

УДК 631.48+504.5

Магнитная восприимчивость дорожной пыли как индикатор загрязнения территории в зоне воздействия предприятий угледобычи

Е.Г. Язиков¹, Н.А. Осипова¹, А.В. Таловская¹, К.Ю. Осипов^{2*}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 14.03.2021 г.

Для территории города, подверженной воздействию предприятий угледобычи (г. Междуреченск, Кемеровская обл.), проводится анализ дорожной (уличной) пыли методом капшапетрии. Определяется магнитная восприимчивость (МВ) пыли разных фракций. Изучается минеральный состав пыли. Для сравнения определяются МВ образцов почв. Анализ химических элементов группы железа в дорожной пыли (фракция < 1 мм) установил положительную значимую корреляцию МВ пыли с содержанием в ней Fe, Co, Cr. Изменение МВ дорожной пыли методом капшапетрии позволяет быстро оценивать уровень загрязнения территории города тяжелыми металлами группы железа и может быть рекомендовано для мониторинговых работ.

Ключевые слова: дорожная пыль, магнитная восприимчивость, почвы, тяжелые металлы; aerosols, road dust, magnetic susceptibility, soil, heavy metals.

Введение

Основной показатель загрязнения атмосферного воздуха городов — наличие пыли. Изучение пыли в снежном покрове позволяет фиксировать поступление загрязняющих компонентов зимой, что актуально для регионов с длительным периодом присутствия снежного покрова [1–4]. В этот период исключено поступление литогенной составляющей почв и пород в снежный покров.

В настоящее время загрязнение почвенного покрова урбанизированных территорий тяжелыми металлами — одна из актуальных проблем. Тяжелые металлы в почвах тесно ассоциированы с магнетитом, маггемитом и другими ферромагнетиками, что позволяет использовать методы изучения магнитных свойств почвенного покрова для диагностики загрязнения почв. Измерение магнитной восприимчивости (МВ) — один из наиболее распространенных методов характеристики магнетизма почв [5–8].

Теоретической основой настоящих исследований послужили идеи и принципы эколого-геохимической оценки почв, разработанные М.А. Глазковой [9], В.В. Добровольским [10] и др., также учитываются результаты магнито-геохимических исследований Э.А. Молоствовского [11]. Наряду с активным изучением МВ почв возрастает интерес к изучению магнитных свойств дорожной пыли как объекта

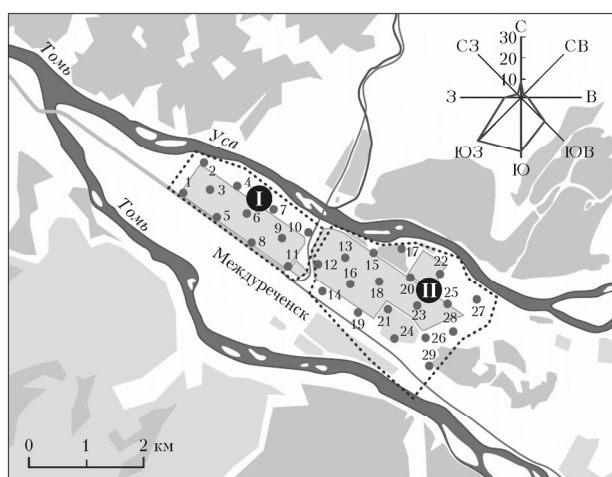
особого типа в окружающей среде со сложным составом при эколого-геохимическом мониторинге в городах в летний период. Значения МВ отражают уровень пылевого загрязнения атмосферного воздуха, а также могут иметь большое значение для выявления факторов поступления пыли в атмосферный воздух [12, 13].

В настоящей работе рассматриваются особенности МВ дорожной пыли и почв территории г. Междуреченска Кемеровской обл. во взаимосвязи с их минерально-вещественным и элементным составом.

Методика исследования

В летний период (июль-август) 2020 г. на территории Междуреченска было отобрано 29 проб дорожной пыли в точках, расположенных равномерно относительно друг друга (1 : 25000), на участках, где возможно максимальное накопление пылевых выбросов, переносимых от угольных объектов во время буровзрывных работ в сторону города и от объектов теплоэнергетики (рис. 1). При выборе точек отбора старались избегать влияния автотранспорта. Материал для анализа отбирался посредством смета чистыми пластмассовыми щетками с жестким ворсом на асфальтированных участках по методикам, описанным в [14–16]. Собранные пробы массой не менее 500 г помещали в плотные полиэтиленовые пакеты, просушивали при комнатной температуре и просеивали через сита с диаметром ячейки 1 мм для удаления улично-бытового мусора. Пробы дорожной пыли подвергались ситовому анализу, затем проводился анализ каждой фракции. Кроме этого,

* Егор Григорьевич Язиков (yazikov@tpu.ru); Нина Александровна Осипова (osipova@tpu.ru); Анна Валерьевна Таловская (talovskaj@yandex.ru); Константин Юрьевич Осипов (osipov@iao.ru).



• Точки отбора проб
 --- Границы изучаемых территорий

Рис. 1. Схема отбора проб дорожной пыли и почв на территории Междуреченска. Цифрами I, II обозначены западная и восточная части города

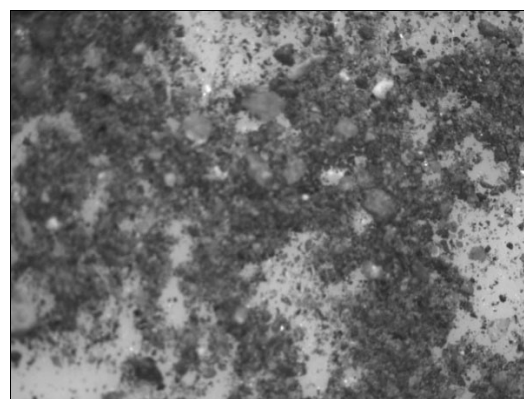
во фракции частиц размерами < 1 мкм определялось содержание элементов группы железа методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск).

Определение МВ проводилось каппаметром КМ-7 в МИНОЦ «Урановая геология» Томского политехнического университета с использованием методики, защищенной патентом РФ № 2133487 [17]. Специально изготовленная кювета из немагнитного материала позволяла выдерживать одинаковый объем пробы, что необходимо для корректного сопоставления результатов измерений. В целях отработки методических вопросов были проведены измерения МВ проб как валовой фракции, так и отдельно фракций частиц размерами менее и более 1 мкм. Для каждой пробы определялся вес, а затем как в целом, так и для каждой фракции определялась магнитная восприимчивость в режиме трехкратного измерения для исключения ошибки. В расчет принималось среднее значение. Обработка и интерпретация результатов проводились совместно для всех точек с учетом ландшафтных особенностей местности и расположения предприятий угледобычи. Кроме этого, была определена МВ проб почвы, ранее (2015 г.) отобранных в этих точках. Минерально-вещественный состав дорожной пыли изучался методами оптической микроскопии с помощью бинокулярного микроскопа Leica EZ4D и рентгенофазового анализа, на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser, на базе учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики «Урановая геология».

Результаты

Частицы дорожной пыли имеют неоднородную структуру с включениями частиц природного и техногенного происхождения разного размера (рис. 2, а).

Фракция частиц размером < 1 мкм более однородна и представлена преимущественно природными образованиями (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Фотографии образцов дорожной пыли Междуреченска: а – фракция > 1 мкм, увеличение $16\times$; б – фракция < 1 мкм, увеличение $16\times$ (фото сделано на оптическом микроскопе Leica EZ4D)

По данным рентгеновской дифрактометрии, материал дорожной пыли состоит преимущественно из кварца (34,5%) и альбита (30,7%); из рудных минералов присутствуют ферромагнитные и парамагнитные, представленные магнетитом, ильменитом, хромитом и гематитом (табл. 1).

Таблица 1

Минеральный состав дорожной пыли по данным рентгеновской дифрактометрии

Минерал	Формула	Содержание, %
Кварц	SiO_2	34,5
Доломит	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	11,1
Альбит	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	30,7
Каолинит	$\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$	3,5
Кальцит	$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	3,4
Ортоклаз	KSi_3AlO_8	6,0
Мусковит	$\text{KAl}_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,1
Ильменит	FeTiO_3	0,6
Хромит	$(\text{Fe}_{0,5}\text{Mg}_{0,5})(\text{Cr}_{1,64}\text{Fe}_{0,28}\text{Ti}_{0,02}\text{Al}_{0,06})\text{O}_4$	0,3
Магнетит	$\text{Fe}_{2,75}\text{Ti}_{0,25}\text{O}_4$	0,3
Гематит	Fe_2O_3	0,4

Объемная МВ валовых проб дорожной пыли Междуреченска равна $(158,3-564,8) \cdot 10^{-5}$ СИ при средней величине $295,0 \cdot 10^{-5}$ СИ, при этом для проб фракции < 1 мм она составляет $(137,6-475,4) \cdot 10^{-5}$ СИ при средней величине $273,8 \cdot 10^{-5}$ СИ, а для фракции > 1 мм – $(85,6-1037,6) \cdot 10^{-5}$ СИ при среднем значении $259,8 \cdot 10^{-5}$ СИ (табл. 2). МВ пыли в различных частях города существенно не меняется.

Значения удельной МВ сравнивались с широко представленными в литературе данными по МВ почв [18, 19]. Так, в Перми (Россия), а также в почвах городских лесов Верхней Силезии (Польша) фоновыми являются значения $(50-60) \cdot 10^{-8}$ м³/кг, которые принято считать типичными для незагрязненных почв. В ряде провинций Китая значения удельной МВ почв достигают $914 \cdot 10^{-8}$ м³/кг (Ханчжоу), Лоян ($1128 \cdot 10^{-8}$ м³/кг), Шанхай ($1959 \cdot 10^{-8}$ м³/кг). Лишь в отдельных точках (рядом с котельными) изученной территории Кузбасса, где для получения тепловой энергии используется преимущественно уголь, нами также отмечены высокие значения удельной МВ ($1271 \cdot 10^{-8}$ м³/кг, $656 \cdot 10^{-8}$ м³/кг).

Распределение удельной и объемной МВ в целом по городу достаточно равномерно, дифференциация

значений для западной и восточной частей города очень слабая. Средние содержания элементов в почвах западной и восточной частей Междуреченска также различаются незначительно [20]. Это объясняется небольшой площадью территории, примерно одинаковым характером влияния антропогенных источников (угольная пыль с близкорасположенных угольных предприятий, продукты сжигания угля).

Сопряженный анализ МВ и валового содержания элементов группы железа позволяет оценить взаимосвязь этих характеристик (табл. 3). В пылевых пробах, отобранных по территории города, среднее содержание Fe, Co, Cr, Ni, определенное методом ИСП МС в рамках настоящего проекта, составило $(3,86 \pm 0,07)\%$ (Fe), $(104,4 \pm 3,2)$ мг/кг (Cr), $(15,5 \pm 0,4)$ мг/кг (Co), $(19,5 \pm 1,7)$ мг/кг (Ni).

1. Выявлен однородный характер распределения коэффициента вариации МВ пыли и содержания элементов Cr, Fe, Co; распределение содержания Ni неоднородно.

2. Статистическое распределение значений МВ пыли, содержания элементов Cr, Fe, Co имеет однородный характер; распределение содержания Ni неоднородно. Значения коэффициентов вариации:

Таблица 2

Средняя масса, объемная и удельная МВ уличной пыли разных фракций

Параметр	Город	Западная часть города (I)	Восточная часть города (II)
Число точек отбора (проб)	29	11	18
<i>Общая проба</i>			
$\frac{m_{\text{пробы}}}{m_{\text{макс}} \div m_{\text{мин}}}$	$99,2 \pm 2,4$	$103,8 \pm 2,5$	$96,4 \pm 3,5$
$\mu_{\text{об}}$	$295,0 \pm 18,1$	$310,8 \pm 26,2$	$285,4 \pm 24,6$
$\mu_{\text{об. макс}} \div \mu_{\text{об. мин}}$	$564,8 \div 158,3$	$522,8 \div 199,0$	$564,8 \div 158,3$
$\mu_{\text{уд}}$	$291,0 \pm 15,6$	$293,9 \pm 23,8$	$289,2 \pm 21,1$
$\mu_{\text{уд. макс}} \div \mu_{\text{уд. мин}}$	$425,8 \div 159,4$	$474,4 \div 185,7$	$570,6 \div 159,4$
<i>Фракция < 1 мм</i>			
$\frac{m_{\text{пробы}}}{m_{\text{макс}} \div m_{\text{мин}}}$	$93,8 \pm 2,2$	$97,1 \pm 2,9$	$91,7 \pm 3,0$
$\mu_{\text{об}}$	$273,8 \pm 15,1$	$275,9 \pm 18,1$	$272,5 \pm 22,0$
$\mu_{\text{об. макс}} \div \mu_{\text{об. мин}}$	$475,4 \div 137,6$	$355,3 \div 172,1$	$475,4 \div 137,6$
$\mu_{\text{уд}}$	$285,7 \pm 13,4$	$280,0 \pm 18,9$	$289,1 \pm 18,7$
$\mu_{\text{уд. макс}} \div \mu_{\text{уд. мин}}$	$457,4 \div 163,5$	$347,0 \div 168,0$	$457,4 \div 163,5$
<i>Фракция > 1 мм</i>			
$\frac{m_{\text{пробы}}}{m_{\text{макс}} \div m_{\text{мин}}}$	$78,7 \pm 4,7$	$85,1 \pm 7,0$	$74,8 \pm 6,2$
$\mu_{\text{об}}$	$259,8 \pm 31,2$	$251,6 \pm 24,4$	$264,8 \pm 48,7$
$\mu_{\text{об. макс}} \div \mu_{\text{об. мин}}$	$1037,6 \div 85,6$	$333,1 \div 85,6$	$1037,6 \div 122,7$
$\mu_{\text{уд}}$	$345,0 \pm 40,2$	$304,0 \pm 38,2$	$369,5 \pm 60,8$
$\mu_{\text{уд. макс}} \div \mu_{\text{уд. мин}}$	$1271,1 \div 167,9$	$545,8 \div 171,2$	$1271,1 \div 167,9$

Примечание. $m_{\text{пробы}}$, $m_{\text{макс}}$, $m_{\text{мин}}$ – средняя, максимальная, минимальная массы пробы (г); $\mu_{\text{об}}$, $\mu_{\text{об. макс}}$, $\mu_{\text{об. мин}}$ – средняя, максимальная, минимальная объемная МВ пробы ($\times 10^{-5}$ единиц СИ); $\mu_{\text{уд}}$, $\mu_{\text{уд. макс}}$, $\mu_{\text{уд. мин}}$ – средняя, максимальная, минимальная удельная МВ пробы ($\times 10^{-8}$ м³/кг).

Сравнительная характеристика МВ и содержания элементов группы железа в уличной пыли, почвах и твердом осадке снега

Объект, год, метод	$\frac{\mu_{об}}{\mu_{об. макс} \div \mu_{об. мин}} \cdot 10^{-5}$ СИ	$\frac{C_{ср.}}{C_{макс} \div C_{мин}}$			
		Fe, %	Cr, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг
Уличная пыль, 2020 г., ИСП МС, 29 проб	$273,7 \pm 15,1$	$3,86 \pm 0,07$	$104,4 \pm 3,2$	$15,5 \pm 0,4$	$19,5 \pm 1,7$
	$475,4 \div 137,6$	$4,80 \div 3,17$	$141,3 \div 68,4$	$21,0 \div 11,0$	$47,0 \div 3,0$
Почва, 2015 г., ИНАА*, 29 проб	$264,7 \pm 16,8$	$3,66 \pm 0,15$	$116,9 \pm 4,9$	$17,0 \pm 0,6$	$39,3^{**} \pm 1,7$
	$524,0 \div 112,9$	$4,70 \div 0,97$	$197,6 \div 51,9$	$22,7 \div 5,3$	$48,4 \div 30,0$

* ИНАА – инструментальный нейтронно-активационный анализ.

** Содержание никеля в почвах по данным анализа ИСП МС (10 проб).

29,7% (удельная МВ), 9,3% (Fe), 16,6% (Cr), 14,5% (Co), 47,9% (Ni).

В почвенных пробах, отобранных в тех же точках в 2015 г., методом каппаметрии найдено, что средняя удельная МВ почвенных проб фракции < 1 мм равна $(264,7 \pm 16,8) \cdot 10^{-5}$ СИ. Методом ИСП МС было установлено следующее среднее содержание элементов: $(3,66 \pm 0,15)\%$ (Fe), $(116,9 \pm 4,9)$ мг/кг (Cr), $(17,0 \pm 0,6)$ мг/кг (Co), $(39,3 \pm 1,7)$ мг/кг (Ni). Диапазоны изменений содержания этих элементов от минимальных до максимальных, как видно из табл. 3, также близки. И для почв, и для пыли отмечаются повышенные значения МВ и содержания элементов только в отдельных точках, что отражает локальный характер техногенного воздействия.

На рис. 3 показаны корреляционные зависимости между МВ пыли и содержанием Fe, Cr, Co, а также между МВ пыли и почв. Видно, что МВ зависит от содержания основных элементов группы железа, об этом свидетельствуют значимые положительные корреляции между МВ и содержанием Fe ($R = 0,72$) и Cr ($R = 0,54$).

Ранее отмечалось [19], что характер связей МВ и содержания ряда элементов может быть различным: от сильных положительных корреляционных до значимых отрицательных. Отсутствие корреляции между МВ и содержанием Co в наших исследованиях логично: в пробах он содержится в микроколичествах, специфических источников загрязнения Co не наблюдается.

Значимые положительные корреляционные связи между МВ почв и пыли ($R = 0,84$) имеют

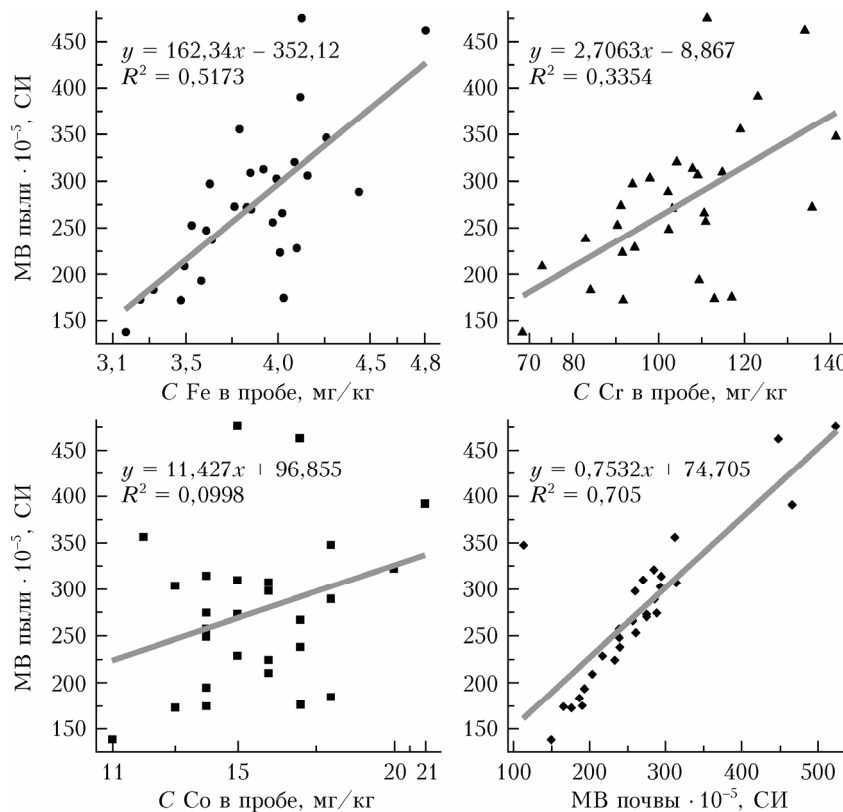


Рис. 3. Связь МВ и содержания химических элементов в дорожной пыли, а также МВ почвы

двойное объяснение. С одной стороны, это характеризует высокий вклад почвенной составляющей в состав дорожной пыли, а с другой — отражает долговременную тенденцию формирования состава почв исследуемой территории. На территории города наблюдается устойчивое многолетнее некритическое

загрязнение тяжелыми металлами, за пятилетний период новых источников загрязнения не выявлено.

На рис. 4 приведено пространственное распределение МВ, а также содержания Cr, Fe, Co в дорожной пыли и почвах; отчетливо прослеживается их схожее пространственное распределение.

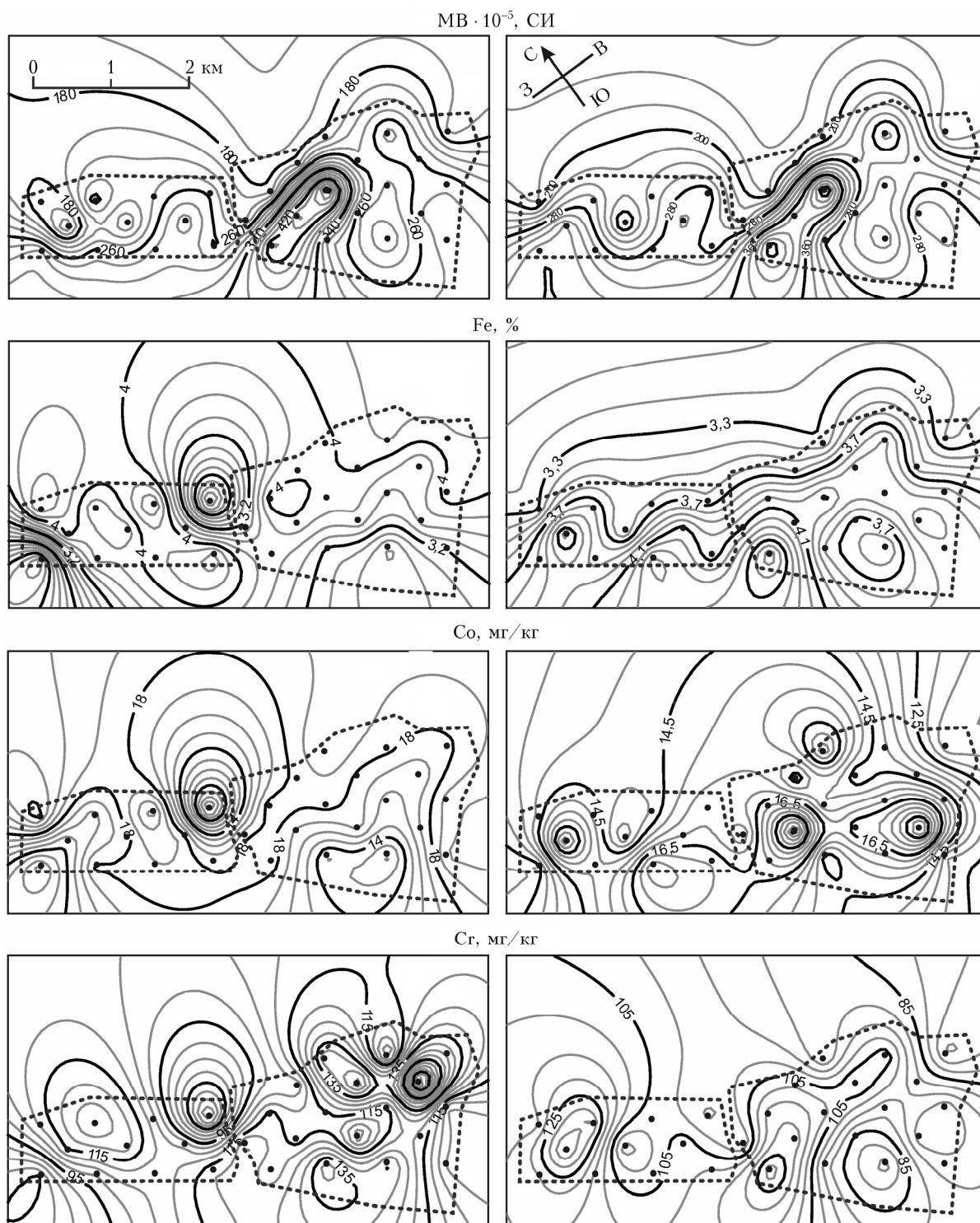


Рис. 4. Пространственное распределение МВ и элементов группы железа в почвах (слева) и дорожной пыли (справа) г. Междуреченска

Заключение

По результатам работы определены значения МВ дорожной пыли разных фракций на территории Междуреченска. Анализ химических элементов группы железа в дорожной пыли (фракция < 1 мм) установил положительную значимую корреляцию МВ с содержанием Fe, Cr и Co. Основные ферромагнитные минералы представлены магнетитом, ильменитом и хромитом. Результаты исследований пыли хорошо коррелируют с соответствующими значениями для проб почвы, которые были отобраны в 2015 г.: схожее пространственное площадное распределение отмечается как для МВ, так и для содержания Cr, Fe, Co, Ni. Следует отметить, что на территории города наблюдается устойчивое многолетнее не критичное загрязнение тяжелыми металлами. За пятилетний период не установлено новых источников загрязнения. Таким образом, изучение МВ дорожной пыли методом капшапметрии позволяет быстро и информативно оценивать уровень загрязнения территории города тяжелыми металлами группы железа и может быть рекомендовано для мониторинговых работ.

Исследования выполнялись в Национальном исследовательском Томском политехническом университете в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00675А). Часть расчетов была выполнена К.Ю. Осиповым в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. *Shevchenko V.P., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Bovev A.G., Lim A.G., Novigatsky A.N., Starodymova D.P., Pokrovsky O.S.* Insoluble particles in the snowpack of the Ob river basin (Western Siberia) a 2800 km submeridional profile // *Atmosphere*. 2020. N 11. P. 1184.
2. *Алексеева М.Н., Ратуна В.Ф., Ярославцева Т.В., Яценко И.Г.* Оценка атмосферного загрязнения при сжигании попутного газа по данным дистанционных наблюдений теплового излучения // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 915–919; *Alekseeva M.N., Raptuta V.F., Yaroslavtseva T.V., Yashchenko I.G.* Estimation of air pollution due to gas glaring from remote observations of flare thermal radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 3. P. 289–284.
3. *Yanchenko N.I., Belykh L.I., Slutsky S.L., Lanko A.V.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in solid residue and volatile organic compounds in snow cover filtrate of Bratsk // *Bull. Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2016. V. 327, iss. 2. P. 52–58.
4. *Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S.* Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia) // *Chemosphere*. 2018. 202. P. 446–459.
5. *Wang X.S.* Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China) // *J. Appl. Geophys.* 2013. V. 98. P. 73–78.

6. *Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карчевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв: монография. М.: Ярославль, 1995. 222 с.
7. *Васильев А.А., Лобанова Е.С.* Картограмма магнитной восприимчивости почвенного покрова города Перми // *Пермский аграрный вестник*. 2013. Т. 3, № 3. С. 24–27.
8. *Язиков Е.Г., Таловская А.В., Жорняк Л.В.* Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 264 с.
9. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР: учебное пособие. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
10. *Добровольский В.В.* Ландшафтно-геохимические критерии оценки загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами // *Почвоведение*. 1999. № 5. С. 639–645.
11. *Молоствовский Э.А.* Петромагнитная индикация техногенного загрязнения урбанизированных территорий // *Проблемы геоэкологии Саратова и области*. 1996. Вып. 1. С. 25–32.
12. *Wang G., Oldfield F., Xia D., Chen F., Liu X., Zhang W.* Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: A case study from the city of Lanzhou, China // *Atmos. Environ.* 2012. V. 46. P. 289–298.
13. *Bourliva A, Papadopoulou L., Aidona E.* Study of road dust magnetic phases as the main carrier of potentially harmful trace elements // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 553. P. 380–391.
14. *Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е.* Геохимия дорожной пыли (восточный округ Москвы) // *Вестн. Моск. ун-та*. 2015. Сер. 5. География. № 1. С. 25–35.
15. *Khademi H., Gabarr M., Abbaspour A., Martinez-Martinez S., Faz A., Acosta J.A.* Environmental impact assessment of industrial activities on heavy metals distribution in street dust and soil // *Chemosphere*. 2019. V. 217. P. 695–705.
16. *Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E.* Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow // *Urban Clim.* 2020. V. 32, N 100638.
17. *Способ определения техногенной загрязненности почвенного покрова тяжелыми металлами группы железа (железо, кобальт, никель): Пат. 2133487.* Россия, МПК6, G 01 V 9/00. Язиков Е.Г., Миков О.А.; Томский политехн. ун-т. № 98100689; Заявл. 08.01.98; Опубл. 20.07.99.
18. *Осипова Н.А., Язиков Е.Г.* Тяжелые металлы в почвах в районах воздействия угольных предприятий и их влияние на здоровье населения // *Безопасность в техносфере*. 2015. № 2. С. 16–25.
19. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение*. 2015. № 1. С. 13–20.
20. *Магнитная и геохимическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий Предуралья на примере города Перми: монография / А.А. Васильев, Е.С. Лобанова.* Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2015. 243 с.

E.G. Yazikov, N.A. Osipova, A.V. Talovskaya, K.Yu. Osipov. Magnetic susceptibility of road dust as a pollution indicator in the areas influenced by coal mining.

The analysis of road (street) dust is carried out by the kappametry method for the territory Mezhdurechensk city, Kemerovo oblast, which influenced by coal mining enterprises. Magnetic susceptibility of different dust fractions is determined. The mineral composition of the dust is studied. The magnetic susceptibility in soils are determined for comparison. The results correlate with the contents of chemical elements in the natural components of the territory under study. The elements – indicators of the territory pollution are determined.