

Оригинальная статья / Original article
УДК 631.48:504.53/54
DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-137-144

Концентрация подвижных форм тяжелых металлов и магнитные свойства почв г. Вольск Саратовской области

Длер С. Маджид, Михаил В. Решетников , Виталий Н. Ерёмин, Александр С. Шешнёв
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Контактное лицо

Михаил В. Решетников, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского; 410004 Россия, г. Саратов, ул. Астарханская, 83.
Тел. +79271353953
Email rmv85@list.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

Формат цитирования

Маджид Д.С., Решетников М.В., Ерёмин В.Н., Шешнёв А.С. Концентрация подвижных форм тяжелых металлов и магнитные свойства почв г. Вольск Саратовской области // Юг России: экология, развитие. 2020. Т.15, N 1. С. 137-144. DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-137-144

Получена 8 июля 2019 г.
Прошла рецензирование 16 октября 2019 г.
Принята 29 ноября 2019 г.

Резюме

Цель. Магнитная восприимчивость – это быстрый, недорогой и надежный метод оценки и мониторинга антропогенного загрязнения почв тяжелыми металлами. Однако важно определить факторы, влияющие на магнитную восприимчивость, прежде чем применять этот метод к экологическим исследованиям. Целью настоящего исследования явилось изучение влияния материнских пород и землепользования на магнитную восприимчивость и концентрации Ni, Pb, Cr, Cd, Cu и Zn, и применения магнитной восприимчивости как показателя антропогенного загрязнения тяжелыми металлами почв г. Вольска Саратовской области Российской Федерации.

Материал и методы. Было взято 50 поверхностных образцов почвы (0-10 см). 1М HNO₃ экстрагировали Ni, Pb, Cr, Cd, Cu и Zn определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. В почве определялась концентрация органического вещества. Измеряли магнитную восприимчивость на низких и высоких частотах (xlf и xhf) и рассчитывали частотно-зависимую восприимчивость (x_{fd}).

Результаты. Магнитная восприимчивость варьирует от 1,34 до 29,6 × 10⁻⁷ м³ кг⁻¹. Между Pb и xlf получена положительная сильная корреляция (P=0,01, r=0,55). Существуют значительные взаимосвязи между Pb и xlf, поэтому представляется, что на магнитную восприимчивость существенно повлияла антропогенная деятельность, которая увеличила концентрации Pb в городских почвах.

Выводы. В исследованных почвах магнитная восприимчивость может использоваться в качестве индикатора антропогенного загрязнения почв тяжелыми металлами.

Ключевые слова

Магнитная восприимчивость, почва, тяжелые металлы, никель, свинец, хром, кадмий, медь, цинк, Вольск.

Concentration of Mobile Forms of Heavy Metals and Magnetic Properties of Soils in the Town of Volsk, Saratov Region, Russia

Dler S. Majeed, Mikhail V. Reshetnikov , Vitaliy N. Eremin and Alexander S. Sheshnev

Saratov national research state University named after N. D. Chernyshevsky, Saratov, Russia

Principal Contact

Mikhail V. Reshetnikov, Cand. Geogr. Sci., Senior Researcher, N. D. Chernyshevsky Saratov National Research State University; 83 Astarkhanskaya St, Saratov, 410004 Russia.
Tel. +79271353953
Email rmv85@list.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

How to cite this article

Majeed D.S., Reshetnikov M.V., Eremin V.N., Sheshnev A.S. Concentration of mobile forms of heavy metals and magnetic properties of soils in the town of Volsk, Saratov region, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2020, vol. 15, no. 1, pp. 137-144. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2020-1-137-144

Received 8 July 2019

Revised 16 October 2019

Accepted 29 November 2019

Abstract

Aim. Magnetic susceptibility is a fast, inexpensive and reliable technique for estimating and monitoring anthropogenic contamination of soil with heavy metals. However, certain factors affecting magnetic susceptibility need to be determined before applying this technique to environmental studies. The objectives of this study were to investigate: (1) the effect of parent materials and land use on magnetic susceptibility and concentrations of Ni, Pb, Cr, Cd, Cu and Zn; and (2) the possible use of magnetic susceptibility as an indicator of anthropogenic heavy metals contamination of soil in the city of Volsk, Saratov region, Russia.

Material and Methods. Fifty (50) composite surface soil samples (0–10 cm) were selected. 1M HNO₃ extractable concentrations of Ni, Pb, Cr, Cd, Cu and Zn were analyzed using atomic absorption spectroscopy. Concentrations of organic matter in the soil were determined. Magnetic susceptibility at low and high frequency (χ_{lf} and χ_{hf}) were measured and frequency dependent susceptibility (χ_{fd}) was calculated.

Results. Magnetic susceptibility varied from 1.34 to $29.6 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. A positive strong correlation (P value = 0.01, $r = 0.55$) was obtained between Pb and χ_{lf} . Significant correlational relationships were observed between Pb with χ_{lf} , most likely due to significant effects of anthropogenic activities on magnetic susceptibility, therefore enhancing Pb concentrations in urban soils.

Conclusions. In the soils studied, magnetic susceptibility could be employed as an indicator of anthropogenic contamination of soil with heavy metals.

Key Words

Magnetic susceptibility, soil, heavy metals, nickel, lead, chromium, cadmium, copper, zinc, Volsk.

ВВЕДЕНИЕ

Использование магнитных параметров при идентификации источников загрязнения стало широко распространенной практикой в качестве надежного, эффективного и чувствительного метода оценки загрязненных почв [1-4]. В частности, нередко наблюдается устойчивая корреляция между величинами магнитной восприимчивости и концентрациями тяжелых металлов в верхних слоях почв [5; 6]. Хотя определение общих концентраций металлов является обычным анализом, магнитные измерения почв могут предоставить ценную справочную информацию в исследованиях особенностей их загрязнения [7-9].

Многие исследования подтвердили корреляцию между магнитными свойствами и концентрацией металлов в городских почвах [10-12], донных отложениях [13-15], пыли [16-18] и в результатах палеоклиматологических исследований [19-23]. В результате было обосновано использование магнитных параметров в качестве диагностического метода при обнаружении и картировании загрязненных тяжелыми металлами почвенного покрова.

Картирование почв на основе петромагнитных данных стало одним из наиболее важных инструментов для оценки антропогенного загрязнения [24] и широко используется при картировании загрязнения тяжелыми металлами [25; 26].

Петромагнитный метод исследования почв может использоваться в качестве базового мониторингового способа для дальнейших исследований на региональном, национальном и международном уровнях. В результате его комплексирования с обычным химическим анализом его можно считать простым, быстрым, информативным методом для картирования загрязнения тяжелыми металлами почв городских территорий [27].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область исследований. В качестве области исследования была выбрана территория города Вольска (52 03'00" с.ш. 47 23'00" в.д.). Город расположен на правом берегу реки Волги в 147 км выше города Саратова. Климат умеренно-континентальный, среднее годовое количество осадков 450-500 мм, средняя температура января -13°C, июля +21°C.

В ландшафтном отношении территория города принадлежит к Приволжскому останцовому ландшафтному району лесостепной ландшафтной зоны. Осадочные горные породы (мел, известняк и глины) являются основными геологическими и почвообразующими составляющими территории города Вольска. В почвенном покрове района доминируют выщелоченные и обыкновенные черноземы. Значительные площади занимают черноземы на коренных породах (преимущественно на карбонатах). Глубоко пересеченный рельеф местности обуславливает высокую интенсивность водно-эрозионных процессов

Население города в 2018 году составляет 63212 человек. На территории города существует ряд промышленных предприятий, среди которых основной вклад в загрязнение атмосферы и почв города вносят цементные заводы ООО «Холсим (РУС)» и АО «ХайдельбергЦемент Волга». В качестве еще одного источника загрязнения окружающей среды, важно отметить автомобильный транспорт, по официальным данным в

городе зарегистрировано 33026 (01.01.2018 г.) единиц автомобильного транспорта.

Отбор почвенных образцов. В общей сложности было отобрано 50 образцов с глубины 0-10 см. Так как на всей исследуемой территории геологические условия практически однородны, все пробы анализировались единым массивом. Фоновые пробы отобраны в одинаковых природных условиях в 5 км от территории города.

Лабораторные исследования. Все отобранные пробы просеивались через сито диаметром 2 мм и использовались в лабораторных анализах, рН почв определялся в водной вытяжке в соотношении воды к почвенной суспензии 2:1. Органическое вещество определялось по методу Тюрина. Концентрация подвижных форм Cu, Cd, Cr, Ni, Pb и Zn определялась в экстракте 1М HNO₃ методом атомной абсорбционной спектроскопии.

Для измерения магнитной восприимчивости 20 г каждого просеянного образца помещали в пластиковый контейнер, а измерения низкочастотной (0,47 кГц) (χ_{lf}) и высокочастотной (4,7 кГц) (χ_{hf}) производных выполнялись на мультиспектральном датчике MFK1-FB.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвенные характеристики и тяжелые металлы. Полученные фактические данные исследований по концентрациям тяжелых металлов, величинам магнитной восприимчивости и некоторых других характеристик почв представлены в таблице 1.

Тяжелые металлы. Концентрация подвижных форм никеля обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 0,98 до 16,8 мг/кг при среднем значении 6,8 мг/кг. Концентрация подвижных форм меди обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 1,21 до 133,2 мг/кг при среднем значении 12,58 мг/кг. Концентрация подвижных форм кадмия обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 0,02 до 0,38 мг/кг при среднем значении 0,19 мг/кг. Концентрация подвижных форм хрома обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 0,05 до 0,59 мг/кг при среднем значении 0,17 мг/кг. Концентрация подвижных форм свинца обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 2,9 до 182,8 мг/кг при среднем значении 27,8 мг/кг. Концентрация подвижных форм цинка обнаружена во всех анализируемых пробах и изменяется в интервале от 10,4 до 160,6 мг/кг при среднем значении 52,0 мг/кг.

Геохимический ряд для подвижных форм тяжелых металлов на территории города Вольска выглядит следующим образом: Zn>Pb>Cu>Ni>Cd>Cr (по средней концентрации).

Органическое вещество. Концентрация органического вещества в почвенном покрове города Вольска изменяется в пределах от 0,57 до 2,34% при среднем значении 1,88%. В одной пробе (2% от общего числа проб) значение органического вещества было менее 1%, в 24 пробах (48%) значение изменялось от 1 до 2% и в 25 пробах (50%) органическое вещество составляет 2 до 3%.

Распределение органического вещества на фоновой территории изменялось от 2,03 до 2,33% со средним значением 2,25%. Таким образом, можно отметить, что на территории города Вольска отмечается уменьшение

содержания органического вещества в почвах по сравнению с фоновыми значениями.

Магнитная восприимчивость почв. Величины магнитной восприимчивости почв представлены в таблице 1. Удельная магнитная восприимчивость на низкой частоте 976 Гц (χ_{lf}) в почвах на территории города Вольска изменяется в пределах от $1,34 \times 10^{-7}$ до $29,5 \times 10^{-7}$ м³/кг, при среднем значении $6,16 \times 10^{-7}$ м³/кг. Удельная магнитная восприимчивость на высокой частоте 3904 Гц (χ_{hf}) в почвах на территории города Вольска изменяется в пределах от $1,25 \times 10^{-7}$ до $29,0 \times 10^{-7}$ м³/кг, при среднем значении $5,99 \times 10^{-7}$ м³/кг. Значения частотной зависимости магнитной восприимчивости (χ_{fd}) изменяется в широком диапазоне от 0,03 до 9,85% при среднем значении 3,28%.

На фоновом участке распределение магнитной восприимчивости ведет себя несколько иначе. Удельная магнитная восприимчивость на низкой частоте 976 Гц (χ_{lf}) в почвах за пределами города Вольска изменяется в узком диапазоне от $4,54 \times 10^{-7}$ до $5,00 \times 10^{-7}$ м³/кг, при среднем значении $4,79 \times 10^{-7}$ м³/кг. Удельная магнитная восприимчивость на высокой частоте 3904 Гц (χ_{hf}) в почвах за пределами города Вольска аналогично изменяется в узком диапазоне от $4,21 \times 10^{-7}$ до $4,65 \times 10^{-7}$ м³/кг, при среднем значении $4,46 \times 10^{-7}$ м³/кг. Значения частотной зависимости магнитной восприимчивости (χ_{fd}) изменяется от 6,90 до 7,08% при среднем значении 6,99%.

Таблица 1. Результаты измерения магнитных свойств почв г. Вольска и фонового участка

Table 1. Results of measuring the magnetic properties of soils in Volsk and the background area

Магнитные свойства Magnetic property	Минимальное Minimum	Максимальное Maximum	Среднее арифметическое Average	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Экцесс Kurtosis	Асимметрия Asymmetry
Почвы города Вольска / Soils of city of Volsk							
χ_{lf} (10^{-7} м ³ /кг) / χ_{lf} (10^{-7} м ³ /kg)	1,3	29,6	6,16	5,0	0,81	16,04	3,83
χ_{hf} (10^{-7} м ³ /кг) / χ_{hf} (10^{-7} м ³ /kg)	1,25	29,0	5,99	4,97	0,83	16,17	3,86
χ_{fd} (%) / χ_{fd} (%)	0,03	9,85	3,28	2,09	0,63	1,39	1,03
Почвы фонового участка / Soil of background area							
χ_{lf} (10^{-7} м ³ /кг) / χ_{lf} (10^{-7} м ³ /kg)	4,53	5,0	4,79	0,15	0,03	-0,46	-0,61
χ_{hf} (10^{-7} м ³ /кг) / χ_{hf} (10^{-7} м ³ /kg)	4,22	4,65	4,46	0,14	0,03	-0,45	-0,63
χ_{fd} (%) / χ_{fd} (%)	6,9	7,08	6,99	0,07	0,93	-1,70	-0,10

Таким образом, в почвах на территории города Вольска по сравнению с фоновым участком наблюдается повышение средних значений χ_{lf} и χ_{hf} и их значительные вариации, а значения χ_{fd} резко, более чем в два раза, снижаются. Возрастание χ_{lf} и χ_{hf} , скорее всего, связано с попаданием в городские почвы частиц сильномагнитных минералов железа техногенного происхождения. Понижение значений χ_{fd} на городской территории может быть связано с доминированием в городских почвах крупных многодоменных частиц.

Существенная разница в распределении стандартного отклонения, коэффициента вариации, эксцесса и асимметрии в почвах города Вольска и почв фонового участка, на наш взгляд, может являться диагностическим признаком техногенной трансформации почв урбанизированных территории. К такому резкому изменению статистических параметров приводит активное поступление в городские почвы высокомагнитных техногенных и относительно крупных железистых частиц.

Взаимоотношения между магнитной восприимчивостью, подвижными формами тяжелых металлов и органическим веществом.

Результаты определения концентраций подвижных форм тяжелых металлов, органического вещества и магнитных параметров были сопоставлены между собой для нахождения корреляционных взаимосвязей (табл. 2).

Установлены единичные значимые корреляционные взаимосвязи между тяжелыми металлами и величинами магнитной восприимчивости, а также частые значимые корреляционные взаимосвязи между концентрациями органического вещества и подвижных форм тяжелых металлов. Корреляционные коэффициенты Пирсона (значимые при $p < 0.01$) установлены в системах χ_{lf} -Pb (0,55), χ_{hf} -Ni (0,40), χ_{hf} -Cd (0,58) и χ_{hf} -Zn (0,39).

Высокие значения коэффициента корреляции в системе χ_{lf} -Pb могут быть обусловлены тем, что высокомагнитные техногенные соединения железа и подвижные формы свинца поступают в почвы города Вольска из одних источников или имеют общие пути миграции. Известны сведения, что в пыли цементных заводов наблюдаются высокое содержание в них свинца – 1800 мг/кг, цинка – 410 мг/кг, кадмия – 93 мг/кг и меди – 62 мг/кг [1; 7; 19]. Они сохраняются долгое время даже после завершения работы предприятий, являющихся источником загрязнения. Результаты исследования дисперсного состава пыли, образующейся при производстве портландцементного клинкера, говорят о том, что выделяемые из источников загрязнения пыли – полидисперсные. Пыль, выбрасываемая в атмосферу после очистки, содержит более высокие концентрации Cd, Pb и Zn по сравнению с пылью в газовом потоке до очистки.

Таблица 2. Корреляционные взаимосвязи между магнитными свойствами почв и концентрацией тяжелых металлов
Table 2. Correlations between soil magnetic properties and heavy metal concentrations

	χ_{lf}	χ_{fd}	Орг. вещ-во Organic matter	Ni	Cu	Cd	Cr	Pb	Zn
χ_{lf}	1,00	-0,24	0,19	-0,14	0,04	-0,06	0,18	0,55	0,16
χ_{fd}		1,00	0,14	0,31	-0,21	0,02	-0,12	-0,30	-0,04
Орг. вещество Organic matter			1,00	0,40	0,16	0,58	0,33	0,21	0,39

Примечание: $n=50$; $p=0,01$; $r=0,28$

Note: $n=50$; $p=0,01$; $r=0,28$

Отсутствие высоких корреляционных взаимосвязей между магнитной восприимчивостью и другими тяжелыми металлами, возможно, связано с незначительными выбросами исследуемых металлов на территории города Вольска и, как следствие, низкой степенью их накопления в почвах.

Высокие значения коэффициента корреляции между концентрациями органического вещества и подвижных форм тяжелых металлов обнаружены в системах органическое вещество-Ni (0,40), органическое вещество-Cd (0,58) и органическое вещество-Zn (0,39). Значимые коэффициенты корреляции в выявленных ассоциациях, скорее всего, обусловлены сорбцией катионов никеля, кадмия и цинка органическим веществом почвы. Схожие тенденции были выявлены в работах ряда специалистов.

ВЫВОДЫ

1. Почвы города Вольска резко отличаются по петромагнитным свойствам от почв фонового участка об этом свидетельствует рост значений магнитной восприимчивости (χ_{lf} и χ_{hf}), понижение значений (χ_{fd}) и существенная разница в распределении стандартного отклонения, коэффициента вариации, эксцесса и асимметрии в почвах города Вольска и почв фонового участка. Подобные изменения в распределении петромагнитных характеристик почв, на взгляд авторов, являются диагностическими показателями техногенной трансформации последних в пределах урбанизированных территории.

2. Значимые корреляционные взаимосвязи между магнитной восприимчивостью и тяжелыми металлами установлены только для ассоциации χ_{lf} -Pb, что может быть обусловлено возможно единичными источниками наличия магнитных частиц и соединений свинца в составе газопылевых выбросов от производства цемента и их многолетним депонированием в почвах города Вольска. Таким образом, в почвах города Вольска концентрации соединений свинца пропорционально связаны с величинами удельной магнитной восприимчивости, которые определяются присутствием крупных техногенных железистых частиц и обратно пропорционально – с количеством тонкодисперсных суперпарамагнитных соединений железа.

3. Значимых корреляционных взаимосвязей между петромагнитными свойствами и органическим веществом в почвах города Вольск установлено не было, что, на наш взгляд, может также считаться, как

диагностический показатель техногенно-измененных почв на урбанизированных территориях.

4. Сорбционная способность органического вещества по отношению к катионам тяжелых металлов в почвах города Вольска остается на высоком уровне, что подтверждается значимыми коэффициентами корреляции в ассоциациях органическое вещество-Ni (0,40), органическое вещество-Cd (0,58) и органическое вещество-Zn (0,39).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено за счет гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (проект МК-3355.2019.5).

ACKNOWLEDGEMENT

This research was carried out with funding from a grant by the President of the Russian Federation for the support of young Russian scientists (project MK-3355.2019.5).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Blaha U., Appel E., Stanjek H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility // Environmental Pollution. 2008. V. 156. Iss. 2. P. 278-289. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.02.013
2. Magiera T., Strzyszc Z., Kapicka A., Petrovsky E. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe // Geoderma. 2006. V. 130. Iss. 3-4. P. 299-311. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.02.002
3. Wang B., Xia D., Yu Y., Jia J., Xu S. Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China // Environ. Pollut. 2014. V. 184. P. 335-346. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.024
4. Jordanova N.V., Jordanova D.V., Veneva L., Yorova K., Petrovsky E. Magnetic response of soils and heavy metal pollution – a case study // Environ. Sci. Technol. 2003. V. 37. Iss. 19. P. 4417-4424. DOI: 10.1021/es0200645
5. El Baghdadi M., Barakat A., Sajieddine M., Nadem S. Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in urban soil of Beni Mellal City (Morocco) // Environ. Earth Sci. 2012. V. 66. Iss. 1. P. 141-155. DOI: 10.1007/s12665-011-1215-5
6. Chan L.S., Ng S.L., Davis A.M., Yim W.W.S., Yeung C.H. Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's Bay, Hong Kong // Mar. Pollut. Bull. 2001. V. 42. Iss. 7. P. 569-583. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00203-4

7. Morton-Bermea O., Hernandez E., Martinez-Pichardo E., Soler-Arechalde A.M., Lozano Santa-Cruz R., Gonzalez-Hernandez G., Beramendi-Orosco L., Urrutia-Fucugauchi J. Mexico City topsoils: heavy metals vs. magnetic susceptibility // *Geoderma*. 2009. V. 151. Iss. 3-4. P. 121-125. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.03.019
8. Lu S.G., Chen D.J., Wang S.Y., Liu Y.D. Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun-Gui Plateau, China: evidence for pedogenic magnetic minerals // *J. Appl. Geophys.* 2012. V. 77. P. 39-50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.11.008
9. Strzyszc Z., Magiera T. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of Southern Poland // *Phys. Chem. Earth*. 1998. V. 23. Iss. 9-10. P. 1127-1131. DOI: 10.1016/S0079-1946(98)00140-2
10. Lu S.G., Bai S.Q., Fu L.X. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils // *Pedosphere*. 2008. V. 18. Iss. 4. P. 479-485. DOI: 10.1016/S1002-0160(08)60038-7
11. Gudadhe S.S., Sangode S.J., Patil S.K., Chate D.M., Meshram D.C., Badekar A.G. Pre- and post-monsoon variations in the magnetic susceptibilities of soils of Mumbai metropolitan region: implications to surface redistribution of urban soils loaded with anthropogenic particulates // *Environ. Earth Sci.* 2012. V. 67. P. 813-831. DOI: 10.1007/s12665-012-1528-z
12. Lu S.G., Bai S.Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China // *J. Appl. Geophys.* 2006. V. 60. Iss. 1. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.11.002
13. Botsou F., Karageorgis A.P., Dassenakis E., Scoullou M. Assessment of heavy metal contamination and mineral magnetic characterization of the Asopos River sediments (Central Greece) // *Mar. Pollut. Bull.* 2011. V. 62. Iss. 3. P. 547-563. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.11.029
14. Franciškovic-Bilinski S., Bilinski H., Scholger R., Tomašić N., Maldini K. Magnetic spherules in sediments of the karstic Dobra River (Croatia) // *J. Soils Sediments*. 2014. V. 14. P. 600-614. DOI: 10.1007/s11368-013-0808-x
15. Canbay M., Aydin A., Kurtulus C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey) // *J. Appl. Geophys.* 2010. V. 70. Iss. 1. P. 46-57. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.11.002
16. Zhang C., Qiao Q., Appel E., Huang B. Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods // *J. Geochem. Explor.* 2012. V. 119-120. P. 60-75. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.06.014
17. Zhu Z., Han Z., Bi X., Yang W. The relationship between magnetic parameters and heavy metal contents of indoor dust in e-waste recycling impacted area, Southeast China // *Sci. Total Environ.* 2012. V. 433. P. 302-308. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.067
18. Zhu Z., Sun G., Bi X., Li Z., Yu G. Identification of trace metal pollution in urban dust from kindergartens using magnetic, geochemical and lead isotopic analyses // *Atmos. Environ.* 2013. V. 77. P. 9-15. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.053
19. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried paleosols // *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.* 2007. V. 249. Iss. 1. P. 103-127. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.01.006
20. Blundell A., Dearing J.A., Boyle J.F., Hannam J.A. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales // *Earth Sci. Rev.* 2009. V. 95. Iss. 3-4. P. 158-188. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.05.001
21. Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T. Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a paleorainfall proxy // *Quatern. Sci. Rev.* 2002. V. 21. Iss. 14. P. 1571-1576. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00022-7
22. Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation // *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.* 2003. V. 201. Iss. 3-4. P. 321-341. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00618-7
23. Maher B.A., Hallam D.F. Paleomagnetic correlation and dating of Pilo/Pleistocene sediments at the southern margins of the North Sea Basin // *J. Quat. Sci.* 2005. V. 20. Iss. 1. P. 67-77. DOI: 10.1002/jqs.890
24. Yang T., Liu Q., Zeng Q., Chan L. Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: implications for magnetic mapping // *Environ. Earth Sci.* 2012. V. 66. P. 409-420. DOI: 10.1007/s12665-011-1248-9
25. Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements // *Environ. Geol.* 2002. V. 42. P. 857-870. DOI: 10.1007/s00254-002-0604-1
26. Zawadzki J., Fabijańczyk P. Reduction of soil contamination uncertainty assessment using magnetic susceptibility measurements and co-est method // *Proc. ECOpole*. 2008. V. 2. Iss. 1. P. 171-174.
27. D'Emilio M., Macchiato M., Ragosta M., Simoniello T. A method for the integration of satellite vegetation activities observations and magnetic susceptibility measurements for monitoring heavy metals in soil // *J. Hazard. Mater.* 2012. V. 241-242. P. 118-126. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.09.021

REFERENCES

1. Blaha U., Appel E., Stanjek H. Determination of anthropogenic boundary depth in industrially polluted soil and semi-quantification of heavy metal loads using magnetic susceptibility. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 156, iss. 2, pp. 278-289. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.02.013
2. Magiera T., Strzyszc Z., Kapicka A., Petrovsky E. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. *Geoderma*, 2006, vol. 130, iss. 3-4, pp. 299-311. DOI: 10.1016/j.geoderma.2005.02.002
3. Wang B., Xia D., Yu Y., Jia J., Xu S. Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China. *Environ. Pollut.*, 2014, vol. 184, pp. 335-346. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.08.024
4. Jordanova N.V., Jordanova D.V., Veneva L., Yorova K., Petrovsky E. Magnetic response of soils and heavy metal pollution – a case study. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, vol. 37, iss. 19, pp. 4417-4424. DOI: 10.1021/es0200645
5. El Baghdadi M., Barakat A., Sajieddine M., Nadem S. Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in

- urban soil of Beni Mellal City (Morocco). *Environ. Earth Sci.*, 2012, vol. 66, iss. 1, pp. 141-155. DOI: 10.1007/s12665-011-1215-5
6. Chan L.S., Ng S.L., Davis A.M., Yim W.W.S., Yeung C.H. Magnetic properties and heavy-metal contents of contaminated seabed sediments of Penny's Bay, Hong Kong. *Mar. Pollut. Bull.*, 2001, vol. 42, iss. 7, pp. 569-583. DOI: 10.1016/S0025-326X(00)00203-4
7. Morton-Bermea O., Hernandez E., Martinez-Pichardo E., Soler-Arechalde A.M., Lozano Santa-Cruz R., Gonzalez-Hernandez G., Beramendi-Orosco L., Urrutia-Fucugauchi J. Mexico City topsoils: heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma*, 2009, vol. 151, iss. 3-4, pp. 121-125. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.03.019
8. Lu S.G., Chen D.J., Wang S.Y., Liu Y.D. Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun-Gui Plateau, China: evidence for pedogenic magnetic minerals. *J. Appl. Geophys.*, 2012, vol. 77, pp. 39-50. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2011.11.008
9. Strzyszczyk Z., Magiera T. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of Southern Poland. *Phys. Chem. Earth.*, 1998, vol. 23, iss. 9-10, pp. 1127-1131. DOI: 10.1016/S0079-1946(98)00140-2
10. Lu S.G., Bai S.Q., Fu L.X. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedosphere*, 2008, vol. 18, iss. 4, pp. 479-485. DOI: 10.1016/S1002-0160(08)60038-7
11. Gudadhe S.S., Sangode S.J., Patil S.K., Chate D.M., Meshram D.C., Badekar A.G. Pre- and post-monsoon variations in the magnetic susceptibilities of soils of Mumbai metropolitan region: implications to surface redistribution of urban soils loaded with anthropogenic particulates. *Environ. Earth Sci.*, 2012, vol. 67, pp. 813-831. DOI: 10.1007/s12665-012-1528-z
12. Lu S.G., Bai S.Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Appl. Geophys.*, 2006, vol. 60, iss. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2005.11.002
13. Botsou F., Karageorgis A.P., Dassenakis E., Scoullou M. Assessment of heavy metal contamination and mineral magnetic characterization of the Asopos River sediments (Central Greece). *Mar. Pollut. Bull.*, 2011, vol. 62, iss. 3, pp. 547-563. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2010.11.029
14. Francišković-Bilinski S., Bilinski H., Scholger R., Tomašić N., Maldini K. Magnetic spherules in sediments of the karstic Dobra River (Croatia). *J. Soils Sediments.*, 2014, vol. 14, pp. 600-614. DOI: 10.1007/s11368-013-0808-x
15. Canbay M., Aydin A., Kurtulus C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey). *J. Appl. Geophys.*, 2010, vol. 70, iss. 1, pp. 46-57. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2009.11.002
16. Zhang C., Qiao Q., Appel E., Huang B. Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods. *J. Geochem. Explor.*, 2012, vol. 119-120, pp. 60-75. DOI: 10.1016/j.gexplo.2012.06.014
17. Zhu Z., Han Z., Bi X., Yang W. The relationship between magnetic parameters and heavy metal contents of indoor dust in e-waste recycling impacted area, Southeast China. *Sci. Total Environ.*, 2012, vol. 433, pp. 302-308. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.067
18. Zhu Z., Sun G., Bi X., Li Z., Yu G. Identification of trace metal pollution in urban dust from kindergartens using magnetic, geochemical and lead isotopic analyses. *Atmos. Environ.*, 2013, vol. 77, pp. 9-15. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.053
19. Alekseeva T., Alekseev A., Maher B.A., Demkin V. Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried paleosols. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 2007, vol. 249, iss. 1, pp. 103-127. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.01.006
20. Blundell A., Dearing J.A., Boyle J.F., Hannam J.A. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth Sci. Rev.*, 2009, vol. 95, iss. 3-4, pp. 158-188. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.05.001
21. Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T. Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a paleorainfall proxy. *Quatern. Sci. Rev.*, 2002, vol. 21, iss. 14, pp. 1571-1576. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00022-7
22. Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 2003, vol. 201, iss. 3-4, pp. 321-341. DOI: 10.1016/S0031-0182(03)00618-7
23. Maher B.A., Hallam D.F. Paleomagnetic correlation and dating of Pilo/Pleistocene sediments at the southern margins of the North Sea Basin. *J. Quat. Sci.*, 2005, vol. 20, iss. 1, pp. 67-77. DOI: 10.1002/jqs.890
24. Yang T., Liu Q., Zeng Q., Chan L. Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: implications for magnetic mapping. *Environ. Earth Sci.*, 2012, vol. 66, pp. 409-420. DOI: 10.1007/s12665-011-1248-9
25. Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ. Geol.*, 2002, vol. 42, pp. 857-870. DOI: 10.1007/s00254-002-0604-1
26. Zawadzki J., Fabijańczyk P. Reduction of soil contamination uncertainty assessment using magnetic susceptibility measurements and co-est method. *Proc. ECOpole*, 2008, vol. 2, iss. 1, pp. 171-174.
27. D'Emilio M., Macchiato M., Ragosta M., Simoniello T. A method for the integration of satellite vegetation activities observations and magnetic susceptibility measurements for monitoring heavy metals in soil. *J. Hazard. Mater.*, 2012, vol. 241-242, pp. 118-126. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.09.021

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Длер С. Маджид проводил отбор проб почв, определял концентрации тяжелых металлов. Михаил В. Решетников написал рукопись. Виталий Н. Ерёмин проводил

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Deler S. Majeed undertook soil sampling and the determination of the concentration of heavy metals. Mikhail V. Reshetnikov wrote the manuscript. Vitaliy N. Eremin undertook

петромагнитные измерения и их анализ. Александр С. Шешнёв готовил литературный обзор, составлял графические приложения. Все авторы в равной степени несут ответственность за плагиат и самоплагиат.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

petromagnetic measurements and their analysis. Alexander S. Sheshnev conducted a literature review and drew the graphic applications. All authors are equally responsible for plagiarism and self-plagiarism.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors state that there is no conflict of interest.

ORCID

Длер С. Маджид / Dler S. Majeed <https://orcid.org/0000-0001-5323-1222>

Михаил В. Решетников / Mikhail V. Reshetnikov <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

Виталий Н. Ерёмин / Vitaliy N. Eremin <https://orcid.org/0000-0001-5784-6777>

Александр С. Шешнёв / Alexander S. Sheshnev <https://orcid.org/0000-0003-3566-8652>