

УДК 632.151:632.122.1

ДАЛЬНОСТЬ ВОЗДУШНОГО ПЕРЕНОСА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АММОФОСА. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАССЕЙНИЯ Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn В СОСТАВЕ ТЕХНОГЕННОЙ ПЫЛИ

© 2022 г. А. В. Литвинович¹, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев^{2,*}, В. М. Буре^{1,3}¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.07.2021 г.

После доработки 02.09.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Изучен состав техногенной пыли, отобранной из труб предприятия по производству аммофоса, расположенного в аридной зоне. Установлено, что содержание металлов в составе пыли, оседающих на листьях хлопчатника, не велико и убывает в ряду $Fe > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Co$. В радиусе 10 км от источника выбросов прослежено повышенное накопление в составе пыли цинка, кобальта, никеля, хрома и марганца. Содержание металлов непосредственно в листьях хлопчатника мало различалось в зависимости удаления от труб завода (исключение составил марганец). Выявленные концентрации металлов в тканях хлопчатника не представляют угрозы для роста и развития растений. Дальность максимального рассеяния отдельных металлов, оцененная по линейному тренду их содержания, составила (км): Co – 43.4, Ni – 72.5, Pb – 83.4, Cr – 96.4, Mn – 97.6, Cu – 105, Zn – 109, Fe – 145. Строгой приуроченности дальности воздушного переноса от атомной массы элемента не установлено. Проведена кластеризация металлов по дальности их воздушного переноса от источника загрязнения.

Ключевые слова: дальность воздушного переноса, промышленные выбросы, производство аммофоса, эмпирические модели рассеяния, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn, техногенная пыль.

DOI: 10.31857/S0002188122020090

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферы в результате выбросов промышленных предприятий является серьезной экологической проблемой. Дальность переноса определяется различными факторами, среди которых следует выделять климатические (температура и влажность воздуха, скорость ветра, состояние атмосферы), состав выбросов (соотношение твердых, жидких и газообразных компонентов), размер частиц, высота труб, рельеф местности, наличие растительного покрова и т.п. [1].

Из всех компонентов выбросов, газообразные перемешаются дальше, чем твердые. С увеличением расстояния от источника загрязнения уровень достигает максимума, а затем постепенно снижается. Максимальное загрязнение атмосфе-

ры в припочвенном слое, по данным [2], достигается на расстоянии, которое в 5–20 раз превышает высоту труб. Согласно расчетам, выполненным в работе [3], максимальное загрязнение атмосферы фиксируется на расстоянии, равном 10–14 высотам труб.

Скорость осаждения газообразных продуктов зависит от химических свойств газов – более высокая свойственна обладающим большей реакционной способностью. Входя в непосредственный контакт, они выводятся из атмосферы вследствие химических реакций, а также физической и химической сорбции. На долю “сухого” осаждения приходится выведение из атмосферы до 50% загрязняющих веществ [4]. При наличии осадков и высокой влажности воздуха скорость осаждения еще более усиливается [5].

Выпадение на почву твердых частиц, обладающих низкой реакционной способностью, определяется процессами седиментации и описывается формулой Стокса [6]. Это положение справедливо для частиц диаметром >20 мкм. Частицы меньшего размера ведут себя аналогично газам.

В литературе, посвященной дальности воздушного переноса твердых частиц, встречается большой разброс данных. По данным [7], границы ареала техногенного загрязнения сероземов расположены в 6–7 км от предприятия цветной металлургии. Напротив, в работе [8] указано, что в радиусе 10 км от цинкоплавильного завода выпадает $<10\%$ от содержания металлов в выбросах. По мнению [9], загрязнение почв отмечено в радиусе 20–30 км, а дальность распространения составляет 50–70 км. Высота труб при этом будет иметь немаловажное значение.

При выходе в атмосферу начинается разделение твердых компонентов выбросов. Более крупные и тяжелые частицы оседают вблизи источников загрязнения, тогда как легкие и мелкие переносятся дальше. Разделение частиц по размеру и удельной массе нередко означает также сепарацию по химическому составу [10]. Например, в зоне действия металлургических предприятий в районе Содбери в Канаде загрязнение почв никелем обнаруживали в радиусе 50, меди – 30, кобальта и свинца – 19 км [8]. В исследованиях [11], проведенных в окрестностях г. Череповца, установлено, что максимальное загрязнение растительности Fe, Mn и Ti находилось вблизи предприятий в пределах 1 км, Ca, Mg и P – в пределах 2–3 км, Cu, Zn, Ni – 3–5 км. По данным [9], в сфере воздействия черной металлургии Mn и Cr осаждались в радиусе 7–8 км, концентрация Zn и Ni достигали фоновых величин на расстоянии 20–25 км.

В работе [12] показано, что с удалением от предприятия происходило возрастание доли растворимых тяжелых металлов (ТМ) за счет уменьшения массы нерастворимых частиц. Аналогичные данные получены в исследованиях [8, 13]. При однородном химическом составе химических выбросов, дальность переноса будет определяться в первую очередь дисперсностью частиц. В этом случае можно наблюдать несколько максимумов.

В качестве индикаторов промышленного загрязнения природной среды используют воздух, атмосферные осадки, снежный покров, водную поверхность, почву, мхи, лишайники, высшие растения [14]. В работах [15, 16] была предпринята попытка использовать растения хлопчатника,

возделываемого вблизи предприятия по производству аммофоса, для установления площади аэрального загрязнения фтором, оседающего на листовых пластинках растений. Цель работы – установить дальность рассеяния Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn в составе твердых пылевидных выпадений, отходящих от труб предприятия туковой промышленности.

Задачи исследования: установить концентрацию ТМ в составе твердых взвешенных частиц, выбрасываемых в атмосферу цехами по производству аммофоса и экстракционной фосфорной кислоты; определить содержание ТМ в техногенной пыли, оседающей на листовой поверхности хлопчатника; выявить концентрацию металлов в обмытых листьях растений на разном расстоянии от труб предприятия в направлении господствующих ветров; разработать линейные модели тренда максимальной дальности переноса отдельных ТМ в направлении преимущественного распространения ветра; провести кластеризацию ТМ в зависимости от дальности их воздушного переноса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Завод по производству аммофоса (координаты: $39^{\circ}39'33''N$ и $66^{\circ}49'42''E$) с ежегодным объемом газопылевых выбросов более 10 тыс. т расположен в зоне сухих субтропиков. На территории промплощадки завода размещены 3 цеха по производству концентрированной серной кислоты, 2 цеха по производству экстракционной фосфорной кислоты, 3 цеха по производству аммофоса. Высота труб предприятия цехов по производству серной кислоты – 180 м, цехов по производству аммофоса – 120 м.

К предприятию прилегает территория активного хлопкосеяния. Вегетационный период хлопчатника равен 110–150 сут [17]. Степень сомкнутости крон хлопчатника к июлю, в зависимости от агротехники возделывания, составляет 40–93% [18]. Глубоко рассеченные листовые пластинки растений этой культуры хорошо удерживают пылевидный нанос. Незначительное количество осадков с мая по октябрь практически исключает возможность смыва техногенных частиц с поверхности листьев. Физико-химическая характеристика почв под хлопчатником представлена в работе [16].

Отбор техногенной пыли проводили непосредственно из труб цехов по производству аммофоса и экстракционной фосфорной кислоты на беззольные фильтры. Образцы листьев растений отбирали на ключевых площадках 50×50 м, расположенных на типичных элементах рельефа, на разном расстоянии (0.6–20 км) от предприятия в

Таблица 1. Содержание металлов в техногенной пыли, мг/кг

Образец	Ni	Cr	Cu	Co	Zn	Mn
Пыль цеха по производству аммофоса	27.0	44.5	22.5	6.5	91.3	1500
Пыль цеха экстракционной фосфорной кислоты	21.8	37.5	21.5	10.3	53.0	650

Таблица 2. Содержание металлов в пыли, оседающей на листовую поверхность хлопчатника, мг/кг сухой массы листьев

Расстояние от предприятия, км	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	Mn	Fe	Pb
0.6	32.9	9.5	9.7	23.8	21.1	251	680	37.9
3	26.5	9.7	8.7	25.4	24.8	277	850	40.6
5	22.5	9.4	7.7	21.2	21.4	225	700	32.2
10	25.6	9.1	8.7	24.2	23.8	265	750	36.8
15	27.7	8.1	5.6	18.5	18.3	209	730	31.2
20	22.4	8.1	5.2	17.9	18.3	209	610	29.3

направлении господствующих ветров (северо-восток) в фазе бутонизации по всей высоте стеблей. Средняя проба включала 90 растений в каждом массиве.

Уровень запыленности листовой поверхности хлопчатника определяли по разности между зольностью не обмытых и обмытых листьев. Пыль, оседавшую на листовую поверхность, собирали с участков обследования, обмывая 100 г свежих листьев в 100 мл дистиллированной воды. В фильтрате определяли величину pH. Полноту отмыва контролировали, отмывая листья большим количеством деионизированной воды. Фильтры озоляли в смеси азотной и соляной кислот при кипячении. Аналогичным образом разлагали пыль, смытую с листьев.

Обмытые листья озоляли в муфельной печи при температуре 500°C в течение 8 ч. Для определения содержания металлов, полученную золу растворяли в азотной кислоте. Наличие металлов устанавливали на атомно-абсорбционном спектрофотометре Perkin Elmer.

Математическую обработку данных проводили согласно [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты изучения состава техногенной пыли показали, что твердые пылевидные материалы, вне зависимости от расположения труб предприятия, содержали в своем составе все изученные элементы (табл. 1).

Согласно наблюдениям, техногенная пыль из цехов по производству аммофоса представлена частицами аммофосной пульпы различной степени дисперсности. В выбросах цехов по производству экстракционной фосфорной кислоты доминировали частицы фосфоритной муки. Отбор проводили на фильтровальную бумагу.

Таким образом, твердые выбросы представлены в основной своей массе фосфорсодержащими соединениями различной степени растворимости. Концентрация ТМ в них менялась (мг/кг): Ni – 21.8–27.0, Cr – 37.5–44.5, Cu – 21.5–22.5, Co – 6.5–10.3, Zn – 53.0–91.3, Pb – 27.0–71.5. Прилегающий к предприятию массив, таким образом, можно рассматривать как почву, длительное время получавшую высокие дозы фосфорных удобрений.

В работе [20] предложено различать 2 типа техногенной нагрузки химических элементов на земную поверхность: 1 – высокая нагрузка, формируемая в результате выпадения больших количеств пыли с фоновым и близким к нему содержанием химических элементов; 2 – высокая нагрузка, образуемая выпадением пыли с высоким содержанием химических элементов.

Первый тип нагрузки полностью подходит к рассматриваемому нами случаю и является условно аномальным. Сколько-нибудь заметного увеличения содержания загрязняющих элементов в почвах техногенной зоны могло не диагностироваться [21, 22].

Результаты изучения состава твердых частиц на поверхности листьев показали, что концентрация металлов в оседающих частицах была не велика и убывала в ряду: Fe > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Co (табл. 2). В радиусе 10 км от источника выбросов прослежено повышенное накопление цинка, кобальта, никеля, хрома, марганца.

Количественно, уровень запыленности можно охарактеризовать разностью между зольностью не обмытых и обмытых листьев. При сжигании не обмытых листьев, по сравнению с обмытыми, выход золы оказался больше на 1.1–4.3 г/100 г сухой массы [16].

Следует подчеркнуть, что отложения техногенной пыли на поверхности листьев не являются пассивным складированием. По мнению авторов работы [23], поверхность листовых пластинок яв-

Таблица 3. Содержание металлов в отмытых листьях хлопчатника, отобранных на разном расстоянии от предприятия, мг/кг сухой массы растений

Элемент	Расстояние от предприятия, км					
	0.6	3	5	10	15	20
Zn	22.0	16.2	16.2	15.0	21.8	21.8
Co	2.0	2.0	2.0	1.8	1.9	1.8
Pb	10.2	10.5	10.0	10.5	11.0	10.2
Ni	3.7	3.6	3.5	3.6	3.7	3.3
Cr	1.3	1.2	1.5	1.6	1.4	1.2
Mn	101	56.0	50.0	61.0	63.5	57.5
Fe	135	140	165	150	140	100
Cu	8.4	5.4	5.2	5.8	7.4	7.4

ляется местом биохимических процессов, реакций между металлами аэральными выпадениями и поступающими из живых тканей органическими и органо-минеральными соединениями. Исследователи указывают, что перехваченные поверхностью листьев аэральные частицы закрепляются различными механизмами, среди которых определяющую роль играют гуттационные выделения.

В наших исследованиях смывы с листьев хлопчатника имели зеленовато-желтую окраску, а pH суспензии менялся в пределах 9.15–9.25 ед. Важным представляется вопрос о возможности поступления загрязняющих веществ непосредственно в ткань листа из состава техногенной пыли. В работе [16] такая возможность была установлена для фтора.

Соединения металлов, попадающие из воздуха, могут поступать внутрь тканей. Существует мнение, что мелкие частицы (<5 мкм в диаметре) проникают через устьица, диаметр которых меняется в пределах от 5 до 30 мкм [24]. В противовес этому, автор работы [25] указывал, что устьица играют незначительную роль в поглощении аэральными частицами. По его мнению, аэральные частицы прочно фиксируются на восковых структурах эпидермиса, не изменяя его структуру. Необходимо однако добавить, что подобное закрепление, на наш взгляд, возможно лишь для тонких частиц и, скорее всего, едва ли возможно для труднорастворимых тонких фракций, присутствующих в выбросах.

В отличие от нерастворимых и слаборастворимых аэральными частицами, растворимые металлы могут поступать как через устьица, так и через кутикулу. Механизм поглощения ионов листом – многоступенчатый процесс, включающий пассивную диффузию и активный транспорт [1].

Сравнение концентрации металлов в отмытых листьях хлопчатника (табл. 3) и их содержанием в составе техногенной пыли (табл. 2) выявило существенные различия в их содержании. Содержание большинства металлов в отмытых листьях хлопчатника мало различалось в зависимости от удаления от источника загрязнения и было значительно меньше, чем в техногенной пыли, удаленной в результате обмывки листьев и удаления пыли с их поверхности.

Таким образом, для большинства изученных металлов связь между концентрацией в листьях растений и удалением от источника загрязнения отсутствовала. Исключение составлял марганец, содержание которого в хлопчатнике рядом с предприятием (0.6 км) было почти в 2 раза больше, чем на удаленных участках.

Увеличение содержания марганца в листьях древесных и кустарниковых пород в техногенных зонах установлено в работе [26]. Вероятно, его усиленное накопление связано с активной ролью марганца в процессе фотосинтеза и является ответной реакцией растений на неблагоприятные условия произрастания [27].

В данной связи практический интерес представляет вопрос о возможности избирательного поглощения металлов листовой поверхностью. По усредненным данным 8-ми отмыток химических элементов в листьях деревьев, кустарников и травянистых растений, собранных на территории крупной городской агломерации, содержание железа и свинца уменьшилось на 50–60, мышьяка – на 40, никеля – на 22, цинка – на 12%, а кобальта, кадмия и меди оставалось без изменений [9].

В опытах [28] при аэральном некорневом подкормке ряда сельскохозяйственных культур сложными микроудобрениями, имитирующими химический состав выпадений, в среднем на 15–30% увеличивался урожай луговых трав и картофеля, улучшались технические показатели льна-долгунца. Сделана попытка обосновать гипотезу о преобладающей роли аэрального типа питания многими микроэлементами естественной растительностью. На наш взгляд, подобное утверждение нуждается в серьезной экспериментальной проверке, хотя как альтернативная возможность восполнения недостатка элементов питания некорневое поглощение сомнений не вызывает. В практике сельского хозяйства некорневые подкормки нашли самое широкое применение. Таким образом, участие и положительная роль металлов, поглощенных некорневым путем в процессах метаболизма, подтверждается многочисленными исследованиями и практикой сельского хозяйства.

Таблица 4. Эмпирические модели дальности воздушного переноса тяжелых металлов

Химический элемент	Линейная модель тренда	Коэффициент детерминации R^2	p -value по F -критерию	Максимальная дальность воздушного переноса, км
Кобальт	$y_1 = 9.572 - 0.22x$	0.82	0.01	43.4
Цинк	$y_2 = 9.786 - 0.09x$	0.89	0.004	10
Хром	$y_3 = 23.46 - 0.24x$	0.45	0.14	96.4
Никель	$y_4 = 24.9 - 0.34x$	0.67	0.046	72.5
Медь	$y_5 = 28.7 - 0.27x$	0.28	0.28	105
Свинец	$y_6 = 38.8 - 0.47x$	0.63	0.06	83.4
Марганец	$y_7 = 263.4 - 2.7x$	0.48	0.127	97.6
Железо	$y_8 = 767.3 - 5.29x$	0.25	0.32	145

Полученные нами результаты о содержании металлов в тканях растений не позволили сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии у хлопчатника механизмов некорневого поглощения металлов. Однако даже при наличии таких механизмов роль некорневого поглощения едва ли велика, что связано с анатомическим строением листьев хлопчатника (хорошо развитый кутикулярный слой).

Сопоставление полученных данных концентрации металлов в листьях хлопчатника со шкалой нормальных концентраций в незагрязненных растениях показало, что их содержание находилось в диапазоне естественных изменений в незагрязненных растениях и не представляло угрозы для роста и развития хлопчатника [29].

Одной из задач настоящей работы явилось установление максимальной дальности воздушного переноса Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn, оцененное по линейному тренду их содержания в техногенной пыли, оседающей на листьях хлопчатника по мере удаления от источника загрязнения. Возможность использования линейного тренда для оценки максимальной дальности рассеяния металлов от труб предприятия обусловлено высокой статистической значимостью эмпирических зависимостей по критерию Фишера.

В качестве примера приведены расчеты, выполненные для кобальта.

Линейная модель тренда (парная линейная регрессия изученного показателя от расстояния) имеет вид:

$$y_1 = 9.572 - 0.22x, \quad (1)$$

где x – расстояние от предприятия.

Модель (1) статистически значима на очень высоком уровне значимости, $p = 0.01$ (p -value по F -критерию). коэффициент детерминации $R^2 = 0.82$.

Из условия $y_1 = 9.572 - 0.22x = 0$ можно оценить по тренду максимальную дальность переноса:

$$l_1 = \frac{9.572}{0.22} = 43.4 \text{ км.}$$

Линейные модели дальности воздушного переноса ТМ сведены в табл. 4. Большинство моделей характеризуются высоким уровнем значимости, строгой зависимости дальности рассеяния от атомной массы элемента не установлено. Графики моделей представлены на рис. 1.

По дальности переноса металлов (оценка по тренду) металлы можно разделить на группы: I группа включает Co ($l_1 = 43.4$ км), II группа включает Ni ($l_4 = 72.5$ км) и Pb ($l_6 = 83.4$ км), III группа включает Cr ($l_3 = 96.4$ км) и Mn ($l_7 = 97.6$ км), IV группа включает Cu ($l_5 = 105$ км), Zn ($l_2 = 109$ км) и Fe ($l_8 = 145$ км).

ВЫВОДЫ

1. Пыль, отходящая из труб цехов по производству аммофоса была представлена частицами аммофосной пульпы различной степени дисперсности, пыль цехов по производству экстракционной фосфорной кислоты – частицами фосфоритной муки. Концентрация металлов, отходящих от труб предприятия, убывала в ряду: Mn > Zn > Cr > Ni > Cu > Co.

2. Содержание металлов в составе пыли, оседающей на листьях хлопчатника, убывало в ряду: Fe > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Co. В радиусе 10 км от источника выбросов прослежено повышенное накопление в составе пыли цинка, кобальта, никеля, хрома и марганца.

3. Концентрация металлов, непосредственно в тканях хлопчатника мало различалась в зависи-

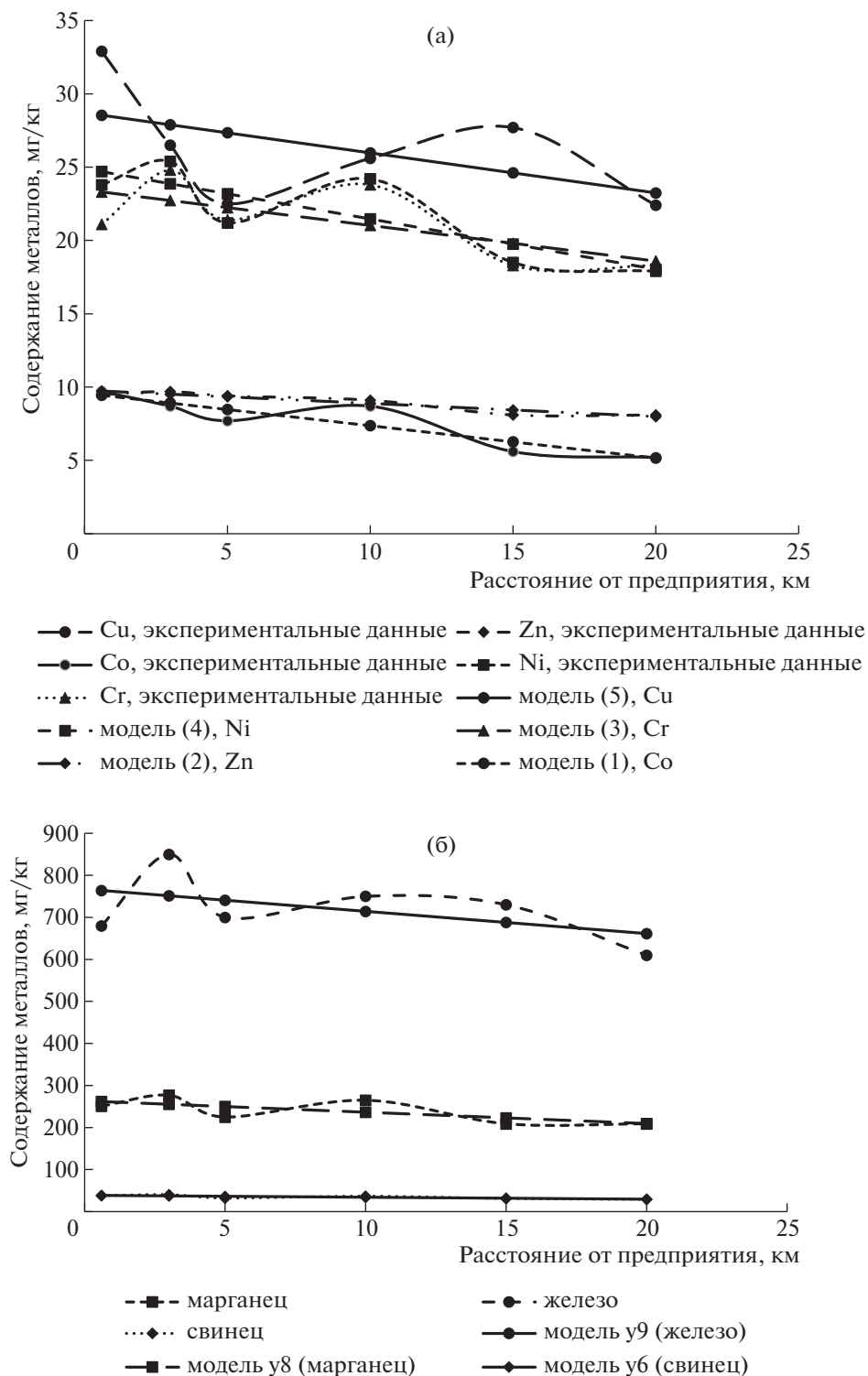


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов на поверхности листьев в составе техногенной пыли в зависимости удаления от труб предприятия: (а) – группа I, II; (б) – группа III, IV.

мости удаления от труб завода. Исключение составил марганец, содержание которого на расстоянии 0.6 км от завода было в 2 раза больше, чем в растениях, отобранных на удаленных участках. Выявленные концентрации металлов в тканях

хлопчатника не представляли угрозы для роста и развития растений.

4. Дальность максимального рассеяния отдельных металлов, оцененная по линейному тренду их содержания, составила (км): Co – 43.4,

Ni – 72.5, Pb – 83.4, Cr – 96.4, Mn – 97.6, Cu – 105, Zn – 109, Fe – 145. Строгой зависимости дальности воздушного переноса от атомной массы элемента не установлено. Проведена кластеризация металлов по дальности их воздушного переноса от источника загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 536 с.
2. Берлянд М.Е. Закономерности распространения выбросов в атмосфере // Метеорологические аспекты промышленного загрязнения атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1968. 536 с.
3. Качур А.Н. Некоторые особенности химического состава осадков атмосферы в связи с техногенезом // Геохимия зоны гипергенеза и техническая деятельность человека. Владивосток: ДВЦ АН СССР, 1976. С. 28–47.
4. Westley M.Z., Nicks B.B. Some factors that effect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation // J. Air Pollut. Control Assoc. 1977. V. 27. P. 1110–1116.
5. Кислотные дожди. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 273 с.
6. Хайди Г.М. Процесс удаления газообразных и взвешенных загрязнителей из атмосферы // Химия нижней атмосферы. М.: Мир, 1976. С. 155–222.
7. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л., 1975. 272 с.
8. Махонько Э.П., Малахов С.Г., Бликов В.К., Несмятина Т.В. Содержание ТМ в растворимых осадках в формах в выпадениях в зависимости от расстояния от источника загрязнения // Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Тр. II Всесоюзн. совещ. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. С. 53–58.
9. Дончева А.В. Ландшафт в зоне воздействия промышленности М., 1978. 96 с.
10. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растения. Новосибирск: Наука, 1991. 150 с.
11. Важенин И.Г. Почва, как адаптивная система самоочищения от токсического воздействия тяжелых металлов – ингредиентов техногенных выбросов через атмосферу // Химия в сел. хоз-ве. 1982. № 47. С. 41–45.
12. Гармаш Г.А. Накопление тяжелых металлов в почвах и растениях вокруг металлургических предприятий: Дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 1985. 151 с.
13. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 195 с.
14. Дончева А.В., Казакова Л.К., Калуцков В.М. Ландшафтная индикация загрязнения природной среды. М.: Экология, 1992. 256 с.
15. Литвинович А.В. Деграция хорошо окультуренных почв гумидных и аридных регионов. Saarbrücken: Lap Lambert, 2011. 288 p.
16. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Моделирование процесса воздушного переноса фтора в составе аэральных выбросов. Использование растений хлопчатника для индикации промышленного загрязнения // Агрохимия. 2021. № 12. С. 88–96.
17. Энциклопедия хлопководства. Ташкент, 1985. Т. 1. 561 с.
18. Хлопчатник. Климат и почвы хлопковых районов Средней Азии. Т. 2. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1957. 628 с.
19. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: РАСХН, АФИ, СПбГУ, 2007. 141 с.
20. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
21. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и распределение свинца в почвах в зоне деятельности завода туковой промышленности // Агрохимия. 1996. № 3. С. 92–100.
22. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и особенности распределения валовых и кислоторастворимых форм соединений тяжелых металлов в профиле сероземно-оазисных почв в зоне химического завода // Агрохимия. 1999. № 8. С. 68–78.
23. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С., Власов А.В. Взаимодействие растительности с потоком металлоносных аэрозолей // Тр. III Всесоюзн. совещ.: Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. С. 97–101.
24. Little P. Disposition of 2.75, 5.0 and 8.5 mm particles to plant and soil surfaces // Environ. Pollut. 1977. V. 12. № 4. P. 293–305.
25. Farado M.E. Metal tolerant plants // Coord Chem. Revs. 1981. V. 36. № 2. P. 155–182.
26. Бессонова В.Б., Лыженко И.И. Аккумуляция тяжелых металлов компонентами экосистем в индустриальных районах // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы. М.: Изд-во МГУ, 1988. Ч. 2. С. 240–243.
27. Литвинович А.В., Осипов А.И., Павлова О.Ю. Влияние техногенного загрязнения на химический состав растений хлопчатника // Агрохимия. 1998. № 1. С. 71–77.
28. Голенецкий С.П., Жигаловская Т.Н., Голенецкая С.И. Роль атмосферных выпадений в формировании микроэлементного состава почв и растений // Почвоведение. 1981. № 2. С. 41–48.
29. Кабата Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 350 с.

**Range of Air Transport of Industrial Emissions
of an Enterprise Producing Ammophos. Empirical Models
of Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn Scattering in Technogenic Dust**

A.V. Litvinovich^a, O.Y. Pavlova^a, A.V. Lavrishchev^{b,#}, and V.M. Bure^{a,c}

^a*Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp., 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia*

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia*

^c*Sankt-Petersburg State University
Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia*

[#]*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru*

The composition of technogenic dust taken from the pipes of an ammophos production plant located in the arid zone has been studied. It was found that the metal content in the composition of dust deposited on cotton leaves is not high and decreases in the range of Fe > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > Co. Within a radius of 10 km from the source of emissions, an increased accumulation of zinc, cobalt, nickel, chromium and manganese in the dust composition was traced. The metal content directly in the cotton leaves did not differ much depending on the removal from the plant pipes (the exception was manganese). The detected concentrations of metals in cotton tissues do not pose a threat to plant growth and development. The maximum scattering range of individual metals, estimated by the linear trend of their content, was (km): Co – 43.4, Ni – 72.5, Pb – 83.4, Cr – 96.4, Mn – 97.6, Cu – 105, Zn – 109, Fe – 145. Strict timing of the air transfer range from the atomic mass of the element has not been established. Clustering of metals according to the range of their air transport from the source of pollution was carried out.

Key words: air transport range, industrial emissions, ammophos production, empirical scattering models, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, Fe, Mn, technogenic dust.