

Научная статья

УДК 622.411.5:622.33

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-4-43-51

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ
АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПЫЛИ КАМЕННОГО УГЛЯ,
ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ТРАНСПОРТИРОВКЕ И
ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЯ**Журавлева Екатерина Владимировна¹Красилова Вера Алексеевна²Журавлева Наталья Викторовна^{1,3,4}¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»³Западно-Сибирский испытательный центр⁴Сибирский государственный индустриальный университет

*для корреспонденции: katezhurav@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

11 августа 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 августа 2022 г.

Принята к публикации:

31 августа 2022 г.

Ключевые слова:

перевалка угля, пыль
каменноугольная, взвешенные
частицы PM10 и PM2,5 в
атмосферном воздухе,
полициклические
ароматические углеводороды,
ПАУ, лазерная гранулометрия,
газовая хромато-масс-
спектрометрия,
канцерогенность

Аннотация.

Образование угольной пыли при транспортировке и переработке углей может приводить к существенному загрязнению окружающей среды. В зарубежных исследованиях, направленных на изучение проблем экологической безопасности, уголь и пыль каменного угля рассматривается как потенциальный источник поступления в водную среду токсичных микроэлементов, а также ПАУ. Данная работа содержит результаты определения ПАУ и гранулометрического состава пыли каменного угля, образующейся на предприятии по перевалке угля. В исследуемых образцах пыли методом ГХ-МС идентифицированы и количественно определены канцерогенные соединения класса ПАУ, в том числе нафталин и бенз(а)пирен, нормируемые в РФ. Содержание $\Sigma 14$ ПАУ в исследуемых образцах пыли каменного угля составляет от 41,37 до 119,48 мг/кг. Методом лазерной дифракции установлено, что содержание частиц, наиболее опасных с точки зрения загрязнения воздуха (PM10 и PM2,5), составляет в представленных образцах более 30 %. Необходимо учитывать, что предприятия по перевалке угля являются источником поступления в окружающую среду тонкодисперсных частиц, содержащих канцерогенные соединения класса ПАУ. Разрабатываемые программы производственного экологического контроля на данных предприятиях должны включать определение частиц PM2,5 и PM10, а также содержание представителей соединений класса ПАУ.

Для цитирования: Журавлева Е.В., Красилова В.А., Журавлева Н.В. Определение концентрации полициклических ароматических углеводородов в пыли каменного угля, образующейся на предприятиях по транспортировке и переработке угля // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 4 (152). С. 43-51. doi: 10.26730/1999-4125-2022-4-43-51

За последнее десятилетие добыча угля в России увеличилась на 31% (с 314 до 410 млн т); объем экспортных поставок вырос на 89%, а доля экспорта в структуре отгрузки превысила 50%.

Большая часть отгрузки угля на экспорт (71% в 2017 г.) осуществляется через морские портовые терминалы, которые являются ключевым звеном в схеме поставок. Однако увеличение перевалки угля привело к сопутствующему росту нагрузки на окружающую среду [1]. Рост нагрузки на окружающую среду происходит преимущественно за счет выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, сброса их в водные объекты, а также образования отходов.

Одним из ключевых факторов является пыль каменного угля, которая, поступая в атмосферный воздух, может загрязнять акватории портов. Угольная пыль на морских терминалах образуется в основном при механическом воздействии на уголь, в процессе перегрузки, а также вследствие ветровой эрозии открытых штабелей угля.

Основной состав взвешенных веществ (угольной пыли), поступающих в атмосферу в процессах добычи, переработки, транспортировки и складирования угля, состоит из неорганической части, представленной основными порообразующими оксидами, токсичными элементами, минеральными частицами PM_{2,5} и PM₁₀, а также органических веществ, в состав которых входят сажа (углерод), органическое вещество угля, бенз(а)пирен и другие полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) [2, 3, 4].

Угольная пыль может являться потенциальным источником загрязнения почв за счет частичной эмиссии макро- и микроэлементов в поверхностные и подземные воды, а также в связи с возможностью накопления в почвах ПАУ выше нормируемых концентраций [5, 6, 7]. Большинство соединений данного класса – очень устойчивые соединения, которые могут аккумулироваться в объектах окружающей среды; обладают канцерогенным, мутагенным, тератогенным и биостимуляторным воздействием на организм [8, 9].

В зарубежных исследованиях, направленных на изучение проблем экологической безопасности, уголь и пыль каменного угля рассматриваются как потенциальные источники поступления в водную среду токсичных микроэлементов, а также ПАУ [10].

В результате различных поступлений в окружающую среду угольная пыль часто встречается в морских донных отложениях. Авторами [11] была обнаружена четкая корреляция между содержанием ПАУ, которые могут применяться в качестве индикатора источника ртути, и ртутью в наземных и морских отложениях, а также в морской биоте Арктики. Для количественной оценки воздействия местных источников в исследовании изучался градиент загрязнения ртутью от наземной угольной шахты до окружающей прибрежной среды.

Наибольшее количество угля в морской среде локализуется в непосредственной близости от хранилищ, пунктов погрузки в странах-производителях и импортерах угля; вблизи территорий размещения отходов добычи и переработки; вдоль морских путей и в районах, принимающих сбросы с хвостохранилищ, в которых происходит добыча угля [12].

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании твердого топлива являются значительным источником многих загрязнителей воздуха, образующихся при его неполном сгорании. Авторами [13] предложено использовать термически обработанное твердое топливо, что позволит снизить концентрацию пыли, общего органического углерода и ПАУ до 50 раз, тем самым уменьшить загрязненность атмосферного воздуха в городах.

Вопросы достоверной оценки воздействия угольной пыли на состав почв в части возможности их загрязнения ПАУ являются в настоящее время актуальной проблемой.

Для изучения содержания ПАУ в почве в непосредственной близости от угольного разреза Пиншо (Китай) было отобрано 11 проб в промышленном районе и 9 проб с различными типами землепользования в почвенных профилях (0–100 см). В верхнем слое почвы (0–20 см) концентрации 16 ПАУ колебались от 2,15 до 33,51 мг/кг при среднем значении 11,93 мг/кг. ПАУ были более изменчивы в среднем слое почвы (20–50 см) и колебались от 0,199 до 36,888 мг/кг при среднем значении 9,21 мг/кг. Сопоставимые экстремальные концентрации были обнаружены в пробах в подпочвенном слое (50–100 см). Концентрации большинства индивидуальных ПАУ в пахотном слое почвы были выше, чем в среднем слое почвы и недрах [14].

Таблица 1. Распределение частиц по размерам в угольной пыли классов крупности (0–2,5) мкм; (2,5–10) мкм; (10–50) мкм.

Table 1. Particle size distribution in coal dust of size classes (0–2,5) μm ; (2,5–10) μm ; (10–50) μm .

№ образца	Распределение частиц по размерам, %		
	0–2,5 мкм	2,5–10 мкм	10–50 мкм
1	5,93	22,13	62,11
2	4,28	22,22	66,68
3	5,11	25,04	65,86
4	4,84	26,04	66,68
5	6,40	25,62	64,03
6	8,10	26,85	60,10

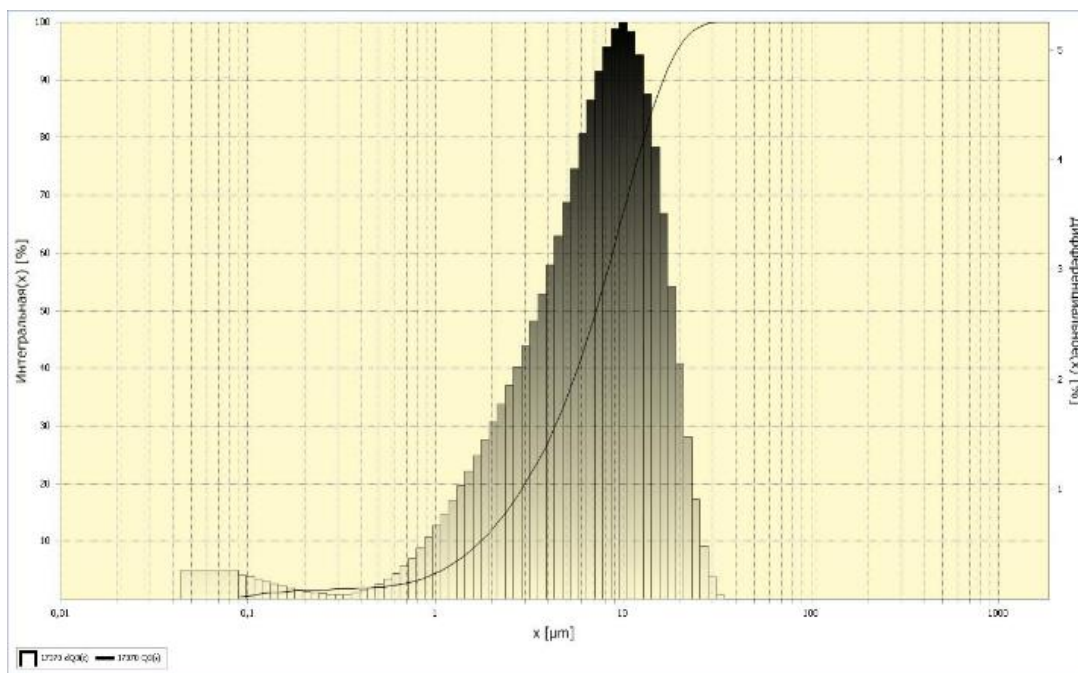


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц по размерам образца угольной пыли № 3

Fig. 1. Particle size distribution histogram of coal dust sample № 3

В работе [15] были проведены мониторинговые исследования содержания ПАУ в органогенных горизонтах почв и растениях нижнего яруса южной тундры в зоне действия угледобывающего предприятия (шахта «Воркутинская») в 2013 и 2015 годах. Для извлечения ПАУ из почв и растений использовали систему ускоренной экстракции растворителями ASE-350 (Thermo Fisher Scientific, США). Методом ВЭЖХ в органогенных горизонтах почв, растениях и лишайниках исследованных участков было идентифицировано 13 соединений класса ПАУ. Основным источником ПАУ в почвах и растениях в данном случае была угольная пыль. Среди исследованных видов растений наибольшим накоплением полиаренов в условиях загрязнения отличался мох *Pleurozium schreberi*, который в силу своей широкой распространенности и способности к активной аккумуляции ПАУ может быть использован в целях биоиндикации уровня загрязнения в зонах действия угледобывающей промышленности.

В исследовании [16] для оценки источника, уровня и пространственного распределения ПАУ при сжигании угля выявлена закономерность между физико-химическими характеристиками данных углеводородов и стабильностью изотопного состава ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$). Установлено, что концентрации ПАУ в образцах дорожной пыли вблизи ТЭЦ были значительно выше, чем в других районах города. Концентрации $\Sigma 16$ ПАУ были в диапазоне от 605,5 до 25374,3 нг/г при средней концентрации 4083,0 нг/г. Концентрация изотопов $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в дорожной пыли в сочетании с анализом основных компонентов, а также диагностические соотношения ПАУ были использованы авторами для установления локальных источников загрязнения.

Данная работа содержит результаты определения концентрации ПАУ и гранулометрического состава пыли каменного угля. Нами были отобраны 6 образцов пыли каменного угля, образующейся при улавливании ее в аспирационных установках предприятия по перевалке углей.

Метод лазерной дифракции

Для оценки доли наиболее опасных классов (PM_{2,5} и PM₁₀) используют различные методы определения гранулометрического состава. Для тонкодисперсных материалов, к которым можно отнести угольную пыль, наиболее информативным и достоверным является метод лазерной дифракции. Определение гранулометрического состава порошков угля методом лазерной дифракции проводили с использованием анализатора размера частиц *Analysette 22 MicroTec plus* («FRITSCH», Германия). Результаты исследования представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Пробы пыли содержат частицы с размерами менее 2,5 мкм от 4,28 до 8,10 %, с размерами 2,5-10 мкм от 22,13 до 26,85 %. Таким образом, содержание частиц, наиболее опасных с точки зрения загрязнения воздуха (PM₁₀ и PM_{2,5}), составляет в представленных образцах более 30%; максимальное содержание частиц пыли PM₁₀ и PM_{2,5} содержится в пробе № 6.

Газовая хромато-масс-спектрометрия (ГХ-МС)

Достоверность результатов определения содержания ПАУ в различных объектах зависит от стадии подготовки проб. Именно эта стадия вносит максимальную долю погрешности при количественном анализе.

Для извлечения ПАУ из проб пыли каменного угля использовалась экстракция дихлорметаном (ДХМ) в ультразвуковом поле с частотой 35 кГц в течение 20 мин с заменой растворителя на гексан.

Определение содержания ПАУ методом ГХ-МС выполнялось с использованием хромато-масс-спектрометра SCION SQ SELECT («Bruker», США) на капиллярной колонке BR-5MS 30×0,25×0,25, с квадрупольным анализатором и ионизацией электронным ударом [17]. Сканирование проводилось по ионам с массами, соответствующими массам молекулярных ионов ПАУ и подтверждением идентификации с помощью масс-спектральной библиотеки NIST. Данным методом удалось достичь полного разделения хроматографических пиков и количественно идентифицировать ароматические соединения.

По результатам, представленным в таблице 2, видно, что содержание $\Sigma 14$ ПАУ в исследуемых образцах пыли каменного угля меняется от 41,37 до 119,48 мг/кг. Большой вклад в

Таблица 2. Содержание соединений класса ПАУ в исследуемых образцах угольной пыли
Table 2. PAHs content in studied coal dust samples

№п /п	Соединения класса ПАУ	Содержание ПАУ, мг/кг					
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
1	нафталин	20,83	22,44	35,01	26,55	27,21	12,42
2	аценафтен	0,45	0,67	0,97	1,53	0,54	0,35
3	флуорен	2,47	2,63	4,73	2,58	2,73	1,63
4	фенантрен	8,84	8,24	22,56	15,70	13,50	7,00
5	антрацен	1,53	1,55	2,96	2,53	2,34	1,29
6	флуорантен	4,38	5,27	14,91	7,35	9,27	4,14
7	пирен	3,01	3,10	11,19	7,53	6,75	2,37
8	бенз(а)антрацен	1,79	2,03	5,15	5,29	4,56	2,28
9	хризен	3,93	4,05	7,67	11,08	6,39	3,09
10	бенз(б)флуорантен	0,18	0,25	0,49	0,31	0,40	0,17
11	бенз(к)флуорантен	0,67	0,85	1,77	2,17	1,91	0,93
12	бенз(а)пирен	4,25	6,31	9,66	8,25	8,65	4,52
13	дибенз(а,в)антрацен	0,12	0,14	0,27	0,75	0,39	0,16
14	бенз(г,и)перилен	0,77	1,17	2,16	2,58	2,43	1,03
$\Sigma 14$ ПАУ		53,21	58,69	119,48	94,18	87,04	41,37

суммарное содержание ПАУ вносит нафталин – до 40% от общего содержания; максимальная его концентрация обнаружена в образце № 3 и составляет 35,01 мг/кг.

В пробах обнаружено канцерогенное вещество – бенз(а)пирен, содержание которого в экстрактах угольной пыли находится в диапазоне от 4,25 до 9,66 мг/кг (от 8 до 11% от общего содержания ПАУ в образце).

Наиболее распространенными и устойчивыми представителями данного класса соединений являются фенантрен, флуорантен, пирен и хризен. Максимальные концентрации флуорантена и пирена, 4-ядерных представителей класса ПАУ, в образце № 3 составляют 14,91 мг/кг и 11,19 мг/кг соответственно. Доля фенантрена составляет от 14 до 19% от суммы общего количества обнаруженных ПАУ. Поскольку фенантрен достаточно стабилен, он может быть использован в качестве реперного соединения для оценки канцерогенного воздействия угольной пыли на окружающую среду.

В настоящее время разрабатываются и реализуются программы мероприятий для снижения негативных воздействий угольной пыли на окружающую среду при перевалке угля.

В 2020 г. в РФ законодательно закреплено понятие «закрытая перевалка угля». В 2021 г. в Госдуму внесен законопроект о внесении изменения в закон «Об охране окружающей среды ст. 551 «Требования в области охраны окружающей среды при осуществлении погрузочно-разгрузочных работ по перевалке угля в морских портах, ведущей к негативному воздействию угольной пыли» [18]. Предприятиями осуществляется поэтапный переход на технологию закрытой перевалки угля. При этом особое внимание уделяется проблеме снижения пыления угля.

Однако следует учитывать, что предприятия по перевалке угля являются источником поступления в окружающую среду тонкодисперсных частиц, содержащих канцерогенные соединения класса ПАУ. Разрабатываемые программы производственного экологического контроля на данных предприятиях должны включать определение частиц PM_{2,5} и PM₁₀, а также содержание представителей соединений класса ПАУ, нормируемых в РФ (нафталина и бенз(а)пирена).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Департамента образования и науки Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-45-420020/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический доклад «Экономические и экологические проблемы развития российских угольных терминалов» [Электронный ресурс] // Институт проблем естественных монополий. 2018. Режим доступа: http://www.ipem.ru/files/files/research/20181001_research_coal_terminals.pdf. - [01.08.2022].
2. Журавлева Н. В., Хабибулина Е. Р., Журавлева Е. В., Михайлова Е. С., Исмагилов З. Р. Вопросы контроля концентраций углеродсодержащей пыли в атмосферном воздухе в зоне действия предприятий по добыче и переработке углей // Вестник КузГТУ (ISSN: 1999-4125). 2020. № 3 (139). С. 33-44. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-33-44.
3. Журавлева Н. В., Хабибулина Е. Р., Исмагилов З. Р., Потокина Р. Р., Созинов С. А. Изучение взаимосвязи строения ископаемых углей и содержания в них полициклических ароматических углеводородов // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. № 3. С. 355-361.
4. Журавлева Е. В., Журавлева Н. В., Михайлова Е. С., Созинов С. А., Исмагилов З. Р. Изучение гранулометрического и морфологического состава угольных порошков // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 5. С. 539-549. DOI: 10.15372/KhUR2021330.
5. Jiang C. [et al.] Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in a coal mining area, China // Ecological Indicators. 2022. Vol. 136(2) P. 108683. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108683.
6. Ya-hui Q. [et al.] Quantitative method of alkyl polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of coal mines // Journal of Chinese Mass Spectrometry Society. 2022. Vol. 43. № 2. P. 168-177. DOI: 10.7538/zpxb.2021.0065.
7. Yuan Z. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riparian soils of the middle reach of Huaihe River: A typical coal mining area in China // Soil and Sediment Contamination. 2022. DOI: 10.1080/15320383.2022.2074370.
8. Савченко Я. А., Минина В. И., Баканова М. Л., Глушков А. Н. Генотоксические и канцерогенные эффекты воздействия факторов производственной среды угледобывающей и углеперерабатывающей индустрии // Генетика. 2019. Том 55. № 6. С. 643-654. DOI: 10.1134/S0016675819060158.
9. Foà V. [et al.] Non-bioavailability of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons contained in coal dust //

Med Lav. 1998. 89(1). P. 68-77.

10. Sanchez J. O. Coal as a marine pollutant: dissertations. World Maritime University. 2014. 131 P.

11. Steenhuisen F., Heuvel-Greve M. Exposure radius of a local coal mine in an Arctic coastal system; correlation between PAHs and mercury as a marker for a local mercury source // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. Vol. 193. P. 499. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09287-5>.

12. Журавлева Е. В., Михайлова Е. С., Журавлева Н. В., Исмагилов З. Р. Полициклические ароматические углеводороды из углей в объектах окружающей среды // Химия в интересах устойчивого развития (ISSN 0869-8538). 2020. Т. 28. № 3. С. 328–337. DOI: 10.15372/KhUR2020237.

13. Muzyka R. [et al.] Chemometric analysis of air pollutants in raw and thermally treated coals – Low-emission fuel for domestic applications, with a reduced negative impact on air quality // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 281. 111787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111787>.

14. Liu X. [et al.] Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil profiles (0–100 cm) from the industrial district of a large open-pit coal mine, China // The Royal Society of Chemistry. 2017. № 7. P. 28029-28037. DOI: 10.1039/c7ra02484c.

15. Яковлева Е. В., Габов Д. Н., Безносиков В. А. Временные изменения содержания полиаренов в почвах и растениях нижнего яруса южной тундры под воздействием угледобывающей промышленности // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 271-293. DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-271-293.

16. Xu B. [et al.] Polycyclic aromatic hydrocarbons in fine road dust from a coal-utilization city: Spatial distribution, source diagnosis and risk assessment // Chemosphere. 2022. 286:131555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131555>.

17. Журавлева Н. В., Михайлова Е. С., Журавлева Е. В., Исмагилов З. Р. Определение полициклических ароматических углеводородов в углях Кузнецкого угольного бассейна методом ГХ/МС // XI Всероссийская научная конференция и школа «Аналитика Сибири и Дальнего Востока», посвященная 100-летию со дня рождения И.Г. Юделевича (АСиДВ-11). XI Всероссийская Конференция (16-20 Августа, 2021 г., Новосибирск) [Электронный Ресурс]: Сборник тезисов докладов / ФГБУН Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН; под ред.: Цыганковой А.Р., Сапрыкина А.И. Новосибирск : ИНХ СО РАН, 2021. УДК 543. ISBN 978-5-901688-23-6. С. 105. DOI: 10.26902/ASFE-11_85.

18. Законопроект № 21275-8 «О внесении изменения в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» (в части установления требований в области охраны окружающей среды при перевалке угля в морских портах) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/21275-8>. - [01.08.2022].

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Журавлева Екатерина Владимировна, аспирант, Институт углехимии и химического материаловедения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18); katezhurav@yandex.ru

Красилова Вера Алексеевна, аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») (119049, Россия, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1); prosina.va@misis.ru

Журавлева Наталья Викторовна, доктор техн. наук, доцент Сибирского государственного индустриального университета (654006, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), научный руководитель Института углехимии и химического материаловедения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» (650000, Россия, г. Кемерово, пр-т Советский, 18), генеральный директор ЗАО «Западно-Сибирский испытательный центр» (654005, Россия, г. Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 9); natalia_zhuravleva62@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Журавлева Е.В. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; проведение пробоподготовки образцов угольной пыли (экстракция); выполнение измерений концентраций ПАУ методом ГХ-МС; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Красилова В.А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; выполнение исследований образцов угольной пыли методом лазерной дифракции; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Журавлева Н.В. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DETERMINATION OF THE POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS CONCENTRATION IN COAL DUST PRODUCED AT COAL TRANSPORTATION AND PROCESSING ENTERPRISES

Ekaterina V. Zhuravleva¹,
Vera A. Krasilova²,
Natalia V. Zhuravleva^{1,3,4}

¹ Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science

² NUST MISIS

³ West-Siberian Mining Test Center

⁴ Siberian State Industrial University

*for correspondence: katezhurav@yandex.ru



Article info

Submitted:

11 August 2022

Approved after reviewing:

30 August 2022

Accepted for publication:

31 August 2022

Keywords: coal transshipment, coal dust, suspended particles PM10 and PM2.5 in atmospheric air, polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs, laser granulometry, gas chromatography-mass spectrometry, carcinogenicity

Abstract.

The formation of coal dust during transportation and processing of coal leads to significant environmental pollution. Coal and coal dust are considered in foreign studies aimed at studying the problems of environmental safety as a potential source of toxic microelements and PAHs entering the aquatic environment. This work contains the results of the determination of PAHs and the granulometric composition of coal dust formed at the coal transshipment enterprise. Carcinogenic compounds of the PAHs class, including naphthalene and benz(a)pyrene, normalized in the Russian Federation, were identified and quantified in the dust samples studied by GC-MS method. The content of $\Sigma 14$ PAHs in the studied samples of coal dust ranges from 41.37 to 119.48 mg/kg. It has been established by laser diffraction that the content of the most dangerous particles in terms of air pollution (PM10 and PM2.5) is more than 30% in the presented samples. It should be taken into account that coal transshipment enterprises are a source of fine particles containing carcinogenic compounds of the PAHs class entering the environment. The developed industrial environmental control programs at these enterprises should include the determination of PM2.5 and PM10 particles, as well as the content of representatives of the PAHs class compounds.

For citation: Zhuravleva E.V., Krasilova V.A., Zhuravleva N.V. Determination of the polycyclic aromatic hydrocarbons concentration in coal dust produced at coal transportation and processing enterprises. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 4(152):43-51. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-4-43-51

REFERENCES

1. Analytical report «Economic and environmental problems of the development of Russian coal terminals» [Electronic resource] // Institute of Problems of Natural Monopolies. 2018. – Access mode: http://www.ipem.ru/files/files/research/20181001_research_coal_terminals.pdf. - [01.08.2022].
2. Zhuravleva N.V. Khabibulina E.R., Zhuravleva E.V., Mikhailova E.S., Ismagilov Z.R. Carbon-containing dust

concentrations control in the atmospheric air during coal mining and processing / N.V. Zhuravleva, // Bulletin of the Kuzbass State Technical University (ISSN: 1999-4125). 2020; 3(139):33-44. DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-33-44.

3. Zhuravleva N.V., Khabibulina E.R., Ismagilov Z.R., Potokina R.R., Sozinov S.A. Studies of the interconnection of the structure of fossil coal and the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in it. *Chemistry for Sustainable Development*. 2016; 24(3):P. 355-361.

4. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the granulometric and morphological composition of coal powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021; 29(5):525-535. DOI: 10.15372/CSD2021330.

5. Jiang C. [et al.] Distribution, source and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in a coal mining area, China. *Ecological Indicators*. 2022; 136(2):108683. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108683.

6. Ya-hui Q. [et al.] Quantitative method of alkyl polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of coal mines. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*. 2022; 43(2):168-177. DOI: 10.7538/zpxb.2021.0065.

7. Yuan Z. [et al.] Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in riparian soils of the middle reach of Huaihe River: A typical coal mining area in China. *Soil and Sediment Contamination*. 2022. DOI: 10.1080/15320383.2022.2074370.

8. Savchenko Ya., Minina V.I., Bakanova M.L., Glushkov A.N. Genotoxic and carcinogenic effects of exposure to factors of the production environment of the coal mining and coal processing industry. *Genetics*. 2019; 55(6):643-654. DOI: 10.1134/S0016675819060158.

9. Foà V. [et al.] Non-bioavailability of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons contained in coal dust. *Med Lav*. 1998; 89(1):68-77.

10. Sanchez J.O. Coal as a marine pollutant: dissertations. World Maritime University; 2014.

11. Steenhuisen F., Heuvel-Greve M. Exposure radius of a local coal mine in an Arctic coastal system; correlation between PAHs and mercury as a marker for a local mercury source. *Monitoring and Assessment*. 2021; 193:499. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09287-5>.

12. Zhuravleva E.V., Mikhailova E.S., Zhuravleva N.V., Ismagilov Z.R. Polycyclic aromatic hydrocarbons from coal in the objects of the environment. *Chemistry for sustainable development*. 2020; 28(3):328-335. DOI: 10.15372/CSD2020237.

13. Muzyka R. [et al.] Chemometric analysis of air pollutants in raw and thermally treated coals – Low-emission fuel for domestic applications, with a reduced negative impact on air quality. *Journal of Environmental Management*. 2021; 281:111787. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111787>.

14. Liu X. [et al.] Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soil profiles (0–100 cm) from the industrial district of a large open-pit coal mine, China. *The Royal Society of Chemistry*. 2017; 7:28029-28037. DOI: 10.1039/c7ra02484c.

15. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A. Temporal changes in the content of polyarenes in soils and plants of the lower layer of the southern tundra under the influence of the coal mining industry. *RUDN. Journal of Ecology and Life Safety*. 2017; 25(2):271-293. DOI 10.22363/2313-2310-2017-25-2-271-293.

16. Xu B. [et al.] Polycyclic aromatic hydrocarbons in fine road dust from a coal-utilization city: Spatial distribution, source diagnosis and risk assessment. *Chemosphere*. 2022; 286:131555. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131555>.

17. Zhuravleva N.V., Zhuravleva E.V., Mikhailova E.S., Ismagilov Z.R. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coals of the Kuznetsk coal basin by GC/MS. XI All-Russian scientific conference and school "Analytics of Siberia and the Far East", dedicated to the 100th anniversary of the birth of I.G. Yudelevich (ASiDV-11). [Electronic Resource]: Collection of abstracts / FGBUN Institute of Inorganic Chemistry. A.V. Nikolaev SB RAS; under the edit. of: Tsygankova A.R., Saprykina A.I. Novosibirsk: Institute of Inorganic Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2021. UDC 543. ISBN 978-5-901688-23-6. P. 105. DOI: 10.26902/ASFE-11_85.

18. Draft Law № 21275-8 «On Amendments to the Federal Law «On Environmental Protection» (in terms of establishing requirements in the field of environmental protection during coal transshipment in seaports) [Electronic resource] Access mode: <https://sozd.duma.gov.ru/bill/21275-8>. – [01.08.2022].

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Ekaterina V. Zhuravleva, Postgraduate, Institute of Coal Chemistry and Materials Science of the Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science (650000, Russia, Kemerovo, Soviet Avenue, 18); katezhurav@yandex.ru

Vera A. Krasilova, Postgraduate, NUST MISIS (119049, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, building 1); prosina.va@misis.ru

Natalia V. Zhuravleva, D.Sc. in Engineering, Leading Researcher of Siberian State Industrial University

(654006, Russia, Novokuznetsk, Kirova str., 42), scientific adviser of Institute of Coal Chemistry and Materials Science of the Federal Research Centre of Coal and Coal Chemistry Siberian Branch of the Russian Academy of Science (650000, Russia, Kemerovo, Soviet Avenue, 18), general Director of JSC West-Siberian Mining Test Center (654005, Russia, Novokuznetsk, Ordzhonikidze str., 93); natalia_zhuravleva62@mail.ru

Contribution of the authors:

Ekaterina V. Zhuravleva – setting a research task; scientific management; conducting sample preparation of coal dust samples (extraction); performing measurements of PAHs concentrations by GC-MS method; writing text, data collection and analysis; outputs; writing text.

Vera A. Krasilova – setting a research task; scientific management; performing studies of coal dust samples by laser diffraction; writing text, collecting and analyzing data; conclusions; writing text.

Natalia V. Zhuravleva – formulation of a research task; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of research; writing text, data collection and analysis; conclusions; writing text.

All authors have read and approved the final manuscript.

