

УДК 622.272:504.3.054

**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ГАУССОВОЙ МОДЕЛИ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ
НА ПРИМЕРЕ ШАХТЫ “ЋUKARU PEKI”, СЕРБИЯ**

В. П. Улникович¹, А. Костов², Н. Сталетович¹, П. Маркович³, Н. Тукович⁴

¹Университет “Юнион – Никола Тесла”,

E-mail: nomstale@mts.rs, ул. Царя Душана, 62–64, 11000, г. Белград, Сербия

²Горно-металлургический институт в г. Бор,

E-mail: ana.kostov@irmbor.co.rs, ул. Зеленый Бульвар, 35, 19210, г. Бор, Сербия

³Закрытая компания с ограниченной ответственностью “Rakita Exploration”,

E-mail: petarmarkovic79@gmail.com, ул. Сувая, 185А, 19210, г. Бор, Сербия

⁴Компания “Jugoinspekt A. D.”,

E-mail: ntucovic@gmail.com, ул. Чика-Любина, 8/V, 11000, г. Белград, Сербия

Рассмотрены выбросы пыли при подготовительных горных работах, проводимых в рамках открытия шахты “Ћukaru Peki” (Сербия). Изучена интенсивность совокупного осаждения пыли, подтверждающая практическую применимость предлагаемой методологии. Анализ полученных данных позволил спрогнозировать уровень осаждения мелкодисперсных веществ из атмосферы. Выполнена оценка применимости гауссовой модели прогнозирования пылевого воздействия при подготовительных горных работах.

Осаждение пыли, мелкодисперсные вещества, гауссова модель, мониторинг, прогнозирование

DOI: 10.15372/FTPRPI20220516

Защита окружающей среды — важная составляющая устойчивого развития отраслей народного хозяйства. Считается, что отрасли промышленности, такие как горнодобывающая, строительная и транспортная, негативно влияют на атмосферу, водоемы и почву. Мониторинг воздействия этих отраслей промышленности на состояние окружающей среды является ключевым фактором предотвращения или снижения негативных последствий. С учетом потенциального экологического воздействия на ранней стадии эксплуатации горнопромышленного объекта и наряду с требованиями компетентных институтов и нормативной документации, становится очевидным, что меры по защите окружающей среды должны быть соблюдены в наиболее возможном объеме.

Основным источником загрязнения окружающей среды является пыль. Она представляет собой совокупные взвешенные мелкодисперсные вещества (TSP), состоящие из частиц диаметром более 10 мкм, которые под собственным весом осаждаются из атмосферы на различные поверхности (грунт, растительность, вода, здания и т. д.). Ниже приведены предельные допустимые значения интенсивности TSP-осаждений в соответствии с текущими национальными требованиями, т. е. с нормами качества воздуха [1]: 1 мес — 450, 1 год — 200 мг/м²/сут.

Дисперсионная модель обеспечивает инструментальную возможность для расчета уровня пыли в конкретной области с учетом информации о выбросах и атмосферных условиях. Понимание промышленного процесса и фактические измерения являются ключевыми факторами оценки количества попавших в атмосферу загрязнителей. Для оценки соответствия выбросов предельным значениям качества воздуха необходимо определить концентрацию пыли в нижних слоях атмосферы на различных расстояниях от источника загрязнения. Как только загрязнитель от техногенных или природных источников попадает в нижний пограничный атмосферный слой, он распространяется по направлению ветра. Распространение пыли обусловлено хаотическим движением воздушных масс. Разница температур пылевых частиц и окружающего воздуха, вертикальная скорость на выходе из источника и физические характеристики заставляют загрязнитель двигаться вертикально или за счет ветра наклонно по отношению к эффективной высоте источника. Помимо указанных причин, на концентрацию загрязнителей в атмосфере влияют сухое или влажное осаждение, повторное пыление с поверхности земли под действием ветра, а также их физические и химические свойства.

Моделирование атмосферной дисперсии загрязнителей воздуха является одной из наиболее сложных научных задач. Цель моделирования — оценить концентрацию загрязняющих веществ, например частиц грунта, в определенном месте и в определенное время. Движение их в атмосфере осуществляется в основном благодаря адвекции. На дисперсию загрязнителя могут также существенно влиять другие явления, такие как турбулентность, химические реакции, радиоактивный распад и осаждение. Важной составляющей моделирования дисперсии загрязнителей воздуха является анализ продолжительности химических реакций и расстояние, которое частицы способны преодолеть за свой жизненный цикл. Если жизненный цикл частиц исчисляется минутами или часами (радиоактивные частицы или аэрозоли), то область их дисперсии находится в малом диапазоне, поэтому влияние на окружающую среду локально ориентировано.

Для быстрого получения результатов о пространственно-временной изменчивости загрязнения воздуха на уровне земли при минимальных затратах широко применяются приближенные методы, основанные на компактных математических моделях гауссова типа. Данные модели используются в условиях ограниченности входных метеорологических данных [2]. Цель настоящей работы — проверка практической применимости модели гауссова типа для прогнозирования влияния подготовительных земляных работ на загрязнение воздуха, включающих специальные операции при открытии шахты “Čukaru Peki”, расположенной вблизи г. Бор (Сербия).

Пылевое воздействие способно серьезно влиять на здоровье населения, проживающего рядом с горнодобывающими предприятиями, особенно если оно осложняется ветреной погодой, низкой влажностью и скудной растительностью [3]. Современный метод контроля над пылевыми выбросами при ведении горных работ, связанных с извлечением грунта и возведением отвалов, учитывает тип источника загрязнения. Используются инновационные подходы, содержащие эффективные меры по снижению уровня выбросов до значений ниже предельных [4, 5]. Выявление, анализ и контроль пылевого воздействия являются частью комплексного процесса оценки и управления, включающего множество действий [4].

Совокупные взвешенные вещества образуются в атмосфере из природных [4–8]. Обычно взвешенные вещества содержат тяжелые металлы, распространяются в воздушной или водной среде и относятся к классу загрязнителей с крайне высоким негативным влиянием на биосферу. Большое количество пыли с высоким содержанием тяжелых металлов выбрасывается в атмосферу в результате деятельности горнодобывающих предприятий: выемки, дробления, измельчения, очистки породы и переплавки руды [9]. Взвешенные в воздухе вещества, содержащие тяжелые металлы, воздействуют на человека пероральным или ингаляционным образом, а также через кожный контакт [10]. Негативное влияние тяжелых металлов на здоровье человека хорошо изучено [11–13]. Продолжительное воздействие повышенных концентраций токсичных металлов и металлоидов (полуметаллов) в виде взвешенных частиц подвергает человеческое здоровье серьезному риску [14–17], приводя к респираторным и сердечно-сосудистым заболеваниям, а также к росту смертности среди населения [18–22].

Мониторинг воздуха в Сербии, использующий автоматизированные системы отсчета и эквивалентные методы, внедрен в эксплуатацию согласно стандарту Программы по контролю за качеством воздуха в государственной сети и Положению об условиях мониторинга и требованиях к качеству воздуха [23].

РАССМАТРИВАЕМАЯ ОБЛАСТЬ

Город Бор расположен на востоке Сербии, недалеко от границ с Румынией и Болгарией, в бассейне р. Тимок. Он известен благодаря работе горно-металлургических предприятий, начавших свою деятельность в 1903 г.

Интенсивная вулканическая активность в недавнем прошлом, а также серьезные тектонические сдвигения сформировали рельеф Тимокского магматического комплекса [24]. В научной литературе, посвященной вопросам горного дела, эта область известна как Тимокская вулканическая область [24, 25]. Большая часть окрестных территорий относится к южным Карпатам и имеет холмистый и гористый рельеф. На западе рассматриваемой области расположена гора Черный Пик (1027 м), на севере — гора Стол (1156 м), на северо-востоке — гора Дели Йован (1138 м). С морфологической точки зрения данную область можно считать гористой со средней высотой 500 м. Она состоит из средне- и высокогорных ландшафтов с высотами от 300 м (основание деревни Метовница) до более 400 м (Топовске Шупе).

Город Бор находится в умеренных широтах северного полушария. Бассейн р. Тимок, в котором он расположен, окружен горными хребтами с западной, южной и юго-восточной сторон, а с восточной стороны открыт Нижнедунайской низменности. Таким образом, климат на данной территории испытывает влияние воздушных масс, движущихся с востока. На большей части Сербии основное воздействие оказывают воздушные поля низкого давления (циклоны), движущиеся со стороны Западной Европы и Средиземноморья, тогда как Восточная Сербия находится под господствующим влиянием воздушных полей высокого давления (антициклонов), распространяющихся со стороны Восточно-Европейских равнин. Воздушные массы, движимые ветром с востока на запад, преодолевают горы и на другой стороне становятся теплее (на той же высоте), создавая так называемый “эффект фена” [24].

В отличие от остального бассейна р. Тимок, где летние месяцы засушливы и характеризуются высокими температурами, горный хребет Хомолье является областью обильного выпадения осадков в летний период. В результате вентиляционного эффекта, интенсивный юго-восточный ветер приводит к крайне высоким температурам в бассейне р. Тимок в летний период.

Метеостанция “Брестовац”, находящаяся на юге деревни Брестовац с координатами 44°0'32 с. ш. и 22°6'47 в. д. на высоте 289 м над уровнем моря, была выбрана в качестве базисной. Данные с этой метеостанции использованы при моделировании распространения загрязнений воздуха в виде пыли. Господствующий ветер имеет юго-западное направление, его средняя скорость 1.2–2.0 м/с. Рассматриваемые области “Брестовац–Метовница” и “Брестовац–Запад” находятся на расстоянии от 3 до 6 км к югу от г. Бор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки экологического воздействия проектируемой шахты “Ћukaru Peki” организован мониторинг состояния окружающей среды в области планируемой добычи. Благодаря своей способности к осаждению на поверхности под собственным весом, частицы пыли размером более 10 мкм были собраны с помощью метода седиментации. Принцип сбора образцов состоял в следующем: 10 мл 0.02 Н раствора сульфата меди помещалось в пылесборник — пластиковую емкость объемом 2–5 л, к которой прикреплен раструб с диаметром отверстия 20 см. Подобные пылесборники устанавливались на открытом воздухе на высоте 1.5–2.0 м. Период сбора пыли составил 30 сут.

Количество нерастворимых частиц в общем объеме осажденных веществ определено гравиметрическим образом, т. е. по разнице веса фильтрующей бумаги до и после фильтрации и сушки при 105 °С до получения постоянного значения веса. Полученное значение преобразовывалось в общее количество собранных пылевых осадков с единицей измерения в миллиграммах. Количество золы в осажденном веществе определялось с помощью сжигания при 750 °С фильтрующей бумаги в фарфоровом тигле, в котором выполнен сбор нерастворимых веществ. Исходя из разницы веса между ранее обожженным тиглем и тиглем после обжига нерастворимых веществ, получено численное значение золы в миллиграммах. Количество горючих веществ в общем объеме осажденных веществ рассчитано по разнице между значениями нерастворимых веществ и золы.

В течение периода наблюдений в районе будущей шахты “Ћukaru Peki” выполнялись земляные работы с целью подготовки участка для возведения ровного портала и отвала. На основе анализа пылеобразования и особенностей рельефа, климата района выполнения работ для прогнозирования пылевого воздействия была выбрана гауссова модель как наиболее предпочтительная. Существует несколько подходящих вариаций данной модели, в том числе FDM-модель (Fused Deposition Modeling — моделирование послойным наложением) [26].

Учитывая сложность FDM-модели [26], в дальнейшем исследовании использована упрощенная гауссова модель для моделирования выбросов мелкодисперсных веществ с поверхности грунта:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(\frac{-h^2}{2\sigma_z^2}\right), \quad (1)$$

где $C_{x,y,z}$ — концентрация загрязнителя как функция местоположения (x, y, z) , кг/м³ или мкг/м³; Q — интенсивность выбросов, кг/с; u — скорость ветра на высоте выброса, м/с; σ_y , σ_z — дисперсия местоположения определенной выбрасываемой из трубы частицы по горизонтали и вертикали как функция x ; h — эффективная высота трубы (высота трубы плюс высота подъема выброса).

Принято, что частицы пыли размером 20–100 мкм рассеиваются в атмосфере подобно газам, но с центроидным движением вниз. Интенсивность падения может быть рассчитана путем извлечения величины $V_g t$ из эффективной высоты выброса пыли, где V_g — гравитационная скорость падающих частиц, t — время χ/u (с), χ — расстояние пройденное ветром от источника при скорости u . Это называется моделью наклонного облака [27]. В рамках данной модели можно пренебречь влиянием мощности источника на расстояние, проходимое частицей от него, чтобы рассмотреть непосредственно процесс осаждения частиц. Для частиц размером 20–100 мкм осаждение определяется как

$$w = V_g C(x, y, z), \quad (2)$$

где концентрация загрязнителя в воздухе оценивается на высоте от поверхности земли z , равной ~ 1 м. Частицы размером более 100 мкм осаждаются из атмосферы настолько быстро, что турбулентность с меньшей вероятностью влияет на их рассеяние. Траектория таких частиц может быть описана баллистическим подходом, в рамках которого определяется зона осаждения образованной пыли. Затем могут быть предприняты соответствующие меры для предотвращения или снижения негативного влияния на окружающую среду [28]. Для упрощения расчетов разница высот между источником и местом измерения не была учтена. В этом случае оценивалось влияние осаждения пыли на поверхность, т. е. на сельскохозяйственные растения, находящиеся неподалеку от места ведения земляных работ. Значения концентрации пыли получены расчетным образом. Анализ концентрации пыли и ее осаждения выполнен в программном пакете Statistica 12 за год до начала работ (2017 г.) и в течение подготовительных земляных работ (2018 г.). Исследование позволило определить точность выбранного метода моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнена обработка данных, полученных при сборе образцов и мониторинге с помощью эмпирических формул, а также с использованием аналитических алгоритмов. Ниже представлены исходные данные для расчета:

Средняя скорость ветра, м/с	2.0
Площадь участка земляных работ, га	9.0
Влажность, %	19.5
Содержание мелких частиц, %	56.1
Объем вскрышных работ, млн м ³ /год	0.144
Планируемый объем земляных работ, млн т/год	0.342
Вместимость погрузчика, м ³	2.0
Вместимость самосвала, м ³	20.0

Чтобы соотнести количество выбрасываемого в атмосферу загрязнителя с параметрами происходящего выброса необходимо ввести показатель выброса. Интенсивность образования пыли (показатель выброса) найдена по эмпирической формуле [29] и представлена отдельно для каждой технологической операции, г/с:

Погрузка незагрязненной вскрышной породы	0.174
Транспортировка незагрязненной вскрышной породы	6.830
Выгрузка незагрязненной вскрышной породы и формирование временного отвала	207.660
Выемка и погрузка породы под водяные резервуары	0.174
Транспортировка породы	6.830
Выгрузка породы и формирование временного отвала	207.660
Выемка породы под погрузочный портал	0.174
Транспортировка породы	6.830
Выгрузка породы во временный отвал	207.660

Для более простого сравнения данных показатель выброса пыли рассчитан для всех работ, т. е. для всех источников точечного, поверхностного и линейного выброса [29]:

$$E = \left[u^{0.4} a^{0.2} \left\{ 9.7 + 0.01p + \frac{b}{4 + 0.3b} \right\} \right].$$

Здесь E — показатель выброса пыли, г/с; u — скорость ветра, м/с; a — площадь участка, км²; p — валовая производительность шахты, млн т/год; b — объем вскрышных работ, млн м³/год. Совокупный показатель выброса пыли для всех работ составил $E = 11.67$ г/с.

Для построения гауссовой модели прогнозируемые концентрации пыли на измерительных участках AQ11, AQ3, AQ2 и AQ4 определены по эмпирическому уравнению. Выбор доминирующих направлений ветра основывался на данных местной метеостанции “Брестовац”, а также на данных метеостанции “Заечар”, принадлежащей Гидрометеорологической службе Республики Сербия (RHMS). В табл. 1 представлены доминирующие направления и средние скорости ветра по участкам.

ТАБЛИЦА 1. Средняя скорость ветра на измерительных участках, м/с

Доминирующие направления ветра	Участок			
	AQ11	AQ 2	AQ3	AQ4
Южный	0.5	0.5	—	—
Юго-западный	—	—	—	2.0
Западный	—	—	1.9	—

В табл. 2 приведены расстояния от источника до измерительных участков в доминирующих направлениях ветра, а также их горизонтальное расстояние от центральной оси направления ветра.

ТАБЛИЦА 2. Расстояния от участка земляных работ до измерительных участков, м

Измерительный участок	Расстояние	Горизонтальное расстояние
AQ11	435	276
AQ2	1737	283
AQ3	1297	175
AQ4	2255	1115

Параметры, связанные с метеоусловиями, крайне сложные, поэтому для дальнейшего анализа использованы категории атмосферной устойчивости по Пасквиллу [28]. Они могут применяться при отсутствии специальных метеоизмерений. Параметры приведены в зависимости от скорости ветра, интенсивности солнечной радиации и облачности, которые могут быть получены с помощью обычных наблюдений. Для гауссовой модели в качестве параметров дисперсии по Пасквиллу приняты величины σ_y и σ_z из [30, 31]. Параметры σ_y и σ_z определяются исходя из оценки графика функции расстояния между источником и приемником по кривой, соответствующей одной из категорий устойчивости [28]. Рассчитанные параметры следующие: средняя скорость ветра 2 м/с; показатель выброса пыли $E = 11.67$ г/с; высота источника выброса пыли $h = 1.5$ м; принятый диаметр частицы $d = 60$ мкм; категория атмосферной устойчивости по Пасквиллу — А. Параметры дисперсии по Пасквиллу представлены в табл. 3 [28, 30].

ТАБЛИЦА 3. Параметры дисперсии по Пасквиллу

Измерительный участок	x , км	σ_y , м	σ_z , м
AQ11	0.435	100	160
AQ2	1.737	290	1000
AQ3	1.297	193	640
AQ4	2.255	420	1115

На основе принятых параметров для участков AQ11, AQ2, AQ3, и AQ4 по уравнению (1) рассчитаны интенсивности TSP-осаждения. На рис. 1 приведены средние значения интенсивности TSP-осаждения, полученные в ходе измерений 2017–2018 гг. Скорость падения частиц диаметром 60 мкм принята согласно графику скорости падающих сферических частиц в зависимости от их диаметра и плотности [27].

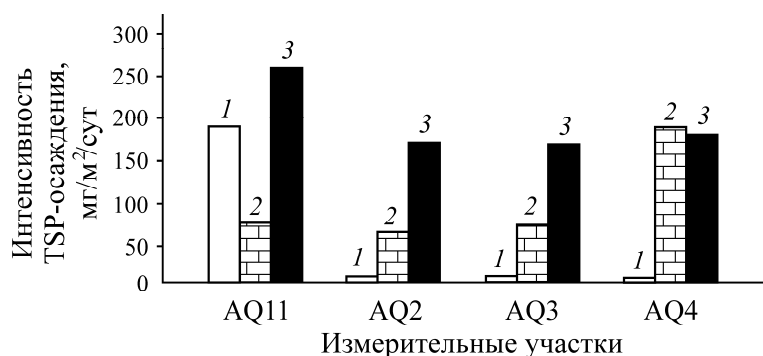


Рис. 1. Сравнение спрогнозированных и измеренных значений интенсивности TSP-осаждения: 1 — спрогнозированное значение; 2 — измеренное значение в 2017 г. до начала работ; 3 — измеренное значение в 2018 г. во время земляных работ

На рис. 2 представлены средние значения интенсивности TSP-осаждения по месяцам на основе данных мониторинга в 2017 и 2018 гг. Интенсивность TSP-осаждения на участке AQ11, который наиболее близко расположен к источнику пыли (435 м), значительно превышает интенсивность TSP-осаждения на других участках измерения, расположенных дальше от источ-

ника (рис. 1). На всех участках наблюдаются высокие значения интенсивности TSP-осаждения во время выполнения земляных работ в 2018 г. На участке AQ11 зафиксировано наименьшее отклонение между спрогнозированным и измеренным значением интенсивности TSP-осаждения, на других участках это отклонение значительно больше. Измеренные значения интенсивности TSP-осаждения, характерные для 2017 г., значительно выше спрогнозированных значений, кроме участка AQ11, где они ниже спрогнозированных ввиду невыполнения земляных работ в 2017 г. На высокие значения интенсивности TSP-осаждения на участке AQ4, вероятно, также влияют и другие источники, такие как сельскохозяйственная деятельность и движение транспорта по дорогам рядом с участком. Интенсивность TSP-осаждения в 2017 г. значительно ниже на всех участках по сравнению с 2018 г., кроме участка AQ4. Это подтверждает большую зависимость значений осаждения на измеряемом участке от других источников, нежели от рассматриваемых подготовительных земляных работ. Предельное допустимое значение интенсивности TSP-осаждения не было превышено на всех участках. Это означает, что принятые меры достаточны для предотвращения негативного пылевого воздействия в ходе подготовительных работ.

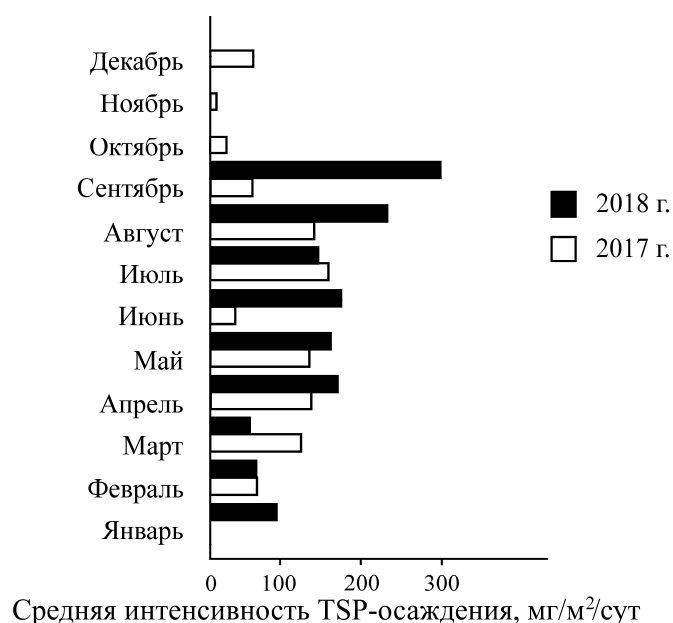


Рис. 2. Средняя интенсивность TSP-осаждения в 2017 и 2018 гг. по месяцам

В период выполнения работ наблюдается очевидное увеличение интенсивности осаждения по сравнению с годом, предшествующим работам (рис 3). В период с мая по сентябрь 2017 г. и с мая по сентябрь 2018 г. наблюдается значительное увеличение интенсивности осаждения на всех участках. Такие данные могут быть обусловлены интенсивной сельскохозяйственной деятельностью рядом с измерительными участками в 2017 г. и ростом темпа подготовительных работ в 2018 г. с целью их завершения до наступления неблагоприятных погодных условий.

Подобное распределение интенсивности TSP-осаждения соответствует исследованиям, выполненным на других территориях [26, 29, 30, 32 – 34]. Установлено, что зона пылевого воздействия или TSP-осаждения может быть расширена до 500 м от области подготовительных земляных работ. Наиболее существенными источниками выбросов пыли являются по-

грузочно-разгрузочные работы. Влияние подготовительных земляных работ на увеличение интенсивности TSP-осаждения должно анализироваться по нескольким параметрам. Необходимо учитывать другие виды деятельности, которые непосредственно связаны с разработкой участка выполнения работ, например доставка оборудования, топлива и рабочих. Следует принимать во внимание влияние сельскохозяйственной деятельности в непосредственной близости к участку и воздействие ветровой эрозии.

ВЫВОДЫ

Анализ интенсивности осаждения мелкодисперсных веществ с помощью гауссовой модели и экспериментального определения на измерительных участках показал, что ее предельно допустимые значения не были превышены. Результаты исследования подтверждают обоснованность предупредительных мер по снижению пылевого воздействия на окружающую среду в ходе подготовительных земляных работ в рамках сооружения будущей шахты “Čukaru Peći”. Детально рассмотрено влияние земляных работ на выбросы пыли в зависимости от их интенсивности и характера, а также от расстояния между измерительным участком и местом их выполнения. Область влияния пылевого загрязнения, вызванного земляными работами, может быть спрогнозирована гауссовым моделированием. Оно позволяет также смоделировать значения интенсивности осаждения пыли и выбрать измерительные участки, обеспечивающие наиболее надежные данные, необходимые для расчетов.

Сделано предположение о том, что чем больше отклонение измеренных значений от спрогнозированных, тем более существенно влияние других источников выбросов пыли, а также микроклиматических факторов, в особенности направления и интенсивности ветра. При наличии вблизи с горнодобывающим объектом других существенных источников пыли гауссова модель не является надежным решением для прогнозирования области пылевого загрязнения. В этом случае необходимо включать в модель корректирующие коэффициенты или использовать другую модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Air quality** standards and monitoring requirements, Official Gazette of the Republic of Serbia, 2010, No. 11; 2010, No. 75; 2013, No. 63.
2. **National research** Council. Air pollution, the automobile, and public health, Washington D. C., Watson A. Y., Bates R. R., Kennedy D., editors, The National Academies Press, 1988.
3. **Nkosi V.** How mine dumps in South Africa affect the Health of communities living nearby, The conversation Africa, 2018.
4. **Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., and Pantelic U.** Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice, Minerals, 2018, Vol. 34, No. 8. — P. 1 – 15.
5. **Wang L., Guo Z., Xiao X., Chen T., Liao X., Song J., and Wu B.** Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and down-stream of the Xiangjiang river, Hunan Province, J. Geogr. Sci., 2008, Vol. 18, No. 3. — P. 353 – 362.
6. **Nkosi V.** How mine dumps in South Africa affects the health of communities living nearby, Health and Welfare News, South Africa, 2018.
7. **Paul M. C.** Soot: sources, formation and health effects MLA (Modern Language Assoc.), Environ. Sci., Eng. Technol. APA, Paul MC N. Y., Nova Sci. Publish., 2012. — P. 326 – 329, 376.
8. **Lippmann M.** Environmental Toxicants, New York, Wiley, 2000. — 1008 p.

9. **Csavina J., Landázuri A., Betterton E. A., Sáez A. E., Field J., Taylor M. P., and Gao S.** A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations, *Sci. Total. Environ.*, 2012, Vol. 433. — P. 58–73.
10. **Cook A. G., Weinstein P., and Centeno J. A.** Health effects of natural dust, *Biol. Trace Elem. Res.*, 2005, Vol. 103, No. 1. — P. 1–15.
11. **Sun C., Bi C., Chen Z., Wang D., Zhang C., Sun Y., Yu Z., and Zhou D.** Assessment on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming Island, Shanghai City, *J. Geogr. Sci.*, 2010, Vol. 20, No. 1. — P. 135–147.
12. **Valko M., Rhodes C. J., Moncol J., Izakovic M., and Mazur M.** Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer, *Chem. Biol. Interact.*, 2006, Vol. 160, No. 1. — P. 1–40.
13. **Zheng G., Yue L., Li Z., and Chen C.** Assessment on heavy metals pollution of agricultural soil in Guan-zhong district, *J. Geogr. Sci.*, 2006, Vol. 16, No. 1. — P. 105–113.
14. **Gonzales-Castanedo J., Sanchez-Rodas D., Fernandez-Camacho R., Sanchez de la Campa A. M., Pandolfi M., Alastuey A., Querol X., and de la Rosa D. J.** Arsenic species in atmospheric particulate matter as tracer of the air quality of Donana Natural Park (SW Spain), *Chemosphere*, 2015, Vol. 119. — P. 1296–1303.
15. **Kovačević R., Jovašević-Stojanović M., Tasić V., Milošević N., Petrović N., Stanković S., and Matić Besarabić S.** Preliminary analysis of levels of arsenic and other metallic elements in PM₁₀ sampled near copper smelter Bor (Serbia), *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, 2010, Vol. 16, No. 3. — P. 269–279.
16. **Tasić V., Kovačević R., Maluckov B., Apostolovski-Trujić T., Matić B., Cocić M., and Šteharnik M.** The content of as and heavy metals in TPM and PM₁₀ near copper smelter in Bor, Serbia. *Water Air Soil Pollut.*, 2017, Vol. 228, No. 6. — P. 230.
17. **Pekey B., Bozkurt Z. B., Pekey H., Doğan G., Zararsız A., Efe N., and Tuncel G.** Indoor/outdoor concentrations and elemental composition of PM₁₀/PM_{2.5} in urban/industrial areas of Kocaeli City, Turkey, *Indoor. Air.*, 2010, Vol. 20, No. 2. — P. 112–125.
18. **Anderson H. R., Bremner S. A., Atkinson R. W., Harrison R. M., and Walters S.** Particulate matter and daily mortality and hospital admissions in the west midlands conurbation of the United Kingdom: associations with fine and coarse particles, black smoke and sulphate, *Occup. Environ. Med. Title.*, 2001, Vol. 58. — P. 504–510.
19. **Atkinson R. W., Fuller G. W., Anderson H. R., Harrison R. M., and Armstrong B.** Urban ambient particle metrics and health: a time series analysis, *Epidemiology*, 2010, Vol. 21, No. 4. — P. 501–511.
20. **Pope C. A., Burnett R. T., Thun M. J., Calle E. E., Krewski D., Ito K., and Thurston G. D.** Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *JAMA*, 2002, Vol. 287, No. 9. — P. 1132–1141.
21. **Razos P. and Christides A.** An investigation on heavy metals in an industrial area in Greece, *Int. J. Environ. Res.*, 2010, Vol. 4, No. 4. — P. 785–794.
22. **Šerbula S. M., Antonijević M. M., Milošević N. M., Milić S. M., and Ilić A. A.** Concentrations of particulate matter and arsenic in Bor (Serbia), *J. Hazard. Mater.*, 2010, Vol. 181, No. 1–3. — P. 43–51.
23. **Ulniković V. P., Kurilić S. M., and Staletović N.** Air quality benefits from implementing best available techniques in copper mining and smelting complex Bor (Serbia), *Water Air Soil Pollut.*, 2020, Vol. 231. — P. 160.
24. **Stojanović Z.** Mining project on the research of solid mineral raw materials in the hydro-thermal Cu–Au system “Čukaru Peki”, *Min. Metall. Inst. Bor*, 2018.

- 25. Paunković M.** Analysis of the environment state formed as a consequence of previous work by RTB–Bor, Faculty of Natural Sciences, Niš, 2017.
- 26. Wings K. D.** User's Guide for the fugitive dust model, prepared for U. S. Environmental Protection Agency, 1988.
- 27. Mellor G. L.** The Gaussian cloud model relations, J. Atmos. Sci., 1977, Vol. 34, No. 2. — P. 356–358.
- 28. Vallero D. A.** Fundamentals of air pollution, North Carolina, Durham, Elsevier, 2014.
- 29. Trivedi R., Chakraborty M. K., and Tewary B. K.** Dust dispersion modeling using fugitive dust model at an opencast coal project of western coalfields limited, India, J. Sci. Ind. Res., 2009, Vol. 68, No. 1. — P. 71–78.
- 30. Sharma R.** A review in fugitive dust it's impact, modeling and remedies, Int. J. Eng. Comput. Sci., 2017, Vol. 7, Issue 4.
- 31. Gilbert R. O.** Statistical methods for environmental pollution monitoring, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987. — 319 p.
- 32. Reed W. R.** Significant dust modes for mining operations, National Institute for Occupational Safety and Health, Information Circular, 2005. — 24 p.
- 33. Lawal O. and Asimiea A. O.** Modelling of the potential pattern and concentration of fugitive dust around a cement plant, Environ. Res. Eng. Manag., 2017, Vol. 73, No. 1. — P. 48–58.
- 34. Prostanski D.** Experimental study of coal dust deposition in mine workings with the use of empirical models, J. Sustain. Min., 2015, Vol. 14, No. 2. — P. 108–114.

Поступила в редакцию 04/IV 2022

После доработки 20/IX 2022

Принята к публикации 21/IX 2022