

- Murcia, Spain. *Environmental Pollution*. 2018. Vol. 241. pp. 432–440.
30. Subbir Parvej, Dayakar L. Naik, Hizb Ullah Sajid, Ravi Kiran, Ying Huang et al. fugitive dust suppression in unpaved roads: State of the art research review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, Iss. 4. 2399. DOI: 10.3390/su13042399
31. LA-950 Laser Particle Size Analyzer. HORIBA. Available at: <https://www.horiba.com/details/la-950-laser-particle-size-analyzer-108/> (accessed: 15.06.2023).
32. Hadjiev A., Hadjiev P. On some methods for surface erosion control on tailings ponds and waste fly-ash piles. *50 years University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski" (1953–2003): Annual of the university of mining and geology "St. Ivan Rilski"*. Sofia, 2003. Vol. 46, Iss. 2. Mining and Mineral Processing. pp. 185–187.
33. Matveeva V. A., Smirnov Yu. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44, Iss. 5. pp. 1605–1618.
34. Amponsah-Dacosta F. A Field-scale performance evaluation of erosion control measures for slopes of mine tailings dams. *Proceedings of the 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference*. Santiago, 2015. Vol. 3. pp. 1419–1425.

УДК 622.85:622.411.52

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА, ЗАГРЯЗНЕННОГО УГОЛЬНОЙ ПЫЛЬЮ



М. А. ПАШКЕВИЧ,
проф., д-р техн. наук



А. А. ДУКА,
научный сотрудник, duka_aa@pers.spmi.ru

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Поступление угольной пыли в окружающую среду в процессе добычи, перевалки, транспортирования и складирования угля является серьезнейшей проблемой как в плане влияния на организм человека, так и при оценке воздействия на компоненты природной среды [1–10]. Потенциальная опасность угольной пыли для природных компонентов связана с ее морфометрическими показателями. Угольные частицы ввиду малых размеров (как правило, менее 10 мкм) и развитой удельной поверхности обладают сорбционной способностью, в том числе и по отношению к токсичным элементам [11–15]. Оседание угольной пыли инициирует процессы депонирования и перераспределения элементов в почвенно-растительном покрове. Наибольшей экологической опасностью характеризуются тяжелые металлы, присутствующие в составе пылевых частиц. Следует отметить, что их содержание в угольной

Описано воздействие промышленных объектов угольной отрасли на почвенно-растительный покров. Определены характеристики угольной пыли, проведен эксперимент по выращиванию растительных образцов в лабораторных условиях при различных уровнях пылевой нагрузки, проанализированы морфологические изменения, концентрации хлорофиллов и каротиноидов в растительной массе, состав почвенных и растительных образцов. Установлены зависимости изменения качества почв и растительности от количества вносимой в среду угольной пыли, определены пороговые значения пылевой нагрузки.

Ключевые слова: угольная промышленность, перевалка угля, угольная пыль, почвенно-растительный покров, биоаккумуляция, фотосинтетическая активность, поллютанты

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.10

массе изменяется в зависимости от геологического происхождения и способов обогащения углей. Помимо токсического действия на биообъекты, тяжелые металлы обладают устойчивостью к биологическому разложению и не удаляются из системы «почва–растение» [16–23].

Воздействие угольных частиц на почвенно-растительную среду происходит при помощи нескольких механизмов. В результате седиментации пыли из атмосферного воздуха в почвах и растительности протекают процессы аккумуляции ксенобиотиков. При этом оседание твердых частиц на наземную часть растений приводит к механическому перекрытию листовых пластин, что, в свою очередь, является причиной снижения фотосинтетической активности растительной массы [24–29].

В настоящее время отсутствуют исследования, в которых по совокупности критериев качества почвенно-растительного покрова был бы выработан комплексный подход к оценке экологической токсичности угольной пыли. В связи с этим как

в российской, так и в зарубежных нормативных базах количество поступающей угольной пыли в почвенно-растительную среду не регламентируется. Однако мониторинг качества почвенно-растительного покрова в условиях загрязнения угольной пылью необходим в целях установления величины антропогенной нагрузки в результате функционирования промышленного комплекса и оценки продуктивности территорий.

В связи с этим целью исследования являлась экологическая оценка техногенного воздействия угольной пыли на почвенно-растительный покров при функционировании объектов угольной отрасли.

Методология исследований

Для определения токсичности угольной пыли были проведены экспериментальные исследования по моделированию условий седиментации угольных частиц на почвенно-растительный покров. Эксперимент заключался в выращивании газонных трав в почвах в лабораторных условиях при периодическом внесении угольной пыли. В целях внесения поллютанта как в почвенную среду, так и на листовую поверхность растительности нанесение угольных частиц осуществляли с использованием пылевой камеры.

Первым этапом исследования стал отбор почвы и ее анализ для оценки возможности использования в целях эксперимента. Были определены pH и элементный состав. Величина pH составила 5,64. Следовательно, почва по кислотности ее среды характеризовалась как слабокислая. Почвы с кислотностью в интервале 5,5–7 pH имеют наиболее агрономически благоприятную структуру и оптимальный водный режим [30]. Элементный анализ проводили согласно М-МВИ-80-2008 «Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии». Для определения валового содержания элементов предварительно осуществляли разложение проб в микроволновой системе. Анализ выполняли при помощи атомно-эмиссионного спектрометра ICP-AES 9000. Полученные значения концентраций элементов сравнивали с нормативами их содержания в почвах согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Содержания элементов в почве не превысили установленных нормативов, следовательно, данную почву возможно использовать в качестве фоновой при проведении эксперимента.

Угольную пыль было решено получать путем измельчения товарного угля. Отбор проб проводили с угольного склада в соответствии с ГОСТ Р 59248–2020 «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний». Пробоподготовка образцов для проведения анализа заключалась в высушивании до воздушно-сухого состояния, квартовании, измельчении до крупности угольных частиц $\leq 0,2$ мм.

Таблица 1. Содержание макрокомпонентов

Оксид элемента	Массовая доля, %, на сухое состояние золы	Массовая доля, %, на сухое состояние угля
SiO ₂	57,95	30,68
Al ₂ O ₃	19,62	10,39
Fe ₃ O ₃	7,88	4,17
K ₂ O	6,40	3,39
CaO	2,57	1,36
SO ₃	2,01	1,06
MgO	1,24	0,66
TiO ₂	1,11	0,59
P ₂ O ₅	0,51	0,27
Na ₂ O	0,37	0,20
MnO	0,06	0,03
Остальное	0,28	0,15

Таблица 2. Содержание микроэлементов

Элемент	Массовая доля, %, на сухое состояние золы	Массовая доля, %, на сухое состояние угля
Ti	0,060	0,032
Ni	0,060	0,032
Sr	0,040	0,021
Cr	0,030	0,016
Cu	0,030	0,016
Pb	0,030	0,016
Zn	0,025	0,013
Co	0,005	0,003

Примечание. Относительная погрешность измерений составляет ± 30 % от содержаний в мг/кг.

Для определения таких характеристик, как зольность, влажность, выход летучих веществ, был проведен термogrавиметрический анализ. Данные о перечисленных показателях необходимы при определении состава угольных частиц, а также их свойств. Для анализа использовали термogrавиметрический анализатор LECO TGA-701. Анализ проводили по ГОСТ Р 52911–2020 «Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги», ГОСТ Р 55661–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение зольности» и ГОСТ Р 55660–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ». Результаты термogrавиметрического анализа объединенной пробы следующие: влажность $4,45 \pm 0,009$ %; зольность $50,59 \pm 0,101$ %; зольность на сухое состояние $52,95 \pm 0,106$ %; выход летучих веществ $21,5 \pm 0,043$ %; выход летучих на сухое состояние $22,5 \pm 0,045$ %.

Зольность угля на сухое состояние определяли по формуле $A' = 100A / (100 - W)$, где A – аналитическая зольность, %; W – влажность аналитической пробы, %.

Выход летучих на сухое беззольное состояние рассчитывали по формуле

$$V = 100W / (100 - W),$$

где V – выход летучих компонентов из пробы, %; W – влажность аналитической пробы, %.

Для комплексного изучения влияния угольных частиц на почвенно-растительный покров, в том числе для выявления процессов перераспределения и аккумуляции элементов, проведено определение элементного состава угля. Предварительно анализируемую пробу подвергали озолению в стандартных условиях при (815 ± 10) °С. Полученную золу истирали в агатовой ступке и спрессовывали. Анализ минеральной части осуществляли в соответствии с ГОСТ Р 55879–2013 «Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии». Содержание макрокомпонентов в зольном остатке угля представлено в **табл. 1**.

Содержание микроэлементов в составе зольного остатка определяли в соответствии с ГОСТ 32977–2014 «Топливо твердое минеральное. Определение микроэлементов в золе атомно-абсорбционным методом». Перед проведением анализа пробу угля подвергали озолению при 500 °С, измельчению и дальнейшему разложению в микроволновой системе. Анализ содержаний элементов в полученных растворах проводили при помощи атомно-абсорбционного спектрофотометра Квант-З.ЭТА. Результаты представлены в **табл. 2**.

Для получения пыли угольные образцы подвергали дроблению и измельчению. Для оценки соответствия полученных частиц размерам угольной пыли, образующейся в процессе добычи, сортировки, складирования и транспортирования углей, определяли гранулометрический состав при помощи лазерного анализатора распределения размеров частиц Horiba LA-950. Распределение частиц по фракциям представлено на **рис. 1**.

В процессе обзора научных трудов было выявлено, что размер угольных частиц, образующихся на предприятиях угольной отрасли, составляет 0,1–500 мкм. Следует учитывать, что пылевые частицы неравномерно распределены по фракциям: большая часть приходится на частицы размером менее 50 мкм [31–33]. Таким образом, полученная в результате

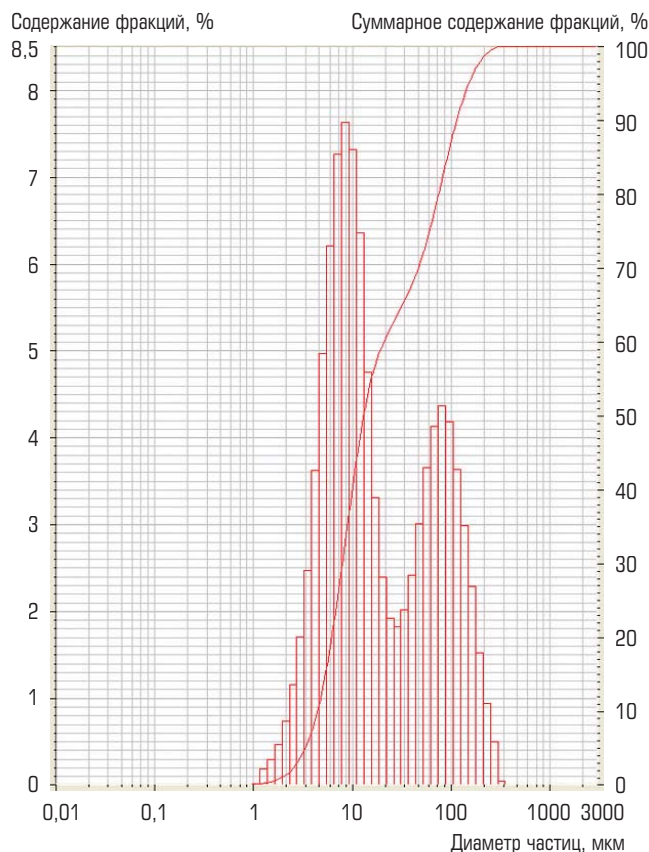


Рис. 1. Распределение полученных угольных частиц по фракциям

процессов дробления и измельчения угольная пыль удовлетворяет необходимой крупности.

Следующим этапом эксперимента являлась высадка растений в исследуемую почву.

Часть образцов подвергали исследованию путем внесения угольной пыли в почву до высаживания семян. Масса вносимой пыли соответствовала ее количеству, осевшему за месячный период с учетом различных значений пылевой нагрузки: 100, 250, 450, 850, 1500 мг/(м²·сут). Состав газонной смеси: мятлик луговой – 15 %; райграс пастбищный – 30 %; овсяница красная – 55 %. Обработку образцов

Таблица 3. Всхожесть семян

Пылевая нагрузка, мг/(м ² ·сут)	Всхожесть семян, %	Пылевая нагрузка, мг/(м ² ·сут)	Всхожесть семян, %	Всхожесть семян без внесения пыли, %	Нормативная всхожесть, %
С предварительным внесением угольной пыли в почву		Без предварительного внесения угольной пыли в почву		88,6	65
100	85,7	100	81,4		
250	77,1	250	72,9		
450	74,3	450	70,0		
850	72,9	850	68,6		
1500	72,9	1500	68,6		

Таблица 4. Морфологические признаки

Пылевая нагрузка, мг/(м ² ·сут)	Преждевременное увядание (усыхание), %	Изменение окраски (пожелтение), %
0 (фон)	–	–
<i>С предварительным внесением угольной пыли в почву</i>		
100	–	–
250	–	–
450	–	6,7
850	8,1	9,2
1500	9,1	11,1
<i>Без предварительного внесения угольной пыли в почву</i>		
100	–	–
250	–	–
450	–	–
850	–	6,7
1500	11,1	7,4

(за исключением фоновых) осуществляли угольной пылью 2 раза в неделю при следующих значениях создаваемой пылевой нагрузки: 100, 250, 450, 850, 1500 мг/(м²·сут). Значения выбраны на основе используемой в практике градации по среднесуточной пылевой нагрузке и по данным мониторинговых наблюдений [34].

Параметры микроклимата помещения, в котором проводили эксперимент: температура 20–25 °С; влажность 45–55 %; световой режим: 7:00–19:00 день, 19:00–7:00 ночь. Обработку угольной пылью осуществляли в течение всего вегетационного периода.

Для индикации негативного воздействия угольной пыли на растительный покров выбраны следующие показатели: всхожесть семян; морфологические признаки (несвойственное уменьшение/увеличение размеров органов растений, возникновение новообразований и деформаций, изменение окраски, наличие хлорозов, некрозов); содержание фотосинтетических пигментов в растительной массе. Всхожесть определяли спустя 14 дней после посадки, результаты представлены в табл. 3.

Преждевременное увядание (усыхание) и изменение окраски трав оценивали в процентах от общего количества организмов в горшке, иные признаки угнетения отсутствовали (табл. 4).

Кроме того, анализировали изменение высоты растений в зависимости от пылевой нагрузки. В образцах без предварительного внесения угольной пыли в почву при повышении пылевой нагрузки до 450 мг/(м²·сут) наблюдалось увеличение средней высоты растительных организмов. При превышении данного значения происходит снижение высоты. В образцах с предварительным внесением угольной пыли в почвы при пылевой нагрузке более 450 мг/(м²·сут) выявлено увеличение средней высоты трав при возрастании количества

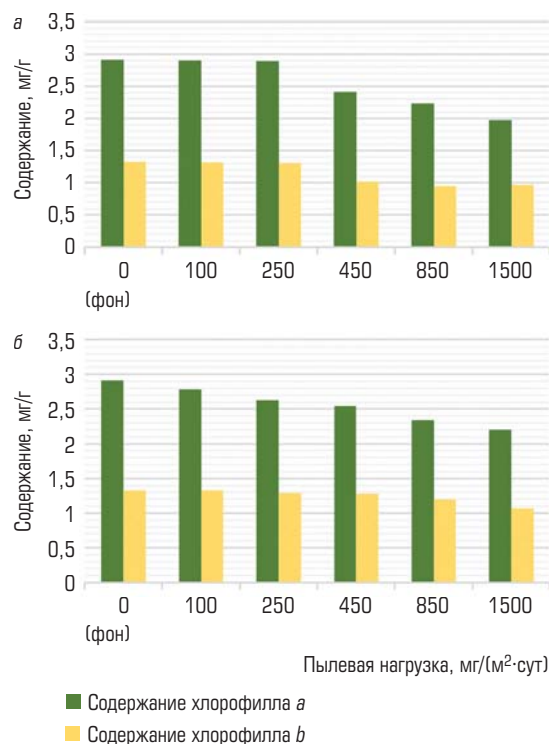


Рис. 2. Содержание хлорофилла в образцах с предварительным внесением угольной пыли в почву (а) и без предварительного ее внесения (б)

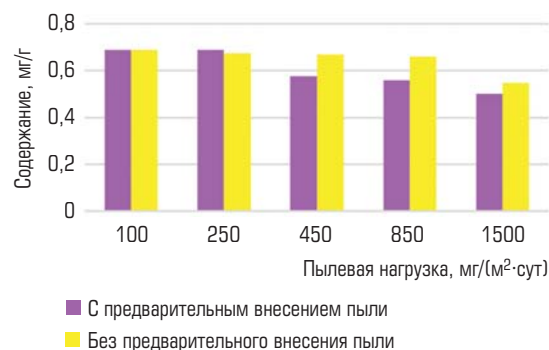


Рис. 3. Содержание каротиноидов в образцах

поступающей пыли. Однако стоит отметить, что высота растений во всех образцах меньше фонового значения.

Для оценки фотосинтетической активности образцов был проведен анализ содержания пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в растительной массе. Предварительно проводили экстракцию пигментов из растительной массы с использованием ацетона. Дальнейшим этапом исследований являлся количественный анализ экстракта, заключающийся в определении оптической плотности растворов с помощью спектрофотометра при длинах волн, соответствующих максимумам

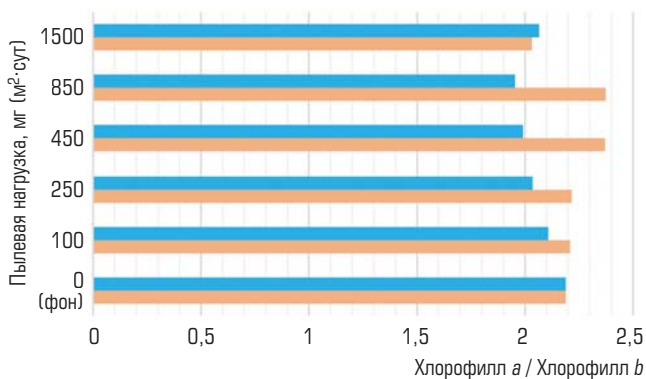


Рис. 4. Соотношение концентрации хлорофилла a к концентрации хлорофилла b

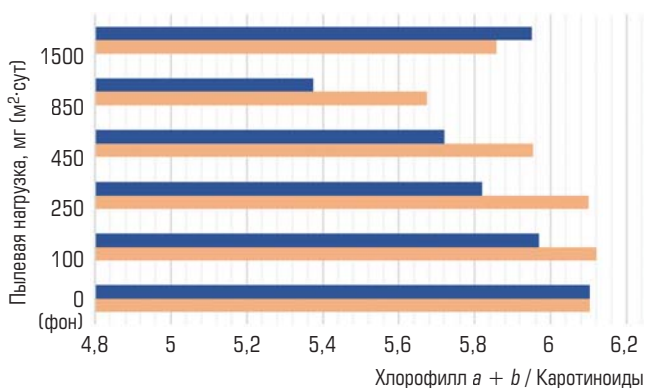


Рис. 5. Соотношение концентраций хлорофиллов и каротиноидов

поглощения определяемых пигментов. Полученные значения оптической плотности пересчитывали с помощью эмпирических формул на концентрации растворов и далее – в содержания на массу растений [35]. Результаты представлены на рис. 2, 3.

В качестве критерия при оценке фотохимической активности растений в практике используют отношение хлорофилла a к хлорофиллу b. Так как хлорофилл a является основным фотосинтезирующим пигментом, то при уменьшении данного соотношения можно говорить о снижении процессов фотосинтеза и образования хлорофилла b под воздействием негативных факторов.

Уменьшение содержания пигментов может быть связано и с их разрушением как в результате накопления ксенобиотиков в растительных организмах, так и снижения газового и водного обмена, уменьшения освещенности. На рис. 4 представлено изменение данного соотношения в зависимости от пылевой нагрузки.

Одним из показателей устойчивости растительности к влиянию факторов внешней среды является соотношение

Таблица 5. Коэффициенты биоаккумуляции

Пылевая нагрузка, мг/(м²·сут)	Коэффициент биоаккумуляции	
	Фосфор	Сера
<i>С предварительным внесением угольной пыли в почву</i>		
100	1,53	5,96
250	1,24	4,96
450	1,07	5,12
850	1,45	4,77
1500	1,46	4,76
<i>Без предварительного внесения угольной пыли в почву</i>		
100	1,47	6,02
250	1,34	4,79
450	1,37	5,54
850	1,60	4,71
1500	1,59	5,14

содержания хлорофиллов к содержанию каротиноидов. При негативном воздействии нарушается работа фотосинтетического аппарата, что приводит к снижению величины данного соотношения. Результаты расчетов данного показателя представлены на рис. 5.

В целях выявления процессов аккумуляции и перераспределения элементов в системе «почва–растение» проведен элементный анализ почвенных и растительных образцов. Анализ осуществляли при помощи атомно-эмиссионного спектрометра ICPE 9000 и атомно-абсорбционного спектрометра способом электротермической атомизации после предварительного разложения образцов. Для определения степени загрязнения почв поллютантами был выполнен расчет коэффициента контрастности относительно ПДК. Для элементов, чьи предельно допустимые концентрации в почвах не установлены, коэффициент контрастности рассчитывали относительно содержания в фоновой пробе:

$$K_{\text{ПДК}} = C_i / \text{ПДК}_i(\Phi),$$

где C_i – концентрация элемента в пробе; $\text{ПДК}_i(\Phi)$ – предельно допустимая концентрация загрязняющего вещества в почве.

Для выявления процессов накопления и перераспределения элементов в почвенно-растительной среде были рассчитаны коэффициенты биоаккумуляции: $K_b = C_i / C_n$, где C_i – концентрация элемента в растении; C_n – концентрация элемента в почве.

Коэффициенты аккумуляции элементов, значения которых равны или превысили 1, представлены в табл. 5.

Результаты исследований

В ходе эксперимента было выявлено, что всхожесть семян при внесении угольной пыли в среду ниже по сравнению с фоновыми значениями. Тем не менее следует отметить, что всхожесть семян, высаженных в почву, предварительно обработанную угольной пылью, превышает фоновую всхожесть.

Однако при увеличении пылевой нагрузки данные показатели снижаются. Несмотря на это, сопоставление полученных значений всхожести с нормативными по ГОСТ Р 52325–2005 «Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия» для репродукционных семян овсяницы красной (всхожесть 65 %) показало, что всхожесть во всех образцах удовлетворяет нормативу.

При анализе морфологических признаков установлено, что при пылевой нагрузке 450 мг/(м²·сут) и более наблюдаются такие признаки угнетения, как преждевременное увядание (усыхание) и пожелтение листовой пластины.

По данным анализа высоты растений можно сделать вывод, что при пылевой нагрузке менее 450 мг/(м²·сут) рост растений усиливается за счет внесения в почву угольной пыли, которая улучшает почвенные характеристики и является источником азота, серы и микроэлементов. При дальнейшем увеличении пылевой нагрузки лимитирующим показателем роста становится перекрытие угольными частицами листовой поверхности растения, что ухудшает водо- и газообмен, снижает фотосинтетическую активность. В образцах с предварительным внесением угольных частиц заметное увеличение высоты растений в условиях пылевой нагрузки более 450 мг/(м²·сут) объясняется тем, что эффект улучшения почвенных характеристик превалирует над эффектом механического перекрытия листовых пластин частицами. При добавлении в среду угольной пыли в количестве 450 мг/(м²·сут) и менее вышеописанные механизмы действия угольной пыли компенсируют друг друга, вследствие чего при увеличении пылевой нагрузки (до 450 мг/(м²·сут)) средние темпы роста растений не изменяются.

В ходе анализа элементного состава почвенных образцов не выявлена достоверная зависимость изменения концентрации анализируемых элементов при увеличении количества вносимой угольной пыли. Полученные результаты могут быть обусловлены слабокислой средой почвы. В кислых условиях элементы (такие как Mn, Cu, Co) образуют легкоподвижные соединения, а следовательно, интенсивнее мигрируют по почвенному профилю и не аккумулируются. Миграция биогенных элементов (таких как фосфор, кальций, калий, натрий, сера) может быть связана с процессами поглощения растительными организмами. В ходе анализа растительных

образцов было выявлено, что достоверно значимых различий в изменении содержания анализируемых элементов при изменении пылевой нагрузки не наблюдается.

Расчет коэффициентов биоаккумуляции продемонстрировал, что в растительности при внесении угольной пыли происходит накопление таких элементов, как фосфор и сера. Накопление фосфора может быть связано с тем, что в подкисленных почвах соединения фосфора переходят в доступную для растений форму. Накопление серы в растительном покрове происходит не только за счет корневого всасывания сульфатов из почвы, но и вследствие поступления окисленной серы через листовую поверхность.

Заключение

Оценка качества почвенно-растительного покрова, загрязненного угольной пылью, является одной из важнейших задач экологического мониторинга в зоне воздействия промышленных предприятий. Определение степени и механизмов воздействия пыли на рассматриваемый природный компонент позволяет отслеживать изменение продуктивности земель и выявлять пороговые значения пылевой нагрузки.

В ходе проведенных исследований сделаны следующие выводы.


1. При оценке морфологических признаков растительных образцов пороговым значением пылевой нагрузки является 450 мг/(м²·сут).

2. Внесение угольной пыли в почву оказывает положительное влияние на всхожесть и рост растений.

3. При увеличении вносимой в среду пыли происходит снижение фотосинтетической способности и устойчивости растений к влиянию внешних факторов. При анализе фотосинтетической активности пороговым значением является 250 мг/(м²·сут).

4. При внесении угольной пыли в растения происходит накопление таких элементов, как фосфор и сера.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 68–74
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.10

Ecological evaluation of top soil polluted with coal dust

Information about authors

M. A. Pashkevich¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences

A. A. Duka¹, Researcher, duka_aa@pers.spmi.ru

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Coal dust ingress in the environment during coal mining, handling and storage is a critical problem both in terms of health and ecology.

Potential hazard of coal dust for the environment components is connected with its quantitative characteristics. The aim of this study was the ecological evaluation of coal dust impact on top soil in the course of operation of coal industry facilities.

The authors describe the industry impact on top soil. The characteristics of coal dust are determined, and the experiment on handling of plant samples at different levels of dust burden is carried out on a laboratory scale.

The quality evaluation of top soil polluted with coal dust is one of the top priorities of ecological monitoring in the influence zones of industrial plants. Determination of a degree and mechanisms of impact exerted by dust on a nature component enables tracing the change in land productivity and allows revealing the threshold values of dust burden. The implemented research has some implications. In estimation of morphological characteristics of plant samples, the threshold of dust burden is 450 mg/(m²·day). The introduction of coal dust in soil has a beneficial effect on plant emergence and growth. High dust ingress reduces the photosynthetic capacity and resistance of plants to the external impacts. In the analysis of the photosynthetic capacity, the threshold value of dust burden is 250 mg/(m²·day). Given dust ingress, plants accumulate such elements as phosphorus and sulfur.

Keywords: coal industry, coal handling, coal dust, top soil, bioaccumulation, photosynthetic capacity, pollutants.

References

1. Teklit Zerizghi, Qingjun Guo, Liyan Tian, Rongfei Wei, Changqiu Zhao. An integrated approach to quantify ecological and human health risks of soil heavy metal contamination around coal mining area. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 814. 152653. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152653
2. Xiaoyang Liu, Huading Shi, Zhongke Bai, Wei Zhou, Kun Liu et al. Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coal mine pits in China. *Chemosphere*. 2020. Vol. 244. 125360. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125360
3. Md. Abu Bakar Siddique, Md. Kowsar Alam, Sayful Islam, Mir Talas Mahammad Diganta, Md. Ahedul Akbor et al. Apportionment of some chemical elements in soils around the coal mining area in northern Bangladesh and associated health risk assessment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2020. Vol. 14. 100366. DOI: 10.1016/j.enmm.2020.100366
4. Xin Xiao, Jixiong Zhang, Hui Wang, Xiaoxun Han, Jing Ma et al. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 713. 135292. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135292
5. Rudakov M. L., Duka N. E. Modeling acoustic effect exerted on personnel by operating equipment in underground coal mining. *GIAB*. 2021. No. 10. pp. 165–179.
6. Gendler S. G., Fazylov I. R., Abashin A. N. The results of experimental studies of the thermal regime of oil mines in the thermal method of oil production. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 248–262.
7. Askarova D. A. The level of dust exposure and accumulation of heavy metals in plants in conditions of Northern Kazakhstan. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2016. No. 5(60). pp. 264–265.
8. Robertus Yu. V., Lyubimov R. V., Kivatskaya A. V., Volostnov A. V., Osipova N. A. Ekologo-geochemical situation on the site of the Taldu-Djurgunsky coal deposit (Mountain Altai). *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2011. No. 3(28). pp. 348–352.
9. Khabibullina F. M., Kuznetsova E. G., Panyukov A. N. Transformation of vegetation, soils, and soil microbiota in the impact zone of the coal mine "Vorkutinskaya". *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015. No. 4. pp. 30–37.
10. Gendler S. G., Prokhorova E. A. Assessment of the cumulative impact of occupational injuries and diseases on the state of labor protection in the coal industry. *GIAB*. 2022. No. 10-2. pp. 105–116.
11. Zhiming Wang, Wei Zhou, Izhar Mithal Jiskani, Huaiting Luo, Zhongchen Ao et al. Annual dust pollution characteristics and its prevention and control for environmental protection in surface mines. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 825. 153949.
12. Chukaeva M. A., Matveeva V. A., Sverchkov I. P. Complex processing of high-carbon ash and slag waste. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 97–104.
13. Pashkevich M. A., Kharko P. A. The use of a composite mix to remove metals from acidic drainage waters at tailings facilities. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 4. pp. 40–47.
14. Golokhvast K. S., Chaika V. V., Nikiforov P. A., Blinovskaya Ya. Yu., Filonova E. A. et al. Influence of the large coal terminal on composition of atmospheric suspensions of the settlement. *Byulleten fiziologii i patologii dykhaniya*. 2015. No. 56. pp. 73–77.
15. Korshunov G. I., Safina A. M., Karimov A. M. Research and analysis of the sources of emission of respirable fraction of dust at the coal mines. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2021. No. 10. pp. 65–70.
16. Bechina I. N., Popova L. F., Vasileva A. I., Korobitsina Yu. S. Accumulation and distribution of heavy metals in Novodvinsk soils. *Nauchnyi dialog*. 2013. No. 3(15). pp. 7–25.
17. Barsukova V. S. Physiological and genetic aspects of resistance of plants to heavy metals. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzоров mirovoy literatury*. 1997. No. 47. pp. 1–67.
18. Zhuykova T. V., Zinnatova E. R. Accumulating capability of plants in areas anthropogenically polluted with heavy metals. *Povolzhskiy ekologicheskii zhurnal*. 2014. No. 2. pp. 196–207.
19. Maslennikov P. V., Dedkov V. P., Kurkina M. V., Vashcheykin A. S., Zhuravlev I. O. et al. Accumulation of metals in plants of urban ecosystems. *Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta*. 2015. No. 7. pp. 57–69.
20. Duka A. A. Alteration of top soil under the impact of coal industry. *Philosophy of Science : Scientific Reviews within the International Education and Research Program*. Saint-Petersburg : Sankt-Peterburgskiy gorniy universitet, 2022. pp. 138–147.
21. Smirnov Yu. D., Suchkov D. V., Danilov A. S., Goryunova T. V. Artificial soils for restoration of disturbed land productivity. *Eurasian Mining*. 2021. No. 2. pp. 92–96.
22. Alekseenko V. A., Shvydkaya N. V., Bech J., Puzanov A. V., Nastavkin A. V. Trace element accumulation by soils and plants in the North Caucasian geochemical province. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 141–153.
23. Sarapulova G. I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 388–392.
24. Wang Zhan-Yi, Hou Jia, Guo Jian-Ying, Wang Cheng-Jie. Coal Dust Reduce the Rate of Root Growth and Photosynthesis of Five Plant Species in Inner Mongolian Grassland. *Journal of Residuals Science and Technology*. 2016. Vol. 13, No. 2. pp. 63–73.
25. Shamaila Zia-Khan, Wolfram Spreer, Yang Pengnian, Xiaoning Zhao, Hussein Othmanli et al. Effect of dust deposition on stomatal conductance and leaf temperature of cotton in Northwest China. *Water*. 2015. Vol. 7, Iss. 1. pp. 116–131.
26. Yang Huiling, Wei Lingling, Ye Xuehua, Liu Guofang, Yang Xuejun et al. Effects of coal dust deposition on seedling growth of *Hedysarum laeve* Maxim., a dominant plant species on Ordos Plateau. *Acta Ecologica Sinica*. 2016. Vol. 36, No. 10. pp. 2858–2865.
27. Li Y., Zhao N., Cao Y., Yang J. Effects of coal dust deposition on the physiological properties of plants in an openpit coal mine. *Acta Ecologica Sinica*. 2018. Vol. 38, No. 22. pp. 8129–8138.
28. Meravi N., Singh P. K., Prajapati S. K. Seasonal variation of dust deposition on plant leaves and its impact on various photochemical yields of plants. *Environmental Challenges*. 2021. Vol. 4. 100166. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100166
29. Saltan N. V., Svyatkovskaya E. A., Shlapak E. P., Trostenyuk N. N., Gontar O. B. Changes in the photosynthetic activity of wood plants under a coal terminal environment. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2019. No. 2. pp. 68–74.
30. Mineev V. G., Sychev V. G., Gamzikov G. P., Sheudzhen A. Kh., Agafonov E. V. et al. *Agrochemistry : Textbook*. Moscow : Izdatelstvo VNIIA im. D. N. Pryanishnikova, 2017. 854 pp.
31. Rodionov V. A., Tsygankov V. D., Zhikharev S. Ya., Kormshchikov D. S. Research procedure for coal dust aerodynamics in long roadways. *GIAB*. 2021. No. 10. pp. 69–79. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_69
32. Gukova A. V. Research of coal dust properties. *Current Challenges in Construction, Municipal Housing Economy and Technosphere Safety : Proceedings of VI All-Russian Conference of Young Researchers with International Participation*. Volgograd : Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2019. pp. 156–158.
33. Krasilova V. A., Kossovich E. L., Gavrilova D. I., Kozyrev M. M. Laboratory installation for collection and concentration of airborne coal dust. *GIAB*. 2022. No. 6. pp. 121–130.
34. Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Investigation of the Possibility of Immobilization of Mobile Forms of Arsenic in Technogenic Soils. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 596–602. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.596
35. Saveleva E. S., Alykov N. M. Comparison of different extraction systems in spectrophotometric determination of photosynthetic pigments in leaves. *Izvestiya vuzov. Ser.: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2012. Vol. 55, No. 3. pp. 26–28.