2023

№ 3

УДК 622.271:504.3.054

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПОСЛЕ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ НА КАРЬЕРЕ, РАСПОЛОЖЕННОМ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДА

Улку Калайджы Сахыноглу

Стамбульский университет Джеррахпаша, E-mail: ukalayci@iuc.edu.tr, г. Стамбул, Турция

При проведении взрывов с помощью восьмифракционного портативного каскадного импактора измерена респирабельная аэрозольная масса (РАМ) и установлено распределение частиц пыли по массе и размеру. Приведены уравнения, описывающие рассеяния РАМ по господствующему направлению ветра для различных расстояний от места взрыва, которые для оценки угроз здоровью классифицированы по респирабельной, торакальной и вдыхаемой фракциям. Рассчитано количество образованной при взрыве пыли и выявлены тренды рассеяния РАМ: уменьшение концентрации от граммов до миллиграммов в зависимости от расстояния. Все фракции РАМ полностью оседают на расстоянии 535 м, не распространяясь за пределы карьера. Частицы РАМ классифицируются как мелкие. Выполнено сравнение количества и качества пыли, образованной при взрывных и других горнодобывающих работах.

Взрывные работы, пылеобразование, добыча полезных ископаемых, распределение частиц

DOI: 10.15372/FTPRPI20230319

Добыча полезных ископаемых открытым способом выполняется буровзрывным методом, особенно когда из-за высокой твердости породы механическая выемка экономически нецелесообразна [1, 2]. Взрывные работы приводят к негативным экологическим последствиям: сейсмическим колебаниям, повышению атмосферного давления, пылеобразованию. Сейсмические колебания и повышение атмосферного давления способны нанести ущерб близлежащим сооружениям, а образованная респирабельная аэрозольная масса (РАМ) — вред здоровью людей [3]. Измерение и классификация РАМ — весьма актуальная задача.

В настоящей работе для определения характеристик затухания концентрации РАМ в воздухе выполнено ее измерение на расстоянии, близком к месту взрыва (110 м), а также на расстояниях, отдаляющихся к границе карьера (232, 303, 363, 496 м). Для достоверной оценки тренда затухания концентрации РАМ в воздухе рассчитано общее количество образуемой пыли в результате взрыва. Из соображений безопасности данный параметр измерить невозможно. Путем совместного анализа измеренных и рассчитанных значений РАМ получена характеристика концентрации РАМ в воздухе от источника до населенного пункта.

Работа выполнена при финансовой поддержке Исполнительного секретариата научно-исследовательских проектов Стамбульского университета Джеррахпаша (проект FHZ-2022-36383).

В процессе взрыва в заряженной скважине образуется газовая смесь с высоким давлением. Она воздействует на внутреннюю поверхность скважины и создает область разрушения породы, размер которой варьирует от 10 до 45 мм вокруг скважины [4–7]. Под влиянием волн сжатия и растяжения после данной стадии геоматериал разрушается. Тем временем породный массив смещается по направлению к свободной поверхности. Количество образуемой пыли зависит от атмосферных условий (температуры, давления, влажности воздуха, скорости и направления ветра), геологических параметров (механических и минералогических параметров породы и подземного водоносного слоя), а также параметров проведения взрывных работ. Геологические и атмосферные параметры — неконтролируемые при пылеобразовании, влияют на механизм образования и распространения пыли. Параметры проведения взрывных работ — полуконтролируемые, влияют на объем взрываемой породы и объем образуемой пыли, определяют степень фрагментации и общий объем фрагментированной породы [8–13].

Пыль образуется в процессе разрушения и фрагментации породы. Другой источник пылеобразования — осевшая на поверхностях карьера пыль, поднимаемая в воздух под действием взрывной волны, в результате чего после детонации образуется облако пыли [10].

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), из-за проблем, связанных с загрязнением воздуха, в мире ежегодно умирает 7 млн человек [14]. Частицы РАМ размером > 10 мкм задерживаются в органах внешнего дыхания, <10 мкм — в бронхах, 1-2 мкм — в альвеолах [15]. Ультрамелкие частицы (<0.1 мкм), как наиболее распространенная фракция в городской атмосфере, попадают в кровь через альвеолы [16]. В работах, посвященных влиянию вдыхания РАМ на здоровье человека, показано, что краткосрочное и долгосрочное воздействие высоких концентраций РАМ приводит к негативным последствиям (сердечному приступу, раку легких, хронической обструкции легких, астме) и могут стать причиной преждевременной смерти [17, 18]. Длительное воздействие высоких концентраций РАМ, в зависимости от их размера и химического состава, способно привести к острым или хроническим проблемам со здоровьем [18, 19]. В [20–24] рассмотрено распределение частиц по массе и размеру в промышленных, городских, пригородных, загородных и автодорожных областях.

Научные работы, посвященные распределению частиц по массе и размеру, а также анализу РАМ в горнодобывающей отрасли, ограничены добычей угля. В [25] обобщена массовая концентрация, распределение по размеру и химическая концентрация угольной респирабельной пыли. В [26] проведен анализ РАМ в угольных подземных шахтах и дана характеристика вредных РАМ на поверхностях угольных шахт. В [27] измерен уровень загрязнения подземных шахт аэрозолями пыли и дизельных выхлопных газов, в [28] оценено пылевое загрязнение в зимний период с помощью удаленного анализа воздуха.

Карьерная добыча имеет большое значение в строительной отрасли по всему миру. Она связана с буровзрывными работами, в результате которых образуется огромное количество пыли. В научной литературе нет работ, посвященных распределению частиц образуемой при взрыве пыли по массе и размеру в условиях карьера. Измерение и контроль выбросов респирабельной аэрозольной массы при взрывных работах на открытых выработках весьма актуальны, так как имеется взаимосвязь между запыленностью и угрозами здоровью населения. Цель настоящей работы — оценка параметров влияния пыли, образуемой при взрывных работах, на близлежащие населенные пункты и карьер, получение прогнозирующих уравнений для карьера, расположенного в г. Стамбул.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматриваемый карьер расположен в пределах г. Стамбул (Турция). На нем осуществляется добыча известняка, используемого в строительстве в качестве заполнителя бетона. Ввиду значительного роста города многие карьеры оказались в области жилой застройки.

В карьере на некоторой глубине наблюдается чередование глины, песчаной глины и низкопрочного песчаника. Над данным чередованием залегает добываемый известняк, состоящий из карбонатов, которые имеют серовато-белые, светло-кремовые, серые цвета со средней и большой мощностью залегания пластов. Известняк представлен макроскопическими органическими остатками и бентонными фораминиферами. Он имеет полую пористую текстуру с доломитизацией в разных местах, распространены большие и малые палеокарстовые полости, а также присутствуют водоросли и кораллы. Доминирует зернистый тип известняка [29].

Согласно макроскопическому анализу, образцы из рассматриваемой породной формации однородны, имеют белый и серый цвет, сплошную и неизменную структуру. Твердость по шкале Мооса составляет ~3. Микроскопический анализ показал кальцитовую природу образцов, в основном в микритовой форме. Получаемый заполнитель бетона содержит мелкие опаковые минералы размером зерен 0.3–0.7 мм и не содержит реакционные минералы. Состав заполнителя, %: кальцит (первичный, микритовый) — 80–85; вторичный кальцит (крупнозернистый, окаменелый) — 13–18; опаковые минералы (лимонит и гематит) — менее 1 [30].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В полевых условиях выполнен мониторинг пяти взрывов с регистрацией их параметров. Атмосферные параметры фиксировались Главным метеорологическим управлением Турции.

Образцы готовились с помощью QMA-фильтров из кварцевого волокна диаметром 82 мм и размером пор 0.45 мкм. До и после испытаний фильтры находились в эксикаторе 48 ч. Высушенные фильтры взвешивались на высокоточных весах. Для полевых измерений использовался восьмифракционный каскадный импактор Андерсона при скорости потока воздуха 28.3 л/мин. Номера фракций и размеры частиц в них, мм: 0 — >8; 1 — 6.5 – 8.0; 2 — 5.2 – 6.5; 3 — 3.5 – 5.2; 4 — 2.6 – 3.5; 5 — 1.7 – 2.6; 6 — 1.0 – 1.7; 7 — 0.43 – 1.00. После высушивания и взвешивания фильтров в лабораторных условиях выполнялись полевые измерения с помощью каскадного импактора во время проведения взрывных работ.

На рассматриваемом карьере добыча известняка осуществляется методом взрывания уступов. Во время измерения концентрации РАМ высота данного уступа составляла 12 м, количество скважин 50-70, общее количество взрывчатых веществ 3160-3500 кг, интервал между скважинами во вскрышной породе ~3 м. На других карьерах используются примерно такие же параметры, кроме количества взрывных скважин. В результате взрыва объем фрагментированной породы составлял 5400-7560 м³.

Места проведения измерений концентрации РАМ располагались по господствующему направлению ветра от места взрыва в диапазоне 110–496 м. Во время измерений температура воздуха составляла 7–17 °C, влажность 57–67 %, скорость ветра 11–49 м/ч.

На рис. 1 показан внешний вид уступа до и после взрыва. Большое количество пыли наблюдается сразу после взрыва, затем она движется по направлению ветра. Площадь поверхности области высокоплотного пылеобразования примерно равна площади поверхности взрываемой породы. При взрыве 60 скважин площадь области пылеобразования составила 540 м².



Рис. 1. Внешний вид уступа до (a) и после (b) взрыва. Стрелкой показано движение по господствующему направлению ветра высокоплотного пылевого облака, возникшего в результате взрыва

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены результаты статистического кумулятивного анализа распределения частиц по размеру, а также кривые концентрации РАМ относительно распределения по массе для пяти взрывов. С помощью кривых установленной логарифмической вероятности для каждого образца рассчитаны следующие параметры (таблица): общая концентрация взвешенных частиц O_k ; концентрация РАМ₁₀ (размер частиц <10 мкм от общей концентрации); РАМ₄ (<4 мкм); РАМ_{2.5} (<2.5 мкм); РАМ₁ (<1 мкм); фракции респирабельности (респираторная, торакальная и вдыхаемая); масс-медианный аэродинамический диаметр; геометрическое стандартное отклонение. Подробная методика расчета данных параметров представлена в [22].

Из таблицы видно, что при инициировании 3.2 т взрывчатого вещества общая концентрация взвешенных частиц составила, мг/м³: 110 м — 17.29; 232 м — 11.14; 303 м — 8.98; 364 м — 6.09; 496 м — 2.17. С увеличением расстояния от места взрыва концентрация РАМ₁₀ убывает с 16.59 до 2.80 мг/м³, РАМ_{2.5} — с 9.85 до 1.18 мг/м³ при масс-медианных аэродинамических диаметрах 3.42, 2.68, 3.07, 6.54, 3.67 мкм на расстояниях 110, 232, 303, 364 и 496 м соответственно. Согласно полученным масс-медианным аэродинамическим диаметрам, частицы классифицируются как мелкие. Полученные диаметры превышают значения из [31], где рассматривалась область вокруг соляной шахты в Польше (1.46–2.49 мкм), но ниже, чем в [22] для пяти регионов в городской части Стамбула в летний и зимний периоды (2.70–6.70 мкм).



Рис. 2. Кумулятивное распределение РАМ по размеру (*a*) и по массе (δ)

Концентрации РАМ оказались выше, чем при открытой угледобыче в Индии, где общая концентрация взвешенных частиц составила 3.72 мг/м³, концентрация РАМ₁₀ — 0.72 мг/м³ и меньше, чем при бурении, где концентрации РАМ₁₀ — 26.8–150.0 мг/м³ [25, 32]. Также концентрации РАМ оказались ниже, чем при строительных работах с использованием дробилок (24.4–442.0 мг/м³) [33]. Значения респирабельной фракции оказались ниже измеренных при строительных работах (94.4 мг/м³) [34]. Следовательно, при карьерной добыче концентрация РАМ больше, чем при угледобыче, и ниже, чем при бурении, дроблении и строительстве. Основная причина — большая влажность угля.

	Концентрация, мг/м ³							
Показатель	110 м	232 м	303 м	364 м	496 м			
	Стандартиз	ованные параметры РАМ						
PAM ₁	3.37	2.29	1.42	0.87	0.36			
PAM _{2.5}	9.85	7.33	5.36	2.37	1.18			
PAM ₄	13.14	9.48	7.28	3.33	1.61			
PAM ₁₀	16.59	11.01	8.83	4.97	2.08			
O_k	17.29	11.14	8.98	6.09	2.17			
$PAM_1 / PAM_{2.5}$	0.34	0.31	0.27	0.37	0.31			
$PAM_{2.5} / PAM_{10}$	0.59	0.67	0.61	0.48	0.57			
	Концентрация вдыхаемых фракций							
Респирабельная (d ₅₀ < 4 мкм)	12.19	9.08	6.50	3.23	1.49			
Торакальная (d ₅₀ < 10 мкм)	15.48	10.29	8.20	4.62	1.90			
Вдыхаемая (<i>d</i> ₅₀ < 100 мкм)	15.94	10.45	8.35	5.28	1.99			
	Средний диаметр							
Масс-медианный аэродинамический диаметр, мкм	3.42	2.68	3.07	6.54	3.67			
Геометрическое стандартное отклонение	1.75	1.30	1.31	1.52	1.39			

ъ				DAN						1
Per	VILTATE	nacm	репения		IO DARMA	nv t	л конпент	nauuu	nashrix	фракции
103	yJIDIGIDI	paon	леденении	1 7 7 1 4 1 1	io pasmi	py r	тконцент	рации	pasinnia	фракции

Примечание. d_{50} — средний диаметр.

Концентрации, полученные в настоящей работе, превышают национальную предельную допустимую концентрацию (ПДК) PAM_{10} (суточное ограничение 50 мг/м³) и целевое ежегодное снижение концентрации 15 мкм/м³ по заявлениям ВОЗ в 2021 г. [14]. На расстоянии до 300 м концентрация PAM превышает ПДК (5 мг/м³), после 300 м она ниже ПДК. Отношение $PAM_{2.5}/PAM_{10}$ на расстоянии менее 300 м выше (среднее 0.62), чем на расстоянии более 300 м (среднее 0.52). Это соотношение показывает количество мелких частиц в PAM, образуемых в результате сгорания и способных достигнуть легкие. Соотношение $PAM_{2.5}/PAM_{10}$, близкое к 1, демонстрирует высокий антропогенный вклад в загрязнение, близкое к 0 — высокий природный вклад [22]. Благодаря влиянию химических веществ, используемых при взрывных работах, сгорание существенно влияет на образование мелких частиц в окрестностях взрыва по сравнению с расстоянием более 300 м.

Тренд развития разных концентраций РАМ с увеличением расстояния рассмотрен с целью понимания характеристик распространения пыли, образованной в результате взрыва. Стояла задача определить тренд затухания высокоплотного пылевого загрязнения. Для этого с помощью методов теории взрывных работ оценивалось образование пыли непосредственно в области взрыва, где измерение невозможно, затем определялась концентрация РАМ на расстоянии 110–496 м от взрыва и анализировались полученные значения.

На рис. 3 представлены две совмещенные линии тренда. Внешняя кривая разделена на участки I–III и показывает концентрацию РАМ начиная от места взрыва. В точке начала координат под воздействием высоких температур и давления породный материал преобразуется из твердого состояния в аэрозоль. Согласно [7], размеры разрушения породы изменяются между 10-45 мм. Диаметр скважины 89 мм. Учитывая высоту уступа 12 м, количество образовавшейся пыли в области разрушения 0.08-0.01 м³. Исходя их схемы взрыва 3×3 м (расстояние между скважинами, умноженное на расстояние между рядами), количество РАМ,

образовавшейся в процессе пульверизации, равно 0.01 г/м³ (средняя плотность известняка 2.6 г/м³). Так как плотность известняка и параметры проведения взрывных работ примерно одинаковы на всех известняковых карьерах, можно предположить, что данное значение характерно для всех известняковых карьеров.



Рис. 3. Изменение концентрации разных фракций РАМ в зависимости от расстояния от места взрыва

Рассмотрим участки I–III как характеристики выбросов РАМ в результате взрывных работ. В ходе детонации в течение нескольких миллисекунд образуется большое количество пыли, особенно на стенках скважин. Это первый источник пыли. Второй источник — фрагментация породы, пыль от которой является функцией размера частиц, третий — осажденная на поверхностях карьера пыль, поднимаемая в воздух взрывной волной. На участке I концентрация пыли резко снижается (факторы — гравитация, влажность и ветер). На участке II снижение концентрации замедляется, происходит переход от хаотичной среды к упорядоченной. Этот участок относится к внутренней части карьера. На участке III затухание прекращается, концентрации уменьшаются, не достигая нуля. Здесь для разделения остаточной пыли от атмосферной необходим химический анализ.

На рис. 3 также приведены измерения РАМ на расстоянии 110-496 м от места взрыва. Тренд концентраций РАМ₁, РАМ_{2.5}, РАМ₄, РАМ₁₀ и общей концентрации взвешенных частиц O_k показал, что каждая фракция демонстрирует линейное снижение относительно расстояния (корреляция более 0.980). Несмотря на ограниченный набор полученных данных, наблюдается сильная корреляция между расстоянием d и каждой фракцией РАМ. Установлено, что на участке II каждые 100 м концентрация РАМ в воздухе снижается на ~ 3.9 мг/м³. Определены коэффициенты корреляции между РАМ₁, РАМ_{2.5}, РАМ₄, РАМ₁₀, общей концентрацией взвешенных частиц и расстоянием от места взрыва d:

$$PM_{1} = -0.0081d + 4.085, \quad R^{2} = 0.959,$$

$$PM_{2.5} = -0.0239d + 12.397, \quad R^{2} = 0.952,$$

$$PM_{4} = -0.0314d + 16.407, \quad R^{2} = 0.958,$$

$$PM_{10} = -0.0382d + 20.174, \quad R^{2} = 0.977,$$

$$O_{k} = -0.0388d + 20.808, \quad R^{2} = 0.987.$$

Известно, что частицы в воздушной среде подчиняются закону экспоненциального распределения. Тем не менее рассеяние РАМ в пределах 386 м приходится на крутую часть экспоненциального распределения (участок II). После ~ 500 м тренд имеет горизонтальное развитие. Согласно уравнениям, частицы с концентрацией РАМ₁₀ полностью осядут на расстоянии 527 м, с РАМ₄ — 521 м, с РАМ_{2.5} — 517 м, с РАМ₁ — 498 м соответственно. На расстоянии 535 м по господствующему направлению ветра от места взрыва РАМ осядет на 99.9% и не выйдет за пределы карьера.

Настоящая работа отражает обобщенный подход к оценке затухания концентрации пыли на карьерах, где проводится добыча известняка или песчаника с помощью буровзрывного метода. Она может внести важный вклад в изучение механизма пылеобразования и характеристик распространения пыли на известняковых карьерах.

выводы

Выполнены измерения РАМ в карьере во время проведения взрывных работ. Масса образованной при взрыве пыли установлена согласно теории взрывных работ. Тренды рассеяния РАМ, полученные на основе измерений, сопоставлены с теоретическими расчетами. Выявлено, что концентрация РАМ уменьшается от граммов до миллиграммов за первые 100 м. Далее скорость уменьшения замедляется, концентрация РАМ продолжает линейно снижаться в диапазоне расстояний 110–496 м от 17.29 до 2.17 мг/м³. На расстоянии ~500 м происходит 90% уменьшение концентрации РАМ всех фракций. Предельная допустимая концентрация (50 мкм/м³) для РАМ₁₀ достигается на расстоянии 535 м. Учитывая эти данные, можно заключить, что высококонцентрированная пыль не выйдет за пределы карьера.

Согласно результатам анализа распределения частиц по массе и размеру, индуцированная РАМ классифицируется как мелкие частицы. Основная причина возникновения пыли состоит в том, что в результате взрыва порода пульверизируется вокруг скважины. Горение взрывчатого вещества также вносит значительный вклад в образование мелкой фракции на расстоянии до 300 м.

После взрыва на карьерах концентрация РАМ временно увеличивается. Для контроля за выбросами пыли, индуцированными взрывными работами, особенно на открытых выработках по добыче минерального сырья, необходимо выполнять измерения в режиме реального времени и проектировать карты безопасных областей для каждого взрыва. На рассеяние РАМ влияют атмосферные условия и геометрия карьера, а сама концентрация РАМ различается в зависимости от времени года.

Автор выражает благодарность проф. д.т.н. Улку Алвер Сахину, проф. д.т.н. Юмиту Озеру, проф. д.т.н. Мурату Каракусу и Экрему Гундогану.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Jimeno E., Jimeno C., and Carcedo F. Drilling and blasting of rocks, A. A. Balkema, Rotterdam, 1995.
- 2. Trubetskoy K. N. and Galchenko Y. P. Methodology for estimating promising development paradigm for mineral mining and processing industry, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 2. P. 407–415.
- **3.** Mikhailov V. A., Beresnevich P. V., Borisov V. G., and Loboda A. I. Bor'ba s pylyu v rudnykh kar'yerakh (Dust Control in Ore Mines), Moscow, Nedra, 1981.

- Tyupin V. N. Geomechanical behavior of jointed rock mass in the large-scale blast impact zone, Eurasian Min., 2020, No. 2. — P. 11–14.
- 5. Whittaker B. N., Singh R. N., and Sun G. Rock fracture mechanics principles, Design and Applic., Amsterdam, Elsevier, 1992. P. 444–445.
- 6. Viktorov S. D. Blasting destruction of rock masses is a basis of progress in mining, Mining Inform. Analyt. Bull., MIAB, 2015, No. S1.
- Esen S., Onederra I., and Bilgin H. A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole S. a Julius Kruttschnitt mineral research centre, The University of Queensland, Brisbane, Qld, Australia Department of Min. Eng., Middle East Technical University, Ankara, Turkey Accepted, 2003.
- 8. Adushkin V. V., Spivak A. A., Solov'ev S. P., Pernik L. M., and Kishkina S. B. Geoecological consequences of massive chemical blasts in open pit mines, Geoekologiya, 2000, No. 6. P. 554–563.
- **9.** Adushkin V. V., Solov'ev S. P., and Shuvalov V. V. Calculation of dust load from a massive blast at Lebedinsky MPP, Abstr. Int. Conf. Subsoil Development and Ecological Problems, Look into the 21st Century, Moscow, RAN, 2000.
- 10. Adushkin V. V., Solov'ev S. P., Spivaka A. A., and Khazins V. M. Open pit mining with blasting: Geoecological aftermath, J. Min. Sci., 2020, Vol. 56, No. 2. P. 309-321.
- 11. Kutuzov B. N. and Tyupin V. N. Determination of damage zones induced by blasting in jointed rock mass, Izvestiya vuzov, Gornyi zhurnal, 1983, No. 4. P. 53–58.
- 12. Il'yushin A. A. The mechanics of a continuous medium, Moscow, 1999. P. 964–1009.
- 13. Khazins V. M., Solov'ev S. P., Loktev A. V., and Shuvalov V. V. Nearsurface air layer pollution with micronic dust particles in large-scale blasting in open pit mining, J. Min. Sci., 2022, Vol. 58, No. 4.
- 14. WHO. World health organization global air quality, 2020. guidelineshttps://www.who.int.
- 15. EPA. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics, access date 29.03.2022.
- Sahin U. A., Harrison R. M., Alam M. S., Beddows D. C. S., Bousiotis D., Shi Z., Crilley L. R., Bloss W., Brean J., Khanna I., and Verma R. Measurement report: Interpretation of wide range particulate matter size distributions in Delhi, Atmospheric Chemistry and Physics, 2021.
- 17. Arslan H., Baltaci H., Sahin U. A., and Onat B. The relationship between air pollutants and respiratory diseases for the western Turkiye, Atmospheric Pollution Res., 2022, Vol. 13, Issue 2. 101322.
- **18.** Harrison R. M. and Yin J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? Sci. Total Env. Apr., 2000, Vol. 17, No. 1–3. P. 85–101.
- **19.** Onat B., Sahin U., and Akyuz T. Elemental characterization of PM_{2.5} and PM₁ in dense traffic area in Istanbul, Turkey Atmospheric Pollution Res., 2013, Vol. 4, No. 1. P. 101–105.
- 20. Dingenen R. V., Raes F., Putaud .P., et al. A European aerosol phenomenology, Physical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe, Atmos Environ, 2004, Vol. 38. P. 2561–2577.
- **21. Johansson C. and Johansson P. A.** Particulate matter in the underground of Stockholm, Atmospheric Env., 2003, Vol. 37, No. 1. P. 3–9.
- 22. Sahin U. A., Scherbakova K., and Onat B. Size distribution and seasonal variation of airborne particulate matter in five areas in Istanbul, Turkiye, Env. Sci. Pollut. Res., 2012, Vol. 19, No. 4. P. 1198–1209.
- **23.** Sahin U. A., Onat B., Stakeeva B., Ceran T., and Karim P. PM₁₀ concentrations and the size distribution of Cu and Fe-containing particles in Istanbul's subway system, Transp. Res., 2012, Vol. 17. P. 48–53.
- 24. Onat B. and Stakeeva B. Assessment of fine particulate matters in the subway system of Istanbul Indoor and Built. Env., 2014, Vol. 23, No. 4. P. 574–583.

- 25. Abbasi B., Wang W., Chow J. C., Watson J. G., Peik B., Nasiri W., Riemenschnitter K. B., and Elahifard M. Review of respirable coal mine dust characterization for mass concentration, size distribution and chemical composition, Minerals, 2021, Vol. 11. 426.
- 26. Ghose M. K. and Majee S. R. Characteristics of hazardous airborne dust around an Indian surface coal mining area, Environ Monit. Assess., 2007, Vol. 130. P. 17–25.
- 27. Rubow K. L., Cantrell B. K., and Marple V. A. Measurement of coal dust and diesel exhaust aerosols in underground mines, Proc. of the 7th Int. Pneumoconioses Conf., Pittsburgh, PA, USA, 1988. P. 23-26.
- **28.** Oparin V. N., Potapov V. P., Giniyatullina O. L., et al. Evaluation of dust pollution of air in Kuzbass coal mining areas in winter by data of remote earth sensing, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 3. P. 549–558.
- 29. Örgün Y., Yalçin T., Bozkurtoğlu E., Duman E., Yiğitbaş E., Kuzu C., Nasuf E., and Öztürk A. İstanbul çatalca muratbey civarında yapılan madencilik faaliyetlerinin büyük çekmece göl havzasında yeralan yeraltı yüzey sularındave çevreye, Olan Etkisi. Kuvaterner Çalıştayı IV. İTÜ Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, İstanbul, Turkish, 2003.
- **30. Yildirim H.** Technical report, The Rectorate of Istanbul Technical University, Disaster Management Coordination Unit, 2020. 388 p.
- Bralewska K., Rogula-Kozłowska W., Mucha D., Badyda A. J., Kostrzon M., Bralewski A., and Biedugnis S. Wieliczka salt mine and related health benefits for tourists, Int. J. Env. Res. Public Health, 2022, Vol. 19, No. 2. — 826.
- 32. Nagesha K. V., Sastry V. R., and Ram C. K. Prediction of dust dispersion during drilling operation in open cast coal mines: A multi regression model, Int. J. Env. Sci., 2016, Vol. 6, No. 5. P. 681–696.
- **33.** Heitbrink W. A. In-depth study report: control technology for crystalline silica exposures in construction, Exposures and Preliminary Control Evaluation, Report # ECTB NO 247-12. NIOSH, Cincinnati, OH, 2000.
- 34. Nash N. T. and Williams D. R. Occupational exposure to crystalline silica during tuckpointing and the use of engineering controls, Appl. Occup. Environ Hyg., 200, Vol. 15, No. 1. P. 8–10.

Поступила в редакцию 26/III 2022 После доработки 12/II 2023 Принята к публикации 18/V 2023