC «UK «Kuzbassrazrezugol», Kemerovo, Russia

Abstract: Currently, coal remains one of the most popular energy resources worldwide, and coal mining, especially open-pit mining, annually leads to the degradation of significant areas, having a complex and long-term negative impact on all components of the natural environment. The source of the most intense salvo emissions in open-pit coal mines is blasting operations. It is impossible to perform an instrumental determination of the emission intensity during mass explosions, since the presence of people and equipment in the blasting zone is prohibited. Therefore, there is a need to use reliable calculation methods to determine the emission intensity in order to model the negative impact of mass explosions on the components of the natural environment. The paper analyzes the existing methods for calculating the emission intensity during mass explosions selects a method and calculates the emission intensity using model blasted blocks as an example, and verifies the obtained calculated values of the ground concentration based on the results of in-kind observations. This made it possible to give a comprehensive assessment of the feasibility of using calculation methods for the emission intensity during mass explosions in open pits and highlights a number of shortcomings and simplifications that require adjustment to improve the accuracy of the calculation.

Key words: mass explosion, emission intensity, dust and gas cloud formation, dusting, ground concentration, calculation method, experimental observations, negative impact modeling.

Acknowledgements: The research was conducted within the framework of Event No. 1 of the Comprehensive Scientific and Technical Program for the Full Innovation Cycle, approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 No. 1144-r.

For citation: Strizhenok A. V., Petrova T. A., Pronin V. V., Shmonin I. V., Bezruchenko P. A. Justification of the possibility of using calculation methods to assess the intensity of pollutant emissions during mass blasting in coal open mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1): 114-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_114.

Введение

На сегодняшний день уголь продолжает оставаться одним из ключевых видов топлива в мировой энергетике, на его долю приходится порядка 40% производства электроэнергии во всем мире. В 2024 г. мировая добыча угля превысила 9 млрд т, из которых почти половина приходится на КНР [1].

В настоящее время в России разведанные запасы угля составляют немно-

гим менее 200 млрд т, а ресурсообеспеченность углем, по самым пессимистичным прогнозам, составляет более 200 лет, что многократно больше, чем ресурсообеспеченность другими энергетическими ресурсами, такими как нефть и природный газ. В 2024 г. в России было добыто около 480 млн т угля, в том числе антрацита, каменного, коксующегося и бурого, что на 25% больше, чем в 2020 г. На территории нашей

страны добыча угля ведется в 16 угольных бассейнах, территория которых охватывает 85 муниципальных образований Российской Федерации, при этом более 75% всего угля в России добывается открытым способом [2].

Предприятия по добыче и обогащению угля являются источником интенсивного загрязнения всех компонентов природной среды, однако наибольшее негативное воздействие угольная промышленность оказывает на атмосферный воздух в результате добычи угля открытым способом. Так, в 2016 г. в России показатели платы за выбросы в атмосферу на разрезах минимум в 2,3 раза превысили показатели платы за сбросы и размещение отходов на этих же предприятиях, при этом многократно превысив показатели платы за негативное воздействие на окружающую среду предприятиями, ведущими добычу угля подземным способом [3].

Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения за 2024 г., загрязнение твердыми частицами угля ежегодно сокращает примерно 10 000 жизней во всем мире, а число преждевременных смертей от загрязнения воздуха в результате открытой добычи угля составляет около 52 000 ежегодно [4].

Если рассматривать разрез как совокупность источников загрязнения атмосферы, то все источники можно классифицировать по нескольким характеристикам.

По времени экспозиции все источники загрязнения атмосферного воздуха подразделяются на периодические и непрерывно действующие. К периодическим источникам можно отнести буровые и взрывные работы, отвалы и борта разрезов, а к постоянно действующим — сравнительно непрерывные технологические процессы, такие как перегрузка и транспортировка угля и вскрыши [5].

Также на разрезах можно выделить неорганизованные (рассредоточенные) и организованные (сосредоточенные) источники выбросов. К неорганизованным источникам выбросов относятся объекты, выбросы от которых происходят в результате ветровой эрозии, например, борта открытых горных выработок и отвалов, склады пустой и вмещающей пород, хвосто- и шламохранилища. Также к неорганизованным источникам пылегазовых выбросов можно отнести объекты выполнения технологических операций, таких как буровзрывные работы, экскавация, транспортирование, погрузочно-разгрузочные работы и другие. На таких источниках пыле- и газовыделение осуществляется со значительной площади, которая, как правило, сопоставима с площадью всей площадки выполнения технологического процесса. Отличительной особенностью неорганизованных источников выброса является их периодичность действия и непостоянство интенсивности выброса. Эти параметры могут зависеть как от специфики выполняемого технологического процесса и расположения источника выделения в соответствии с преобладающей розой ветров, так и от природно-климатических условий, включающих скорость и направление ветра, температуру, наличие атмосферных осадков и мощность снежного покрова [6].

К организованным источникам выбросов относятся преимущественно трубы стационарных источников выбросов (котельные, обогатительные фабрики, заводы), вентиляционные выходы производственных помещений, выхлопные трубы двигателей внутреннего сгорания.

Рассматривая любое предприятие как источник комплексного и продолжительного негативного воздействия на все компоненты природной среды, а сам производственный процесс — как сово-

купность различных технологических операций, все источники выбросов на разрезах можно также классифицировать по принадлежности их к той или иной производственной стадии, которая может либо формировать этот источник выбросов, либо интенсифицировать эмиссию загрязняющих веществ из него в соответствии с ГОСТ 17.2.1.04-77 «Охрана природы. Атмосфера. Источники и метеорологические факторы загрязнения, промышленные выбросы. Термины и определения».

Сегодня преобладающим способом разработки угольных разрезов в России и в мире является буровзрывная технология выемки угля, которая предполагает бурение сети взрывных скважин и осуществление массового взрыва обрабатываемого угольного блока. Такой способ обработки сопровождается значительным пылевыведением в процессе бурения взрывных скважин, в частности при удалении выбуренной породы сжатым воздухом, а сам процесс взрывания горной массы сопровождается образованием значительного по объему пылегазового облака, высота подъема которого может достигать нескольких сотен метров, а горизонтальное распространение — нескольких десятков километров. Составляющими пылегазового облака могут являться механические примеси, оксиды азота и угарный газ [7].

Массовые взрывы на разрезах являются источником наиболее интенсивных залповых выбросов загрязняющих веществ и вносят значительный вклад в загрязнение воздушного бассейна. Так, на долю взрывных работ может приходиться до 60% валового выброса указанных загрязняющих веществ от всей совокупности технологических операций при открытой добыче угля. Помимо основного, залпового выброса характерной особенностью выемки угля бу-

ровзрывным способом является вторичное выделение перечисленных газов из взорванной горной массы, которое может продолжаться до 10–15 ч, при этом газовыделение усиливается при выемочно-погрузочных операциях, а газы выделяются как из развала, так и из породы, находящейся в ковше экскаватора или кузове автосамосвала [8].

Ежегодно в мире с применением буровзрывных работ на разрезах отбивается около 10 млрд м³ горной массы с удельным расходом взрывчатых веществ (ВВ) 0,7–0,9 кг/м³, что составляет 7–9 млрд кг ВВ. При этом взрыв 1 кг ВВ сопровождается выделением до 1000 дм³ загрязняющих веществ, что соответствует 7000–9000 млрд дм³ загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу в результате проведения массовых взрывов при добыче угля открытым способом в год. Осаждение вредных веществ из пылегазового облака, образовавшегося после массовых взрывов, создает ощутимое отрицательное воздействие в радиусе 15–20 км от разреза, в том числе в жилых районах и на сельскохозяйственных угодьях [9].

При этом интенсивность негативного воздействия на атмосферный воздух зависит от множества факторов, основными из которых являются глубина расположения взрываемого блока относительно верхней бровки разреза, климатические параметры (осадки, скорость и направление ветра, температура, влажность воздуха), физико-химические характеристики взрываемой породы, тип взрывчатого вещества и применяемые технологические и инженерно-технические мероприятия (использование гидрозабойки, предварительное орошение взрываемого блока) [10].

Однако следует отметить, что взрывные работы на разрезах являются интенсивными источниками именно залповых выбросов, что обуславливается

их периодичностью и краткосрочностью прямого воздействия, поэтому, выполняя оценку состояния воздушного бассейна в период проведения массовых взрывов на разрезах, обязательно требуется учитывать все многообразие источников выброса газообразных и твердых загрязняющих веществ. Такой подход позволяет оценить вклад взрывных работ на разрезах в общее загрязнение атмосферного воздуха в результате ведения открытой добычи угля [11].

Методы

Экологическая опасность массовых взрывов при открытой разработке угольных месторождений определяется, в первую очередь, интенсивностью выброса загрязняющих веществ, которая формирует значения начальных приземных концентраций. Выполнить инструментальное измерение интенсивности выброса при массовых взрывах невозможно, поскольку нахождение людей и техники в зоне проведения взрывных работ запрещено правилами техники безопасности, а значения приземных концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе возможно определить инструментально только на границе безопасной зоны, которая может быть удалена от взрывающего блока на расстояние до 1 км.

Таким образом, вопрос оценки достоверности существующих расчетных методик и обоснование возможности их использования при прогнозировании степени негативного воздействия массовых взрывов на компоненты природной среды и детализации их вклада в общую нагрузку становится весьма актуальным, а корректировка действующих расчетных методик позволит осуществлять моделирование воздействия массовых взрывов в разрезах на окружающую среду с высокой достоверностью [12].

Оценка достоверности существующих расчетных методик для определения интенсивности выброса загрязняющих веществ при выполнении массовых взрывов на угольных разрезах осуществлялась на примере производственного объекта АО «УК «Кузбассразрезуголь» («Кедровский угольный разрез»).

Взрывные работы на угольном разрезе «Кедровский» проводятся с применением современных эмульсионных и бризантных взрывчатых веществ. Для снижения выбросов газообразных веществ и пылеподавления применяются гидрозабойка скважин, поливочные машины, а также рукав зарядный универсальный (РЗУ). Согласно проектной документации, применяемые средства пылеподавления позволяют снизить выбросы оксидов азота на 50%, пыли неорганической на 85%. После взрыва происходит остаточное газовыделение из взорванной горной массы. Продолжительность взрыва 2–3 с, а рассеивание загрязняющих веществ, образованных в результате взрыва, длится не более 20 мин.

Поскольку взрывные работы относятся к залповым выбросам загрязняющих веществ, для моделирования воздействия массового взрыва на атмосферный воздух в конкретный момент времени необходимо максимально точно определить интенсивность выброса загрязняющих веществ с учетом характеристик взрывающего блока в соответствии с проектом массового взрыва, его расположения относительно «дневной» поверхности, типов взрывчатых веществ и климатических характеристик, что, как уже упоминалось, возможно выполнить только на основании расчетных методик [13].

Согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 16.05.2016 № 422 для расчета объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный

воздух от стационарных источников могут быть использованы только методики, включенные в перечень Минприроды РФ. На 2024 г. в перечне представлены 123 методики, 20 из которых допущены для расчета выбросов при добыче полезных ископаемых: 7 методик применяются при добыче нефти и газа; 13 методик — при добыче твердых полезных ископаемых, 11 из них направлены на учет выбросов загрязняющих веществ, преимущественно образующихся при проведении взрывных работ — оксидов азота, оксида углерода, взвешенных веществ и, в ряде методик, иных соединений [14].

Рассмотренные применительно к условиям филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез» методики расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками, в том числе при проведении взрывных работ, соответствуют «Перечню методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками», утвержденным Минприроды РФ:

- «Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей)». — Люберцы, 1999 (далее — методика «Люберцы, 1999»);

- «Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов». — Новороссийск, 2001 (далее — методика «Новороссийск, 2001»);

- «Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при сжигании угля и технологических процессах горного производства на предприятиях угольной промышленности». — Пермь, 2003 (далее — методика «Пермь, 2014»);

- «Методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ при проведении взрывных работ в разрезах (карьерах)». — Пермь, 2019 (далее — методика «Кузбассразрезуголь, 2019»).

В методике «Люберцы, 1999» в расчетах применяются эмпирические данные о показателях удельного выделения монооксида углерода и оксидов азота по информации Минуглепрома СССР ВНИИОСуголь 1984 г. Интенсивность выбросов CO и NO_x рассчитывается исходя из количества взорванного вещества, эффективности применяемых средств пылегазоподавления, а также переводного коэффициента, зависящего от рассматриваемого поллютанта. При расчете массы твердых частиц (пыли) используется удельное пылевыведение из 1 м^3 горной массы в зависимости от крепости пород и рецептуры ВВ. Этой методикой, в отличие от других рассмотренных, учитывается поглощение вредных газов породой.

Методика «Новороссийск, 2001» предназначена для расчетов выделений (выбросов) загрязняющих веществ в атмосферу неорганизованными источниками предприятий промышленности строительных материалов. Она позволяет производить расчет интенсивности выброса вредных веществ в атмосферу от хранилищ пылящих материалов, на узлах их пересыпки, при перевалочных работах на складе, при бурении шурфов и скважин, взрывных и погрузочно-разгрузочных работах. При этом в части расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при взрывных работах подход идентичен методике «Люберцы, 1999».

В основу алгоритма и удельных показателей методики «Пермь, 2014» положены подходы и эмпирические значения удельного объема вредных газов и пыли, выделяемых при взрыве 1 т ВВ ,

учитывающие количество взорванного вещества и эффективность применяемых средств пылегазоподавления, идентичные используемым в методике «Люберцы 1999».

Методика «Кузбассразрезуголь, 2019» является переработанной методикой «Пермь, 2014» с внесением изменений в формулы раздела 5 «Взрывные работы». Переработка раздела «Взрывные работы» в методике «Кузбассразрезуголь, 2019» проводилась по заказу Акционерного общества «Угольная компания «Кузбассразрезуголь» (АО «УК «Кузбассразрезуголь») в связи с накопленными фактическими материалами измерения концентраций загрязняющих веществ (пыли, оксидов азота и оксида углерода) на границах санитарно-защитных зон и в других контрольных точках разрезов Кузбасса, а также в связи с применением новых технологических приемов и технических средств:

- одновременное взрывание нескольких типов взрывчатых веществ;
- новые конструкции скважинных зарядов;
- электронные системы взрывания (замедленный взрыв).

При разработке новых удельных величин выбросов загрязняющих веществ при проведении взрывных работ были использованы протоколы натуральных измерений предприятий Кузбасса, производящих добычу угля открытым способом с учетом новых технологий ведения взрывных работ, одновременного применения нескольких типов взрывчатых веществ при единичном массовом взрыве.

Таким образом, на основе проведенного анализа методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками, в том числе при проведении взрывных работ, при выполнении расчетов интенсивности выбросов в пред-

ставленной работе было принято решение опираться на методику «Кузбассразрезуголь, 2019». Кроме того, данная методика позволяет рассчитать высоту подъема пылегазового облака для условий филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Кедровский угольный разрез».

Результаты

При проведении взрывных работ загрязняющие вещества выбрасываются в атмосферу:

- в виде пылегазового облака;
- постепенного выделения газообразных загрязняющих веществ из взорванной горной массы [15].

Согласно методике «Кузбассразрезуголь, 2019», с пылегазовым облаком в атмосферу поступают пыль (взвешенные вещества), оксиды азота и оксид углерода.

Выбросы пыли (взвешенных веществ), поступающие в пылегазовое облако, зависят от коэффициента крепости взрываемой породы, марок и количества типов одновременно взрываемых взрывчатых веществ, применения новых технологических приемов и технических средств, использования электронной системы взрывания и глубины взрыва.

Выбросы газообразных загрязняющих веществ (оксидов азота и оксида углерода), поступающих в пылегазовое облако, зависят от марок и количества типов одновременно взрываемых взрывчатых веществ и применяемых способов и средств пылегазоподавления (только для оксидов азота) [16].

Из взорванной горной массы в атмосферу постепенно выделяются оксиды азота и оксид углерода.

Выбросы газообразных загрязняющих веществ из взорванной горной массы зависят от марок и количества типов одновременно взрываемых взрывчатых веществ и применяемых способов и средств пылегазоподавления (только для

Таблица 1

Характеристики взрывааемых блоков, для которых производился расчет
Characteristics of the blasted blocks for which the calculation was performed

Параметр	Номер блока	Блок 243	Блок 248
Горизонт, м		-20	+175
Крепость пород		10	9
Объем взрывааемого массива, м ³		98 000	440 000
Средняя глубина скважин, м		8,52	16,36
Расход взрывчатого вещества, т		88 360,8	161 159,2
В том числе:			
РПГМ-100, т		88 000	160 800
Нитронит П марка С-60-0.8, т		360,8	359,2
Удельный расход взрывчатого вещества, кг/м ³		0,902	0,366

оксидов азота), в соответствии с Постановлением Правительства от 16 мая 2016 г. № 422 «Об утверждении правил разработки и утверждения методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками».

Для оценки количества загрязняющих веществ, попадающих в атмосферный воздух при проведении взрывных работ, был выполнен расчет интенсивности выбросов на примере двух взрывааемых блоков – Блок 243 и Блок 248. Характеристики блоков, для которых производился расчет, представлены в табл. 1.

В соответствии с методикой «Кузбассразрезуголь, 2019» количества загрязняющих веществ, выбрасываемых при взрыве, приведенные к 20-минутному интервалу осреднения, рассчитываются по следующим формулам:

- для газов ($M_{n_{\max}}^{g3}$):

$$M_{n_{\max}}^{g3} = \frac{\sum_{j=1}^m (q_{ij}^0 \times A_j)}{1200} \times (1 - \eta) \times 10^6, \text{ г/с}$$

- для пыли ($M_{n_{\max}}^{p3}$):

$$M_{n_{\max}}^{p3} = 0,16 \times \frac{\sum_{j=1}^m q_{nj} \times A_j \times V_{2M}}{\sum_{j=1}^m A_j \times 1200} \times (1 - \eta) \times 10^3, \text{ г/с}$$

где i – наименование загрязняющего вещества; j – тип взрывчатого вещества; m – количество типов взрывчатых веществ, взорванных за 1 массовый взрыв; q_{ij}^0 – удельное содержание i -го загрязняющего вещества в пылегазовом облаке, т/т (см. табл. 2); q_{nj} – удельное пылевыделение j -го взрывчатого вещества на 1 м³ взорванной горной массы, кг/м³ (см. табл. 3); A_j – количество взорванного j -го взрывчатого вещества за 1 массовый взрыв, т; V_{2M} – объем взорванной горной массы за 1 массовый взрыв, м³; η – эффективность применяемых при взрыве средств газопылеподавления, д.ед. (см. табл. 4).

Таблица 2

Удельное содержание газообразных загрязняющих веществ в пылегазовом облаке и взорванной горной массе (q_{ij}^0), т/т [8]

Specific content of gaseous pollutants in the dust and gas cloud and blasted rock mass (q_{ij}^0), t/t [8]

Характеристика взрыва	Тип взрывчатого вещества							
	бризантные				эмульсионные			
	пылегазовое облако q_{ij}^0		взорванная горная масса $q_{ij}^{гм}$		пылегазовое облако q_{ij}^0		взорванная горная масса $q_{ij}^{гм}$	
	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x	CO	NO _x	CO
Высотный взрыв (высота взрыва выше на 5 м и более борта разреза)	0,0036	0,007	0,0013	0,002	0,0009	0,003	0,0005	0,0015
Глубокий взрыв (высота взрыва ниже уровня борта разреза)	0,002	0,007	0,0003	0,002	0,0005	0,003	0,0003	0,0015

Таблица 3

Удельные величины выбросов пыли (взвешенных веществ), поступающих в пылегазовое облако (q_{pi}), кг/м³ [8]

Specific values of dust emissions (suspended substances) entering the dust and gas cloud (q_{pi}), kg/m³ [8]

Тип взрывчатого вещества	Коэффициент крепости породы по шкале проф. Протождьяконова, f				
	2–4	5–7	8–10	11	12–14 и выше
Для высотных взрывов (высота взрыва выше на 5 м и более уровня борта разреза)					
Бризантные (гранулит)	0,006	0,012	0,048	0,053	0,046
Эмульсионные (сибирит, нитронит)	0,003	0,009	0,019	0,023	0,018
Для глубоких взрывов (высота взрыва ниже уровня борта разреза)					
Бризантные (гранулит)	0,004	0,013	0,035	0,039	0,034
Эмульсионные (сибирит, нитронит)	0,002	0,004	0,014	0,017	0,013

Таблица 4

Эффективность средств пылеподавления при взрывах (η), д.ед. [8]

Efficiency of dust suppression means during explosions (η), fractional units [8]

Средства пылеподавления	η
Гидрозабойка скважин	0,55 – 0,60
Поливочные машины, оросительно-вентиляционные установки	0,85 – 0,90

Суммарные выбросы оксидов азота разделяются на диоксид азота ($M_{NO_2}^B$) и оксид азота (M_{NO}^B) по формулам

$$M_{NO_2}^B = 0,8 \times M_{NOx}^B, \text{ г/с}$$

$$M_{NO}^B = 0,13 \times M_{NOx}^B, \text{ г/с}$$

В соответствии с методикой «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утвержденной приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273, при проведении расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмо-

сферном воздухе для взрывных работ выделяют два вида взрывов: глубокий и высотный.

Глубокий взрыв — это взрыв внутри разреза, когда пылегазовое облако не поднимается над бортом разреза и высота взрыва (разность между высотой подъема пылегазового облака и глубиной проведения взрыва) меньше нуля, тогда высота взрыва принимается равной 2 м.

Высотный взрыв — взрыв внутри разреза, когда пылегазовое облако поднимается над бортом разреза и высота взрыва (разность между высотой подъема пылегазового облака и глубиной проведения взрыва) более 0, тогда высота взрыва принимается равной фактической высоте выброса (над бортом разреза).

Чтобы оценить характеристику взрыва для каждого из взрываемых блоков (высотный или глубокий), необходимо оценить высоту подъема пылегазового облака (H) и высоту взрыва (H_o^{B3}), которые определяются по следующим формулам:

$$H = b \times \left(164 + 0,258 \times \sum_{j=1}^m A_j \right), \text{ м}$$

$$H_o^{B3} = H - H_y, \text{ м}$$

где b — безразмерный коэффициент, учитывающий глубину скважин (при глубине до 15 м $b = 1$, при более глубоких скважинах $b = 0,8$); A_j — количество взорванного j -го взрывчатого вещества за один массовый взрыв, т; H — высота подъема пылегазового облака, м; H_y — уровень места взрыва (глубина) — высота до борта разреза, м.

В соответствии с рекомендациями раздела 3.2.2, п. 17 Методического пособия по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (НИИ Атмосфера, 2012 г.) за высоту выброса принимается разность между высотой подъема

пылегазового облака (H) и уровнем места взрыва (H_y).

Ход расчета для Блока 243:

$$H = 1 \times (164 + 0,258 \times 88,3608) = 186,80 \text{ м}$$

$$H_o^{B3} = 186,8 - 240 = -53,20 \text{ м}$$

Исходя из того, что $H_o^{B3} < 0$, взрыв данного блока характеризуется как глубокий.

$$M_{n_{\max}}^{B3}(\text{NO}_x) = \frac{(88 \times 0,0005) + (0,3608 \times 0,002)}{1200} \times (1 - 0,5) \times 10^6 = 18,63 \text{ г/с}$$

Эффективность применяемых средств газоподавления по NO_x при проведении взрыва Блока 243 принята равной 0,5 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

$$M_{\text{NO}_2}^B = 0,8 \times 18,63 = 14,91 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{NO}}^B = 0,13 \times 18,63 = 2,42 \text{ г/с}$$

$$M_{n_{\max}}^{B3}(\text{CO}) = \frac{(88 \times 0,003) + (0,3608 \times 0,007)}{1200} \times 10^6 = 222,10 \text{ г/с}$$

Эффективность применяемых средств газоподавления по CO при проведении взрыва Блока 243 принята равной 0 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

$$M_{n_{\max}}^{B3}(\text{пыль}) = 0,16 \times \left(\frac{0,014 \times 88 \times 98000}{(88 + 0,3608) \times 1200} + \frac{0,035 \times 0,3608 \times 98000}{(88 + 0,3608) \times 1200} \right) \times (1 - 0,85) \times 10^3 = 27,61 \text{ г/с}$$

Таблица 5

Интенсивность выбросов при взрывании Блока 243 и Блока 248
Emission rates during blasting of Block 243 and Block 248

Интенсивность выброса веществ, г/с	NO _x	NO ₂	NO	CO	Пыль (взвешенные вещества)
Блок 243	18,63	14,91	2,42	222,1	27,61
Блок 248	60,84	48,67	7,91	404,1	167,77

Эффективность применяемых средств пылеподавления при проведении взрыва Блока 243 принята равной 0,85 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Ход расчета для Блока 248:

$$H = 0,8 \times (164 + 0,258 \times 88,3608) = 164,46 \text{ м}$$

$$H_0^{\text{вз}} = 164,5 - 45 = 119,46 \text{ м}$$

Исходя из того, что $H_0^{\text{вз}} > 0$, взрыв данного блока характеризуется как высотный.

$$M_{n_{\text{max}}}^{\text{вз}} (\text{NO}_x) = \frac{(160,8 \times 0,0009) + (0,3592 \times 0,0036)}{1200} \times (1 - 0,5) \times 10^6 = 60,84 \text{ г/с}$$

Эффективность применяемых средств газоподавления по NO_x при проведении взрыва Блока 248 принята равной 0,5 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

$$M_{\text{NO}_2}^{\text{в}} = 0,8 \times 60,84 = 48,67 \text{ г/с}$$

$$M_{\text{NO}}^{\text{в}} = 0,13 \times 60,84 = 7,91 \text{ г/с}$$

$$M_{n_{\text{max}}}^{\text{вз}} (\text{CO}) = \frac{(160,8 \times 0,0003) + (0,3592 \times 0,0007)}{1200} \times 10^6 = 404,10 \text{ г/с}$$

Эффективность применяемых средств газоподавления по CO при проведении

взрыва Блока 248 принята равной 0 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

$$M_{n_{\text{max}}}^{\text{вз}} (\text{пыль}) = 0,16 \times \left(\frac{0,019 \times 160,8 \times 440000}{(160,8 + 0,3592) \times 1200} + \frac{0,048 \times 0,3592 \times 440000}{(160,8 + 0,3592) \times 1200} \right) \times (1 - 0,85) \times 10^3 = 167,77 \text{ г/с}$$

Эффективность применяемых средств пылеподавления при проведении взрыва Блока 248 принята равной 0,85 в соответствии с проектной документацией АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Результаты расчета интенсивности выбросов при взрывании Блока 243 (глубокий, $H_0^{\text{вз}} = -53,2$ м) и Блока 248 (высотный, $H_0^{\text{вз}} = 119,46$ м) приведены в табл. 5.

Обсуждение результатов

На основании результатов проведенных расчетов интенсивности выбросов загрязняющих веществ в программе УПРЗА «Эколог» был выполнен расчет рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере в соответствии с методикой «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утвержденной приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273, с учетом скорости ветра и коэффициента рельефа местно-

сти. Пример расчета рассеивания оксида углерода в приземном слое атмосферы для высотного и глубокого взрывов приведен на рис. 1, 2. При этом для высотного взрыва источник выброса задавался как неорганизованный источник, равный площади взрывного блока, а его высота — рассчитанная высота подъема пылегазового облака, а для глубокого

взрыва высота источника принималась 2 м от поверхности, а источник выброса задавался как площадной источник, площадь которого соответствует площади поверхности карьера на указанном уровне. Все расчеты производились с учетом фоновых значений [17 – 19].

Полученные в результате расчета рассеивания загрязняющих веществ в ат-

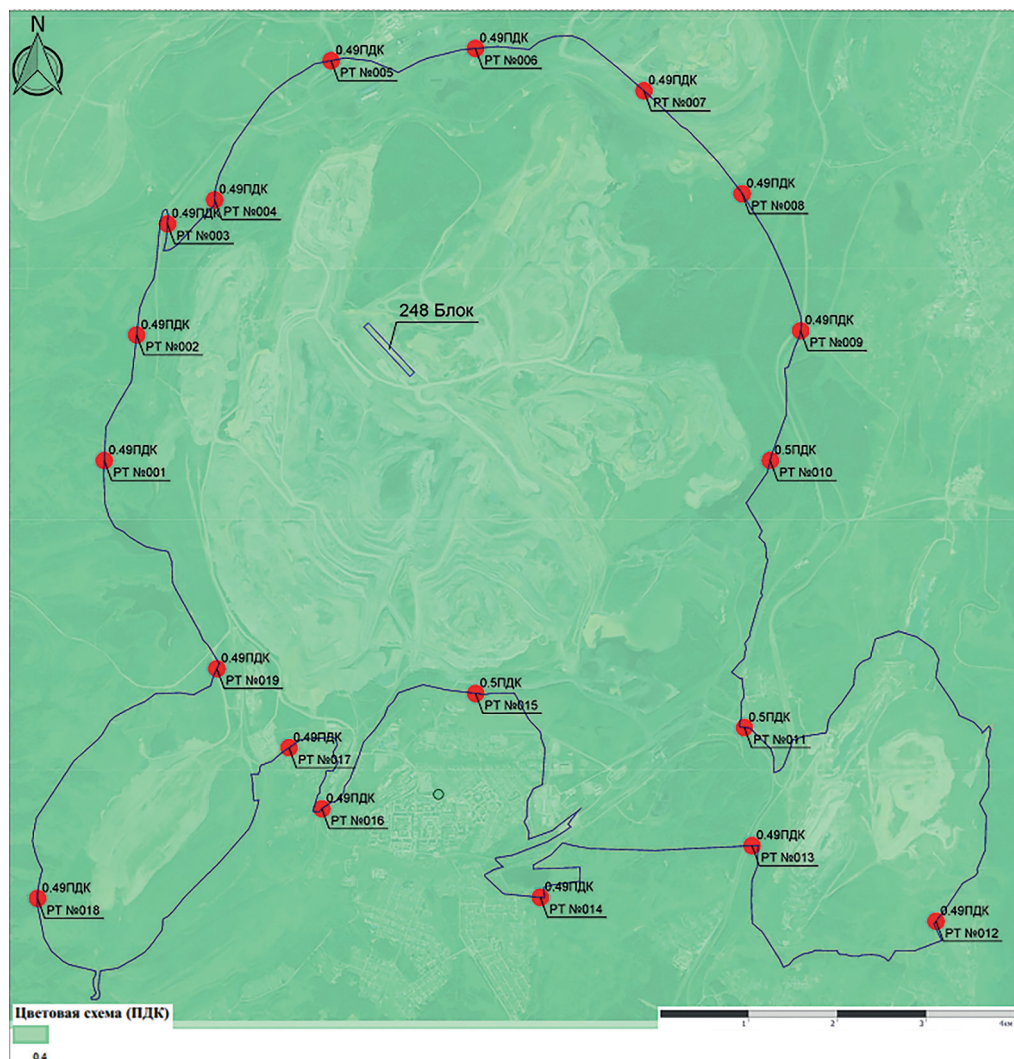


Рис. 1. Результаты расчета рассеивания угарного газа (СО) в приземном слое атмосферы при взрыве Блока 248 (высотный взрыв) в программе УПРЗА «Эколог»

Fig. 1. Results of calculating the dispersion of carbon monoxide (CO) in the ground layer of the atmosphere during the explosion of Block 248 (high explosion) in the UPRZA «Ecolog» program

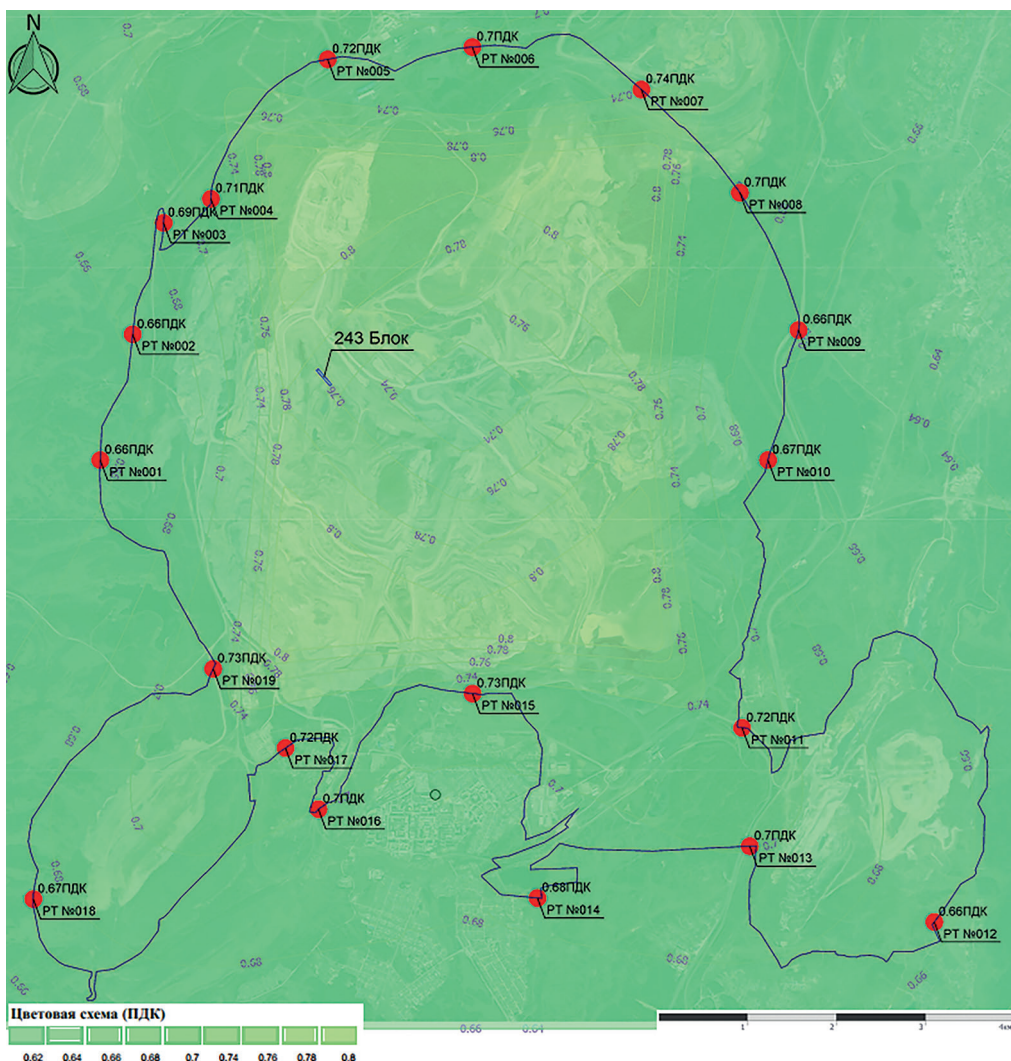


Рис. 2. Результаты расчета рассеивания угарного газа (CO) в приземном слое атмосферы при взрыве Блока 243 (глубокий взрыв) в программе УПРЗА «Эколог»

Fig. 2. Results of calculating the dispersion of carbon monoxide (CO) in the surface layer of the atmosphere during the explosion of Block 243 (deep explosion) in the UPRZA «Ecolog» program

мосфере значения были сопоставлены с результатами натуральных наблюдений, выполненными на территории разреза «Кедровский» в зимний период, что позволило верифицировать результаты выполненных расчетов по вышеуказанным методикам с целью разработки предложений по совершенствованию нормативно-технической базы при оценке ин-

тенсивности выбросов загрязняющих веществ при проведении массовых взрывов на разрезах расчетными методами [20].

Сопоставление результатов рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, полученное в программе УПРЗА «Эколог», и результатов натуральных наблюдений показали, что для

высотного взрыва (Блок 248) результаты приземной концентрации в точках наблюдения коррелируют с расчетными значениями, в то время как для глубокого взрыва (Блок 243) результаты приземной концентрации в точках наблюдения и расчетные значения в определенной степени различаются [21].

Заключение

Таким образом, проведенный в рамках исследований анализ научно-технической и научно-методической литературы, выполненные расчеты и сопоставление их с данными натурных наблюдений выявили ряд недостатков и упрощений в действующих расчетных методиках, которые не в полном объеме позволяют оценить техногенное воздействие от массовых взрывов.

Так, в отношении пылегазового воздействия стоит отметить, что буровзрывные работы являются серьезным, но не единственным источником пылегазовых выделений при открытой угледобыче. Образование пыли и газа сопровождает весь цикл горных работ, это обстоятельство необходимо учитывать при определении уровня загрязнения от буровзрывных работ.

Применение нормативных методик рассеивания выбросов в атмосферу от взрывных работ показало, что для высотных взрывов имеет значение задание параметров скорости ветра и безразмерного коэффициента рельефа местности, а для глубоких взрывов эти параметры

не оказывают влияния на результаты рассеивания. Таким образом, подход к расчетам для глубоких взрывов, заложенный в методиках, должен быть скорректирован для получения достоверных результатов.


В целом результаты научной работы показали, что накопленный значительный отечественный и мировой опыт в области рассмотрения процессов распространения пылегазового облака, результаты натурных наблюдений при производстве массовых взрывов на разрезах АО «УК «Кузбассразрезголь» в совокупности с выполненными расчетами и моделированием распространения загрязняющих веществ на примере разреза «Кедровский» Кемеровской области — Кузбасса могут служить основой для разработки рекомендаций по корректировке существующих расчетных методик оценки интенсивности выброса загрязняющих веществ при проведении массовых взрывов. Однако чтобы оценить вклад взрывных работ на разрезах в общее загрязнение атмосферного воздуха с целью верификации разработанных рекомендаций для корректировки расчетных методик, необходимо проведение долгосрочных инструментальных измерений в натурных условиях, что может обеспечиваться разработкой и внедрением системы удаленного мониторинга негативного воздействия буровзрывных работ на население и окружающую среду на основе цифровой платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Olayemi M. S., Movlyanov A., Olajide O. O.* The relationship between energy and development in developing countries: A statistical perspective on volatility dynamics // *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2025, vol. 15, no. 4, pp. 1194–1208. DOI: 10.17714/gumusfenbil.1753096.

2. *Петренко И. Е.* Итоги работы угольной промышленности России за январь — март 2024 года // *Уголь*. — 2024. — № 6. — С. 5–13.

3. *Харионовский А. А., Литвинов А. Р., Данилова М. Ю., Махмуд Т.* Оценка влияния на окружающую среду открытого и подземного способов добычи угля // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. — 2016. — № 4. — С. 113–118.

4. Радионова Е. А., Якунина Ю. С. Влияние интенсивной угледобычи на качество жизни населения // Уголь. — 2025. — № 2. — С. 130–135.
5. Пашкевич М. А., Патокин Д. А., Данилов А. С. Утилизация нитроцеллюлозосодержащих отходов химической промышленности с получением минеральных почвенных добавок // Экология и промышленность России. — 2024. — Т. 28. — № 6. — С. 10–17. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.
6. Korelskiy D., Mentsiev A., Dengaev A., Novikova A., Babyr N. Land assessment in mining regions considering ecology // IJE Transactions B: Applications. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2344–2353. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.11B.19.
7. Trechera P., Moreno T., Córdoba P., Moreno N., Zhuang X., Li B., Querol X. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China // International Journal of Coal Geology. 2021, vol. 235, article 103677. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103677.
8. Илюхин Д. А., Маринин М. А., Рахманов Р. А. Исследование параметров развала взорванной горной массы фотограмметрическим методом съемки // Горный журнал. — 2023. — № 9. — С. 12–21. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
9. Ушаков К. З., Михайлов В. А. Аэрология карьеров. — М.: Недра, 1985. — 272 с.
10. Rojano R. E., Manzano C. A., Toro R. A., Morales R. G., Restrepo G., Leiva M. A. Potential local and regional impacts of particulate matter emitted from one of the world's largest open-pit coal mines // Air Quality, Atmosphere & Health. 2018, vol. 11, pp. 601–610.
11. Петрова Т. А., Епишина А. Д. Анतिकоррозионная защита трубопроводного транспорта на горно-перерабатывающих предприятиях // Обогащение руд. — 2023. — № 6. — С. 52–58. DOI: 10.17580/or.2023.06.09.
12. Карабаев С. О., Харченко А. В., Гайнуллина И. П., Кудрявцева В. А., Шигаева Т. Д. Природные углеродные матрицы на основе бурого угля, выделенных из него гуминовых кислот и гумина для очистки водных растворов от низкомолекулярных органических примесей // Записки Горного института. — 2024. — Т. 267. — С. 402–412.
13. Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z. Analyzing characteristics of particulate matter pollution in open-pit coal mines: Implications for Green Mining // Energies. 2025, vol. 14, no. 9, article 2680. DOI: 10.3390/en14092680.
14. Оводков М. В., Мензелинцева Н. В., Азарова М. Д., Закондырин А. Е., Петров В. О. Актуальные вопросы разработки и верификации методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, серия Строительство и архитектура. — 2025. — № 4(101). — С. 200–215. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_200.
15. Пашкевич М. А., Евдокимова М. Е. Тонкодисперсные отходы титанового производства как добавка для изготовления строительных материалов // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 2. — С. 19–23. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-19-23.
16. Du C., Wang J., Wang Y. Study on environmental pollution caused by dumping operation in open pit mine under different factors // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2022, no. 226, article 105044. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105044.
17. Кондратьев С. А., Хамзина Т. А. Повышение качества концентрата во флотационном обогащении низкосортного угля // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 65–77.
18. Wanjun T. A. N. G., Qingxiang C. A. I. Dust distribution in open-pit mines based on monitoring data and fluent simulation // Environmental Monitoring and Assessment. 2018, vol. 190, no. 11, article 632.
19. Джевага Н. В., Лобачева О. Л. Гранулирование мартеновских шлаков в условиях снижения техногенной нагрузки на окружающую среду // Черные металлы. — 2024. — № 2. — С. 78–82. DOI: 10.17580/chm.2024.02.13.
20. Murzin M. A., Gorlenko N. V. Pollutant emission from fires at open-pit coal mines // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 808, no. 1, article 012022.
21. Ivanov A. V., Smirnov Y. D., Lisay V. V., Borowski G. Issues of the impact of granulated sulfur transportation on the environmental components // Journal of Ecological Engineering. 2023, vol. 24, no. 6, pp. 86–97. DOI: 10.12911/22998993/162558. 

REFERENCES

1. Olayemi M. S., Movlyanov A., Olajide O. O. The relationship between energy and development in developing countries: A statistical perspective on volatility dynamics. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2025, vol. 15, no. 4, pp. 1194–1208. DOI: 10.17714/gumusfenbil.1753096.
2. Petrenko I. E. Results of the Russian coal industry for January – March 2024. *Ugol'*. 2024, no. 6, pp. 5–13. [In Russ].
3. Kharionovskiy A. A., Litvinov A. R., Danilova M. Yu., Makhmud T. Assessment of the environmental impact of open-pit and underground coal mining. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2016, no. 4, pp. 113–118. [In Russ].
4. Radionova E. A., Yakunina Yu. S. The impact of intensive coal mining on the quality of life of the population. *Ugol'*. 2025, no. 2, pp. 130–135. [In Russ].
5. Pashkevich M. A., Patokin D. A., Danilov A. S. Utilization of nitrocellulose-containing waste from the chemical industry to produce mineral soil additives. *Ecology and Industry of Russia*. 2024, vol. 28, no. 6, pp. 10–17. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2024-6-10-17.
6. Korelskiy D., Mentsiev A., Dengaev A., Novikova A., Babyr N. Land assessment in mining regions considering ecology. *IJE Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2344–2353. DOI: 10.5829/IJE.2024.37.11B.19.
7. Trechera P., Moreno T., Córdoba P., Moreno N., Zhuang X., Li B., Querol X. Comprehensive evaluation of potential coal mine dust emissions in an open-pit coal mine in Northwest China. *International Journal of Coal Geology*. 2021, vol. 235, article 103677. DOI: 10.1016/j.coal.2021.103677.
8. Ilyukhin D. A., Marinin M. A., Rakhmanov R. A. Study of the collapse parameters of blasted rock mass using the photogrammetric survey method. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 9, pp. 12–21. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.02.
9. Ushakov K. Z., Mikhaylov V. A. *Aerologiya kar'erov* [Quarry aerology], Moscow, Nedra, 1985, 272 p.
10. Rojano R. E., Manzano C. A., Toro R. A., Morales R. G., Restrepo G., Leiva M. A. Potential local and regional impacts of particulate matter emitted from one of the world's largest open-pit coal mines. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2018, vol. 11, pp. 601–610.
11. Petrova T. A., Epishina A. D. Anti-corrosion protection of pipeline transport at mining and processing enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2023, no. 6, pp. 52–58. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2023.06.09.
12. Karabaev S. O., Kharchenko A. V., Gainullina I. P., Kudryavtseva V. A., Shigaeva T. D. Natural carbon matrices based on brown coal, humic acids and humin isolated from it for purifying aqueous solutions from low-molecular organic impurities. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 267, pp. 402–412. [In Russ].
13. Luo H., Zhou W., Jiskani I. M., Wang Z. Analyzing characteristics of particulate matter pollution in open-pit coal mines: Implications for Green Mining. *Energies*. 2025, vol. 14, no. 9, article 2680. DOI: 10.3390/en14092680.
14. Ovodkov M. V., Menzelintseva N. V., Azarova M. D., Zakondyryn A. E., Petrov V. O. Actual issues of development and verification of methods for calculating pollutant emissions into the atmospheric air from stationary sources. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2025, no. 4(101), pp. 200–215. [In Russ]. DOI: 10.35211/18154360_2025_4_200.
15. Pashkevich M. A., Evdokimova M. E. Finely dispersed waste from titanium production as an additive for the manufacture of building materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 2, pp. 19–23. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-19-23.
16. Du C., Wang J., Wang Y. Study on environmental pollution caused by dumping operation in open pit mine under different factors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2022, no. 226, article 105044. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105044.
17. Kondratyev S. A., Khamzina T. A. Improving the quality of concentrate in flotation enrichment of low-grade coal. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 265, pp. 65–77. [In Russ].
18. Wanjun T. A. N. G., Qingxiang C. A. I. Dust distribution in open-pit mines based on monitoring data and fluent simulation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018, vol. 190, no. 11, article 632.
19. Dzhevaga N. V., Lobacheva O. L. Granulation of open-hearth slags in conditions of reducing technogenic load on the environment. *Chernye Metally*. 2024, no. 2, pp. 78–82. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2024.02.13.

20. Murzin M. A., Gorlenko N. V. Pollutant emission from fires at open-pit coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 808, no. 1, article 012022.

21. Ivanov A. V., Smirnov Y. D., Lisay V. V., Borowski G. Issues of the impact of granulated sulfur transportation on the environmental components. *Journal of Ecological Engineering*. 2023, vol. 24, no. 6, pp. 86 – 97. DOI: 10.12911/22998993/162558.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стриженок Алексей Владимирович¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4792-430X,

Петрова Татьяна Анатольевна¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Petrova_TA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5914-6395,

Пронин Виктор Викторович – первый заместитель
генерального директора, ООО «КРУ-Взрывпром»,
e-mail: pronin@kruvp.kru.ru,

Шмонин Иван Викторович – заместитель
технического директора по БВР,
АО «УК «Кузбассразрезуголь», e-mail: shmonin@kru.ru,

Безрученко Павел Антонович¹ – аспирант,
e-mail: minsk_kulman1@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2254-1923,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Стриженок А.В., e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Strizhenok¹, Ph.D, Associate Professor,
e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4792-430X,

T.A. Petrova¹, Ph.D, Associate Professor,
e-mail: Petrova_TA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5914-6395,

V.V. Pronin, First Deputy General Director,
ООО «КРУ-Vzryvprom», 650054, Kemerovo, Russia,
e-mail: pronin@kruvp.kru.ru,

I.V. Shmonin, Deputy Technical Director for BVR,
JSC «УК «Kuzbassrazrezugol»,
650054, Kemerovo, Russia, e-mail: shmonin@kru.ru,

P.A. Bezruchenko¹, Graduate Student,
e-mail: minsk_kulman1@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0007-2254-1923,

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.

Corresponding author: A.V. Strizhenok, e-mail: Strizhenok_AV@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 18.12.2025; получена после рецензии 12.01.2026; принята к печати 19.01.2026.

Received by the editors 18.12.2025; received after the review 12.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.

