

УДК 504:550.46

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РАЗМЕР
И МАССА ПЫЛИ $PM_{0.1}$ ОКОЛО УГОЛЬНЫХ КАРЬЕРОВ****Казанцева У.Д., Яковенко О.С., Лешукова М.К.,****Легошин К.В., Лешуков Т.В., Ларионов А.В.***ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, Кемерово,**e-mail: tvleshukov@kemsu.ru;*

В статье представлены результаты оценки пылевого загрязнения фракцией $PM_{0.1}$ окрестностей четырех угольных разрезов, а также контрольных территорий в зимнее время. Исследования проведены на территории Кемеровской области – Кузбасса. Анализ пылевой нагрузки производился с использованием снегомерного метода. Точки отбора проб располагались на различном удалении от источника пылевой нагрузки через каждые 500 м. Необходимая пылевая фракция выделялась и подготавливалась методами фильтрации, центрифугирования, диспергирования. Для анализа морфологии исследуемой фракции твердых частиц применялась электронная микроскопия. В результате исследований установлены особенности миграции и накопления пылевых частиц фракции $PM_{0.1}$ в сравнении с контрольными территориями, не затронутыми деятельностью горнодобывающих предприятий. Определено, что преобладающей фракцией являлись частицы 0,5–0,6 мкм. Для частиц характерна вытянутая, реже изометричная форма. Распространены частицы со сложной поверхностью. В вещественном составе преобладали кальцит, гипс. Форма частиц способствует адсорбции на их поверхности различных соединений, в том числе ПАУ и других потенциально токсичных компонентов. Пространственные особенности распространения пылевой нагрузки от источников сложны. Установлено существенное превышение количества пылевых частиц в снегу около угольных разрезов по сравнению с контрольными территориями. Не выявлено закономерной зависимости накопления пыли фракции $PM_{0.1}$ в снегу от расстояния от источника. Вероятно, частицы фракции $PM_{0.1}$ могут переноситься на большие расстояния. Их динамика и особенности седиментации сложны и определяются наряду с процессами переноса во взвешенном состоянии также вторичным перемещением в составе снежной массы. Значительную роль в накоплении пылевых частиц фракции $PM_{0.1}$ в зимнее время играют особенности микро рельефа и другие микро условия седиментации.

Ключевые слова: каменный уголь, открытый способ добычи, угольно-каменная пыль, фракционный состав пыли, твердые частицы (ТЧ), $ТЧ_{0.1}$, Кузбасс, Кемеровская область

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50114.

**MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS, SIZE
AND MASS OF $PM_{0.1}$ DUST NEAR THE OPEN COAL MINES****Kazanceva U.D., Yakovenko O.S., Leshukova M.K.,****Legoshchin K.V., Leshukov T.V., Larionov A.V.***Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: tvleshukov@mail.ru;*

The article presents the results of an assessment of dust pollution by the $PM_{0.1}$ fraction in the vicinity of four coal mines, as well as control areas in winter. The studies were carried out on the territory of the Kemerovo region – Kuzbass. Dust load analysis was carried out using the snow measurement method. Sampling points were located at different distances from the dust load source every 500 m. The required dust fraction was isolated and prepared by filtration, centrifugation, and dispersion methods. Electron microscopy was used to analyze the morphology of the studied fraction of solid particles. As a result of the research, the features of migration and accumulation of dust particles of the $PM_{0.1}$ fraction were established in comparison with control areas not affected by the activities of mining enterprises. It was determined that the predominant fraction was particles of 0.5–0.6 μm . The particles are characterized by an elongated, less often isometric shape. Particles with a complex surface are common. The material composition was dominated by calcite and gypsum. The shape of the particles promotes the adsorption of various compounds on their surface, including PAHs and other potentially toxic components. The spatial features of the distribution of dust load from sources are complex. A significant excess of the amount of dust particles in the snow near the coal mines was established in comparison with the control areas. No regular dependence of the accumulation of dust of the $PM_{0.1}$ fraction in snow on the distance from the source was found. It is likely that particles of the $PM_{0.1}$ fraction can be transported over long distances. Their dynamics and features of sedimentation are complex and are determined, along with the processes of transfer in suspension, also by secondary movement in the composition of the snow mass. A significant role in the accumulation of dust particles of the $PM_{0.1}$ fraction in winter is played by the features of the microrelief and other microconditions of sedimentation.

Keywords: coal, open pit mining, coal-stone dust, fractional composition of dust, particulate matter (PM), $PM_{0.1}$, Kuzbass, Kemerovo region

Твердые частицы (ТЧ) в настоящее время рассматриваются как крайне опасный загрязнитель воздуха, который способен вызывать ряд проблем со здоровьем у населения. Сообщается, что ТЧ способны про-

никать глубоко в дыхательную систему и вызывать там хронические воспалительные процессы [1, 2]. Также известно, что данные частицы из-за своего размера могут попадать в кровеносную систему и вы-

зывать ряд проблем с сердечно-сосудистой системой [3, 4], а также обладают канцерогенным эффектом [5, 6]. Возникает определенная закономерность, отражающая увеличение токсичности и опасности пыли с уменьшением ее размера.

Источниками пыли являются и естественные ландшафты [7], и ландшафты, созданные человеком, так называемые антропогенные [8]. В последних по производству пылевых частиц выделяются автомобильные магистрали и горнодобывающая промышленность [8]. Также известно, что размер частиц серьезно влияет на их миграционную способность, в связи с чем наиболее мелкие фракции фиксируются на достаточном удаленном расстоянии от места происхождения. Особенно важно исследовать ТЧ, переносимые на значительное расстояние от промышленных предприятий (угольных шахт, разрезов и др.), а также содержащие канцерогенные элементы, их воздействию может массово подвергаться резидентное население. Таким образом, миграционная способность пыли возрастает с уменьшением ее размера.

Известно, что содержание частиц пыли в атмосфере обладает большими флуктуациями, которые обычно связывают с климатическими, погодными [9, 10] и антропогенными факторами [11]. Снежный покров и длительное время аккумуляции в нем загрязняющих веществ из атмосферы позволяют получить интегральный показатель загрязнения воздуха. По этой причине загрязнение снега часто используется в качестве индикатора загрязнения атмосферы в исследованиях [12]. Кроме того, в зимнее время обычно существенно снижается поступление частиц пыли в атмосферу от естественных источников (почвы, растений и т.п.), а возрастает доля частиц пыли от источников, произведенных человеком. В дополнение к этому загрязнение атмосферы в зимнее время существенно выше, что обусловлено снижением адвекции и конвекции воздуха, наличием температурных инверсий в атмосфере и т.п. [13]. Это, несомненно, увеличивает важность и точность подобных исследований в регионах с продолжительными периодами снегонакопления.

Целями исследования являются изучение и оценка объема, размера и морфологических характеристик частиц $PM_{0,1}$, накопленных в снежном покрове возле угольных карьеров. Данное исследование позволит впервые оценить пылевую нагрузку данной фракцией окрестностей угольных карьеров

Кемеровской области – Кузбасса. Размер выбранных частиц обусловлен наибольшей токсичностью данной пыли, ее высокой миграционной способностью и недостаточной изученностью для территорий Кузбасса.

Материалы и методы исследования

Мы изучали окрестности угольных карьеров, расположенных на территории Кузнецкого угольного бассейна (Кемеровская область – Кузбасс, РФ) (рис. 1).

Точки отбора проб снега располагались в присалаирской, центральной и приалатаусской зонах Кузбасса. Вмещающие каменный уголь породы относятся к каменноугольно-пермскому времени, имеют ритмичное строение и состоят из песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей, а в отдельных случаях – известняков. Данные породы перекрыты горизонтально залегающими неоген-четвертичными отложениями, представленными преимущественно суглинками. На данных карьерах производится добыча угля открытым способом. Общий ежегодный объем добычи угля различен и составляет до 15–20 млн т в год. Рельеф территории представлен преимущественно широкими речными долинами. Средние высоты составляют 240–260 м. Преобладающие ветры юго-западные и северные в зимнее время года. Среднегодовое количество осадков от 300–400 мм в год с максимумом в летнее время. Рельеф заметно изменился из-за деятельности человека, в основном из-за добычи угля. Почвы представлены преимущественно черноземом. Контрольные образцы отобраны вблизи пос. Кузбасский (К1) и пос. Красное (К2), которые расположены на расстоянии не менее 15 км от угледобывающих предприятий.

Пробы снега отбирались в 2020, 2021 гг. на участках 5х5 м согласно ГОСТ 17.1.5.05-85 на расстоянии 500–3250 м от источника пыли (угольные разрезы). Шаг между точками отбора проб – 500 м. Снег собирали в пластиковые бочки общим объемом 50 л. Пробы отбирали пластиковой трубой, изготовленной из химически стойкого полимерного материала. Чтобы уменьшить попадание частиц почвы в образец во время сбора снега, надземный слой снега толщиной примерно 5 см не отбирался в пробу. Оттаявшие образцы подвергали последовательной фильтрации с помощью мембранных нейлоновых фильтров размером 10, 2,5 и 0,1 мкм (CVS, Сэнфорд, Флорида, США) и вакуумной системы Sterifil (Merck KGaA, Дармштадт, Германия).

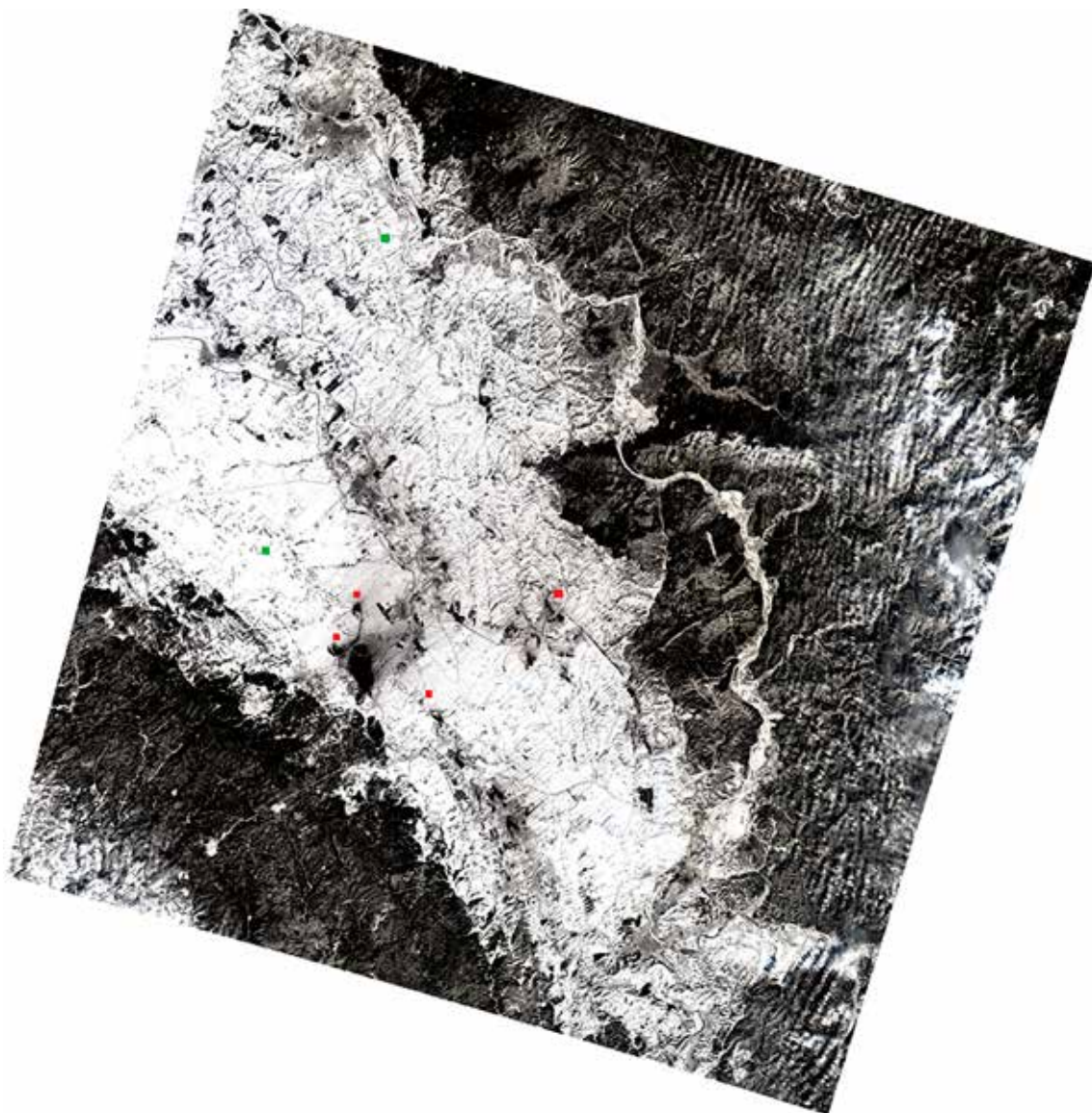


Рис. 1. Точки забора снега возле угольных карьеров и контрольных территорий: красные квадраты – точки около угольных карьеров, зеленые квадраты – контрольные точки

Завершающим этапом было получение суспензии $PM_{0,1}$ путем частичного концентрирования с использованием концентратора Erppendorf и вакуумного роторного концентратора (Erppendorf, Гамбург, Германия).

Изображения частиц менее 0,1 мкм были получены с помощью трансмиссионного электронного микроскопа (ТЭМ) JEOL JEM-2100 (JEOL LTD, Акишима, Япония) в режиме съемки: изображение в светлом поле и энергия пучка: 200 кэВ. Образцы $PM_{0,1}$ были диспергированы перед нанесением с помощью микропипетки на сетку с углеродным покрытием на предметных сте-

клах. Для этого использовали диспергатор Bandelin SONOPULS HD 2070 (BANDELIN, Берлин, Германия) с последующей обработкой ультразвуком до 2 мл в течение 10 мин при мощности 50% на шкале прибора (использовалась максимальная мощность используемого излучателя).

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице представлены результаты полученной массы пылевой фракции $PM_{0,1}$ и скорости ее накопления. Полученные данные по массе пыли и скорости ее накопления свидетельствуют о том, что

фракция пыли $PM_{0,1}$ способна мигрировать на достаточно большие расстояния от угольного карьера. Эти расстояния существенно превышают нормативные требования, составляющие 1 км, для возможного размещения жилой зоны. Контрольные точки наблюдения имеют существенно меньше пыли ($PM_{0,1}$) в снегу, чем на участках возле угольных карьеров. Отсутствует ранее очевидная закономерность снижения пылевой нагрузки данной фракцией с расстоянием от карьера.

Такая ситуация может быть связана с вторичным переносом уже осевших частиц пыли вместе со снегом, пока они не попадут в наиболее выраженную седиментационную ловушку, которая обычно является крупной балкой с растительностью. Но данные результаты требуют дополнительной

проверки с более детальными площадными исследованиями. Таким образом, пылевая нагрузка на расстоянии 1–3 км показывает содержание пыли фракции $PM_{0,1}$ в 2–3 раза выше, чем на контрольных территориях. Можно предположить, что на интенсивность загрязнения пылевыми частицами отдельных участков ландшафтов в зимний сезон года большое влияние оказывает рельеф, в том числе микрорельеф, определяющий условия седиментации перевеиваемых снежных масс с пылью.

На рисунке 2 показаны фотографии пылевой фракции, полученной с помощью ТЭМ. Среди размеров частиц во фракции $PM_{0,1}$ преобладает размерность 0,5–0,6 мкм. Форма частиц часто вытянутая в одном направлении, но также встречаются и частицы формы, близкой к изометричной.

Характеристики извлеченной из снега пыли фракции $PM_{0,1}$

Угольные карьеры / Контроль	Точка отбора	Масса пыли, мкг/см ²	Скорость накопления, мкг/см ² *сутки	Расстояние до карьера, м
Бачатский	1	273,3	2,44	1250
	2	242,98	2,17	1300
	3	94,6	0,845	1480
	4	105	0,938	1800
	5	100,1	0,894	2180
	Ср.	163,196	1,457	1602
Новобачатский	1	358,85	3,016	500
	2	149,49	1,256	1000
	3	125,13	1,052	1500
	4	122,31	1,028	2000
	5	158,08	1,328	2500
	Ср.	182,772	1,536	1500
Пермяковский	1	131,03	1	1250
	2	89,87	0,686	1750
	3	199,23	1,521	2250
	4	86,54	0,661	2750
	5	212,82	1,625	3250
	Ср.	143,898	1,099	2250
Бачатский – 2	1	378	2,759	500
	2	482,5	3,522	1000
	3	351,5	2,566	1500
	4	290,5	2,120	2000
	5	295,5	2,157	2500
	Ср.	359,6	2,665	1500
Контроль 1 (пос. Кузбасский)	1	109,74	0,998	>15000
Контроль 2 (пос. Красное)	1	86,73	0,789	>25000

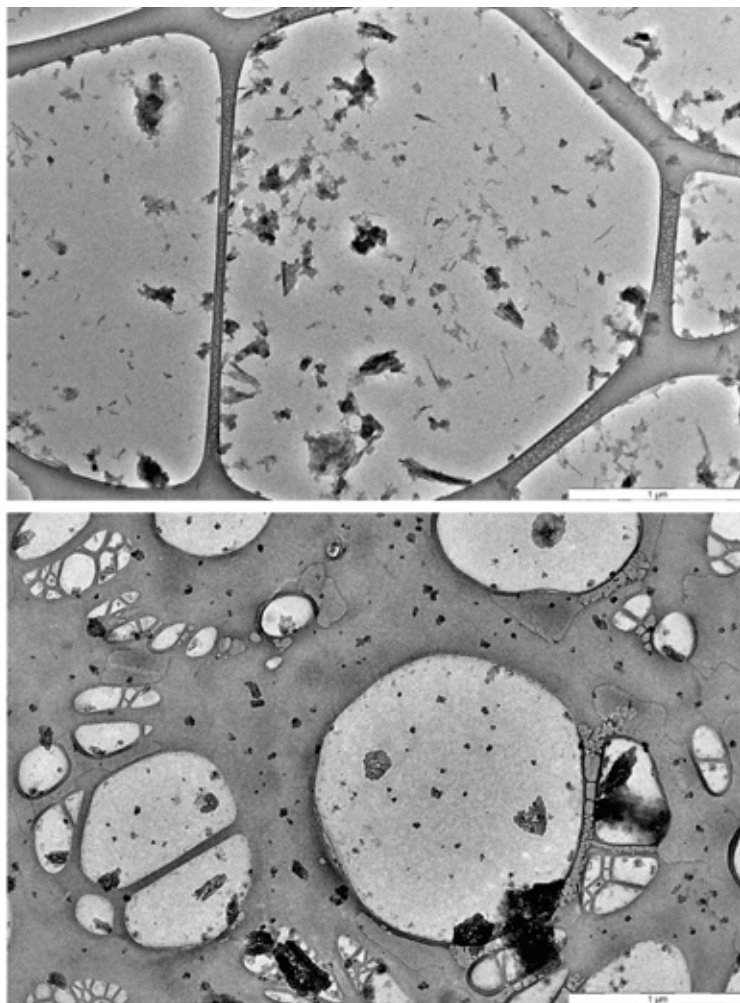


Рис. 2. ТЭМ-фото пылевой фракции $PM_{0.1}$ из окрестностей угольных карьеров

По ранее полученным данным рентгеновской, рамановской спектроскопии и рентгенофлуоресцентного анализа частицы пыли $PM_{0.1}$ представлены в основном кальцитом ($CaCO_3$), гипсом ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), а другие минеральные виды находятся в меньшем количестве. В другом исследовании отмечается присутствие кварца в пробах $PM_{0.1}$ [14]. Вследствие этого форма частиц связана со свойствами преобладающих минералов в пыли. Ранее установленный элементный состав показал присутствие Sr, Cu, Zn, Hf, Al, Mn, Zr, Rn [14]. Некоторые из них являются весьма токсичными для человека. Наблюдаемые в исследовании морфологические формы ТЧ, обладающие большой поверхностью, могут приводить к абсорбции на их поверхности металлов, полиароматических углеводородов (ПАУ) и других органических соединений, которые способны усиливать токсическое воздействие пыли, в том числе и на ДНК [15].

Выводы

В исследовании произведена оценка объема, размера и морфологических характеристик частиц $PM_{0.1}$, а также пылевой нагрузки данной фракцией в окрестностях четырех предприятий по добыче угля открытым способом и на двух контрольных территориях в пределах Кемеровской области – Кузбасса. Выявлено, что содержание пылевых частиц в снежном покрове вблизи мест открытой добычи угля существенно превосходит уровень данного показателя на контрольных территориях, не затронутых горнодобывающей деятельностью. Результаты исследований показали, что фракция пыли $PM_{0.1}$ способна мигрировать от источника на значительные расстояния, существенно превышающие размеры установленных санитарно-защитных зон. Кроме того, не выявлено закономерного изменения количества и состава пылевых частиц

указанной фракции от точки к точке в зависимости от расстояния в пределах исследованной территории. Вероятно, твердые частицы фракции $PM_{0.1}$ способны переноситься на весьма существенные расстояния от источника во взвешенном в воздухе состоянии, а также путем переувлажнения снега. Можно предположить, что на интенсивность загрязнения пылевыми частицами локальных участков ландшафтов в зимнее время большое влияние оказывают микро-рельеф и микроусловия седиментации. В гранулометрическом отношении господствовали частицы размером 0,5–0,6 мкм вытянутой и изометричной формы, часто со сложной поверхностью, преимущественно кальцитового состава. Сложная форма поверхности, благоприятная для адсорбции большого количества различных компонентов, в совокупности с выявленным содержанием тяжелых металлов является фактором, потенциально определяющим их токсичность для человека и различных компонентов экосистем. Для более полного установления пространственных особенностей пылевого загрязнения, факторов, определяющих накопление в снежном покрове частиц фракции $PM_{0.1}$, перспективны дальнейшие исследования с углубленной детальностью и расширенной площадью.

Список литературы

1. Luong L.T.M., Dang T.N., Thanh Huong N.T., Phung D., Tran L.K., Van Dung D., Thai P.K. Particulate Air Pollution in Ho Chi Minh City and Risk of Hospital Admission for Acute Lower Respiratory Infection (ALRI) among Young Children. *Environ. Pollut.* 2020. V. 257. 113424. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113424.
2. Priyankara S., Senarathna M., Jayaratne R., Morawska L., Abeysundara S., Weerasooriya R., Knibbs L.D., Dharmage S.C., Yasaratne D., Bowatte G. Ambient PM_{2.5} and PM₁₀ Exposure and Respiratory Disease Hospitalization in Kandy, Sri Lanka. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021. № 18. P. 9617. DOI: 10.3390/ijerph18189617.
3. Bulejko P., Adamec V., Škeřil R., Šchüllerová B., Bencko V. Levels and Health Risk Assessment of PM₁₀ Aerosol in Brno, Czech Republic. *Cent. Eur. J. Public Health*. 2017. № 25. P. 129–134. DOI: 10.21101/cejph.a4495.
4. Ljungman P.L.S., Andersson N., Stockfelt L., Andersson E.M., Nilsson Sommar J., Eneroth K., Gidhagen L., Johansson C., Lager A., Leander K. et al. Long-Term Exposure to Particulate Air Pollution, Black Carbon, and Their Source Components in Relation to Ischemic Heart Disease and Stroke. *Environ. Health Perspect.* 2019. № 127. P. 107012. DOI: 10.1289/EHP4757.
5. Roy D., Singh G., Seo Y.-C. Carcinogenic and Non-Carcinogenic Risks from PM₁₀-and PM_{2.5}-Bound Metals in a Critically Polluted Coal Mining Area. *Atmos. Pollut. Res.* 2019. № 10. P. 1964–1975. DOI: 10.1016/j.apr.2019.09.002.
6. Cortes-Ramirez J., Naish S., Sly P., Jagals P. Mortality and Morbidity in Populations in the Vicinity of Coal Mining: A Systematic Review. *BMC Public Health*. 2018. № 18. P. 721. DOI: 10.1186/s12889-018-5505-7.
7. Perrone M.G., Vratolis S., Georgieva E., Török S., Šega K., Veleva B., Osán J., Bešlić I., Kertész Z., Pernigotti D. et al. Sources and Geographic Origin of Particulate Matter in Urban Areas of the Danube Macro-Region: The Cases of Zagreb (Croatia), Budapest (Hungary) and Sofia (Bulgaria). *Sci. Total Environ.* 2018. № 619–620. P. 1515–1529. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.092.
8. Richardson C., Rutherford S., Agranovski I.E. Open Cut Black Coal Mining: Empirical Verification of PM_{2.5} Air Emission Estimation Techniques. *Atmos. Res.* 2019. № 216. P. 151–159. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.10.008.
9. Brzezina J., Kőbölővá K., Adamec V. Nanoparticle Number Concentration in the Air in Relation to the Time of the Year and Time of the Day. *Atmosphere*. 2020. № 11. P. 523. DOI: 10.3390/atmos11050523.
10. Dedele A., Miškinyte A. Seasonal and Site-Specific Variation in Particulate Matter Pollution in Lithuania. *Atmos. Pollut. Res.* 2019. № 10. P. 768–775. DOI: 10.1016/j.apr.2018.12.004.
11. Krupnova T.G., Rakova O.V., Struchkova G.P., Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Gavrilkina S.V., Bulanov A.V., Yakimova O.N. Insights into Particle-Bound Metal(Loid)s in Winter Snow Cover: Geochemical Monitoring of the Korkinsky Coal Mine Area, South Ural Region, Russia. *Sustainability*. 2021. № 13. P. 4596. DOI: 10.3390/su13094596.
12. Talovskaya A.V., Volodina D.A., Yazikov E.G. Macroelement and Mineral-Phase Composition of Particulate Matter in the Impacted Area of Cement Production Plant Based on Snow Cover Study (Kemerovo Region). *CSD*. 2019. P. 180–189. DOI: 10.15372/CSD2019126.
13. Alfonsi L.L., Macri P., Nazzari M. Rock Magnetic and Micro-Morphological Analysis on Snow Deposits: Recognition of Anthropogenic Origin of Particulate Matter in Urban and Wilderness Areas (Central Italy). *Ann. Geophys.* 2021. № 64. GM215. DOI: 10.4401/ag-8515.
14. Larionov A., Volobaev V., Zverev A., Vdovina E., Bach S., Schetnikova E., Leshukov T., Legoshchin K., Eremeeva G. Chemical Composition and Toxicity of PM₁₀ and PM_{0.1} Samples near Open-Pit Mines and Coal Power Stations. *Life* 2022. № 12. P. 1047. DOI: 10.3390/life12071047.
15. Leshukov T., Legoshchin K., Yakovenko O., Bach S., Russakov D., Dimakova D., Vdovina E., Baranova E., Avdeev K., Kolpina E. et al. Fractional Composition and Toxicity Coal-Rock of PM₁₀-PM_{0.1} Dust near an Opencast Coal Mining Area and Coal-Fired Power Station. *Sustainability*. 2022. № 14. P. 16594. DOI: 10.3390/su142416594.