

Оригинальная статья / Original article
УДК 631.48:504.53/54
DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-144-152



Особенности распределения подвижных форм тяжёлых металлов и магнитных свойств почв рекреационной зоны «Дубравный лес» города Казань

Лейсан А. Фаттахова¹, Михаил В. Решетников², Диляра М. Кузина¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть», Когалым, Россия

Контактное лицо

Михаил В. Решетников, кандидат географических наук, начальник отдела минералогических исследований, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Пермь; 628486 Россия, г. Когалым, ул. Центральная, д. 19. Тел. +79527072275
Email rmy85@list.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

Формат цитирования

Фаттахова Л.А., Решетников М.В., Кузина Д.М. Особенности распределения подвижных форм тяжёлых металлов и магнитных свойств почв рекреационной зоны «Дубравный лес» города Казань // Юг России: экология, развитие. 2023. Т.18, N 3. С. 144-152. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-144-152

Получена 8 ноября 2022 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2023 г.

Принята 10 августа 2023 г.

Резюме

Цель. Сопоставить результаты изучения магнитных свойств и концентрации тяжелых металлов в почвах рекреационной зоны «Дубравный лес» города Казани для обоснования применения петромагнитного метода при проведении эколого-геохимических исследований на урбанизированных территориях.

Материал и методы. Объектом исследования является почвенный покров в лесном массиве «Дубравный лес», исследованный петромагнитными методами (магнитная восприимчивость, дифференциальный термомагнитный анализ) и методом атомной абсорбционной спектроскопии.

Результаты. Согласно результатам проведенных исследований, в изученной светло-серой лесной почве измерения магнитной восприимчивости и концентрации подвижных форм тяжелых металлов не противоречат друг другу и свидетельствуют об отсутствии в исследуемых почвах магнитных минералов и тяжёлых металлов техногенного происхождения.

Заключение. Результаты исследований магнитной восприимчивости указывают на отсутствие загрязнения почв соединениями тяжёлых металлов, что было подтверждено по результатам определения подвижных форм тяжёлых металлов атомно-абсорбционным методом.

Ключевые слова

Магнитная восприимчивость, почва, тяжёлые металлы, никель, свинец, медь, цинк, Казань, Дубравный лес.

Distribution features of mobile forms of heavy metals and magnetic properties of soils in the Dubravniy Forest recreational area of the city of Kazan, Russia

Leysan A. Fattakhova¹, Mikhail V. Reshetnikov² and Dilyara M. Kuzina¹

¹Kazan (Volga Federal University), Kazan, Russia

²LUKOIL-Engineering's PermNIPneft branch, Kogalym, Russia

Principal contact

Mikhail V. Reshetnikov, Ph.D. in Geography, Head, Mineralogical Research Department, Branch of OOO LUKOIL-Engineering PermNIPneft; 19 Centralnaya St, Kogalym, Perm, 628486 Russia.

Tel. +79527072275

Email rmv85@list.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>

How to cite this article

Fattakhova L.A., Reshetnikov M.V., Kuzina D.M. Distribution features of mobile forms of heavy metals and magnetic properties of soils in the Dubravniy Forest recreational area of the city of Kazan, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2023, vol. 18, no. 3, pp. 144-152. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2023-3-144-152

Received 8 November 2022

Revised 14 April 2023

Accepted 10 August 2023

Abstract

Aim. To compare the results of studying the magnetic properties and concentration of heavy metals in the soils of the Dubravniy Forest recreational zone of Kazan to justify the use of the petromagnetic method in conducting ecological and geochemical studies in urbanised areas.

Material and Methods. The object of the study is the soil cover in the "Dubravniy Forest", using petromagnetic methods (magnetic susceptibility, differential thermomagnetic analysis) and atomic absorption spectrometry.

Results. According to the results of the studies conducted into the light-gray forest soil, the measurements of magnetic susceptibility and concentration of mobile forms of heavy metals do not contradict each other and indicate the absence of magnetic minerals and heavy metals of technogenic origin.

Conclusions. The results of magnetic susceptibility studies indicate the absence of soil contamination with heavy metal compounds, which was confirmed by the results of the determination of mobile forms of heavy metals by the atomic absorption method.

Key Words

Magnetic susceptibility, soil, heavy metals, nickel, lead, copper, zinc, Kazan, Dubravniy forest.

ВВЕДЕНИЕ

Рекреационные зоны в пределах урбанизированных территорий являются объектами повышенного внимания со стороны природоохранных служб. Загрязнение окружающей среды рекреационных зон в городах происходит от разных промышленных источников и объектов инфраструктуры (автомобильные дороги, железные дороги, трамвайные пути и другие). Во многих городах местом отдыха жителей являются рекреационные зоны (парки, скверы), которые в большинстве случаев расположены в центральных исторических частях города и имеют многолетнюю историю негативного воздействия на компоненты окружающей среды. В основном загрязнению различными компонентами подвергается почвенный покров рекреационных экосистем в пределах городских территорий, а основным загрязнителем являются соединения тяжёлых металлов [1–4].

В последние годы для оперативного анализа почв тяжёлыми металлами используются данные петромагнитного метода, основанного на изучении магнитных свойств почв [5; 6]. Значительным количеством исследований были установлены корреляционные взаимосвязи между концентрациями тяжёлых металлов в почвах, дорожной пыли и донных отложениях и их магнитными свойствами [7–16]. Установленные взаимосвязи обусловлены тем, что магнитные минералы, содержащиеся в почве, имеют общие пути миграции с соединениями тяжёлых металлов, а также активно сорбируют их. Чем больше в почву поступает техногенных магнитных минералов, тем

выше магнитная восприимчивость почв, тем потенциально в почве может содержаться большее количество тяжёлых металлов.

Картирование почв на основе изучения магнитных свойств почв является одним из наиболее важных инструментов для оценки антропогенного загрязнения [17] и широко используется при картировании загрязнения тяжёлыми металлами [18; 19].

В развитие наших исследований были изучены взаимосвязи между магнитными свойствами и концентрацией подвижных форм тяжёлых металлов в почвах рекреационной зоны «Дубравный лес» города Казань.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область исследований

Объект исследования – светло-серая лесная среднесуглинистая почва, расположенная на долинно-террасовом комплексе р. Волги юго-восточнее г. Казани в лесном массиве «Дубравный лес». Исследуемая территория находится в широколиственной подзоне суббореальной северной семигумидной ландшафтной зоны Волго-Мешинского возвышенного района с восточно-европейскими широколиственными лесами.

Почвенный покров обследованного участка в основном сложен светло-серыми лесными почвами, которые приурочены к плакорным участкам высокой надпойменной террасы. Разрез почвенного профиля представлен на рисунке 1а. Далее приводим морфологическое описание данного разреза.

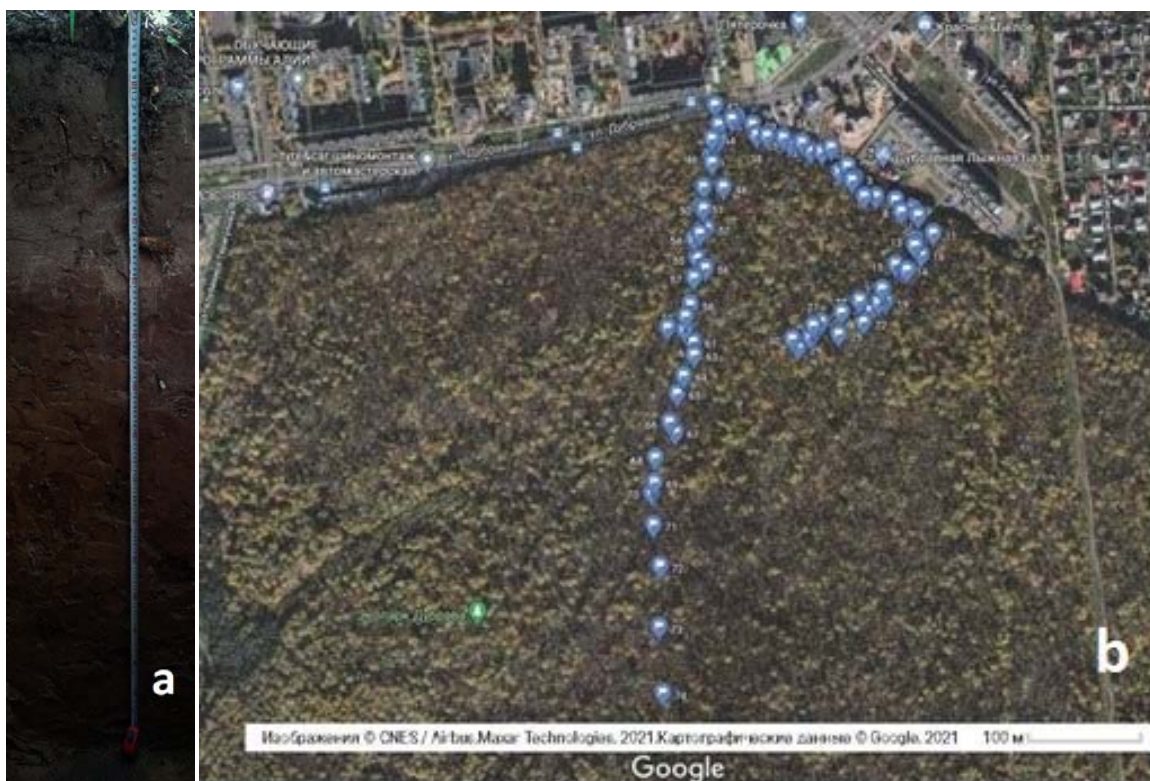


Рисунок 1. Отбор почвенных проб: а – разрез почвенного профиля, б – схема отбора проб

Figure 1. Soil sampling: a – a section of the soil profile, b – sampling scheme

Профиль: А0–А1–А1А2–ВА2–В1–В2–С–D.

А0 (0–2 см) остатки лесной подстилки и травянистой растительности разной степени разложения.

А1 (2–25 см) свежий, светло-серый (по шкале Манселла высушенный и растертый образец 10YR5/4 (dull yellowish brown), густо пронизанный корнями,

образующими в верхней части дернину неоднородной мощности (4–7 см), зернисто-комковато-порошистый, плотноватый, средний суглинок, граница ровная, переход ясный.

A1A2 (25–31 см) свежий, серовато-белесый, неоднородно окрашенный (на светло сером фоне хорошо видна белесая полосчатость, отдельные белесые и серые пятна, плитчатый, местами пластинчаточешуйчатый, плотноватый, средний суглинок, граница волнистая, переход заметный по цвету и структуре.

BA2 (31–39 см) свежий, неоднородно окрашенный (на светло сером фоне хорошо заметны бурые пятна, более светлые фрагменты имеют тенденцию к горизонтальной делимости, более темные фрагменты ореховатой структуры с обильной белесой присыпкой по граням отдельностей, плотноватый, средний суглинок, граница волнистая, переход заметный по цвету и структуре.

B1 (39–68 см) влажный, в верхней части бурокоричневый, книзу буроватый, с отчетливо выраженной многопорядковой призмовидно-ореховатой структурой, с белесой присыпкой и темно-коричневыми глянцевитыми пленками и корочками по граням отдельностей, плотный, тяжелый суглинок, граница размытая переход постепенный по цвету и структуре.

B2 (68–95 см) влажный, желто-бурый, светлее предыдущего, четкой крупнопризматической-структуры, плотный, тяжелый суглинок, постепенно переходит в породу

C (95–154 см) влажный, желто-бурый делювиальный тяжелый бескарбонатный суглинок.

D (154 см и более) сырой, желтый, бесструктурный, рыхлый, песок, при осмотре с использованием лупы поверхность частиц песка имеет хорошо выраженную окатанность.

Отбор почвенных образцов

Почвенные пробы для исследований отбирались с глубины 0–15 см, гомогенизировались. Всего было отобрано 74 пробы по наиболее популярным среди посетителей лесопарка тропинкам и дорожкам (рис. 1b).

Лабораторные исследования

Для удаления органического вещества почвенные образцы в течение 15 дней подвергались многократной обработке H_2O_2 (30 %) при комнатной температуре. Последующие операции включали отделение осадка центрифугированием, его высушивание и гомогенизацию. Для измерения магнитной восприимчивости χ использовался мультиспектральный датчик AGICO MFK1-FA. Предварительно все образцы были измельчены в агатовой ступке и проведена нормировка по массе проб [24].

Термомагнитный анализ образцов проводился на экспрессных весах Кюри путем измерения зависимости индуктивной намагниченности от температуры при скорости нагрева $100^\circ C/мин$ до $800^\circ C$ в магнитном поле 0,4 Тл [20].

Для получения коэрцитивных спектров нормального намагничивания до полей 0,5 Тл использовался коэрцитивный спектрометр «J-meter» [20; 21], позволяющий отдельно регистрировать остаточную и индуктивную намагниченность образцов при комнатной температуре. Намагничивание образцов проводилось из естественного состояния с шагом 1 мТ. По кривым намагничивания были определены

следующие параметры: нормальная остаточная намагниченность насыщения (J_{rs}); намагниченность насыщения за вычетом парамагнитной компоненты (J_s); коэрцитивная сила намагниченности насыщения за вычетом влияния парамагнитной компоненты (B_c); коэрцитивная сила остаточной намагниченности насыщения (B_{cr}) [24].

Концентрация подвижных форм Cu, Ni, Pb и Zn определялась в экстракте 1М HNO_3 методом атомной абсорбционной спектрометрии на приборе КВАНТ-2АТ.

Обработку данных проводили с использованием пакетов MS Excel и Grapher.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Магнитная восприимчивость почв

Присутствие тяжелых металлов в почве можно определить с помощью магнитной восприимчивости [22], которая является косвенным индикатором техногенного загрязнения почв в силу того, что экологически опасные техногенные элементы являются, в первую очередь, ферромагнетиками. Результаты измерения магнитной восприимчивости приведены на рисунках 2 и 3.

Графический анализ показывает, что светло-серая лесная почва характеризуется аккумулятивным типом профильных картин распределения магнитной восприимчивости (рис. 2). Селективное удаление органического вещества не оказывает влияния на картину профильной дифференциации магнитной восприимчивости [24]. Несколько повышенные абсолютные значения χ в верхней части профиля можно приписать удалению ОВ, поскольку измерение магнитной восприимчивости проводилось в пробах, нормированных по массе [24]. Коэрцитивные спектры позволяют экспериментально определить значения величин диа-/парамагнитной (χ_p), ферромагнитной (χ_f) и суперпарамагнитной (χ_{sp}) составляющих магнитной восприимчивости [23]. Вид кривых парамагнитной и ферромагнитной составляющих магнитной восприимчивости однозначно показывают, что прирост магнитной восприимчивости в органогенных горизонтах светло-серой лесной почвы обусловлен вкладом ферромагнитной компоненты [24] (рис. 2).

На рисунке 3 представлены значения магнитной восприимчивости для проб, отобранных с глубины 0–15 см. Черная кривая показывает значения магнитной восприимчивости у исходных образцов почв, красная кривая – значения магнитной восприимчивости образцов после удаления органического вещества. Если судить только по данным магнитной восприимчивости то, в «Дубравном лесу», никакого загрязнения тяжелыми металлами нет.

Дифференциальный термомагнитный анализ

Диаграммы дифференциального термомагнитного анализа почвенных образцов из «Дубравного леса» однотипны. На них наблюдается несколько характерных признаков: небольшой рост намагниченности в диапазоне $310^\circ C$ и $500^\circ C$, что связано с наличием в почве сульфидов или карбонатов железа. Наличие этих минералов наиболее ярко прослеживается в верхней части профиля, затем интенсивность пиков падает, что указывает на уменьшение их количества. При нагреве они диссоциируют с образованием магнетита, что, видимо, и является причиной более интенсивного магнетитового пика ($\sim 580^\circ C$) на дифференциальной кривой. Магнетит также присутствует в образцах изначально. Начиная с середины профиля на диффе-

ренциальной кривой первого нагрева очевидно выделяется только магнетитовый пик, который при дальнейшем изучении вниз по профилю практически не

изменяется по амплитуде и температуре, что свидетельствует о практически неизменном содержании этого минерала в нижней половине профиля (рис. 4).

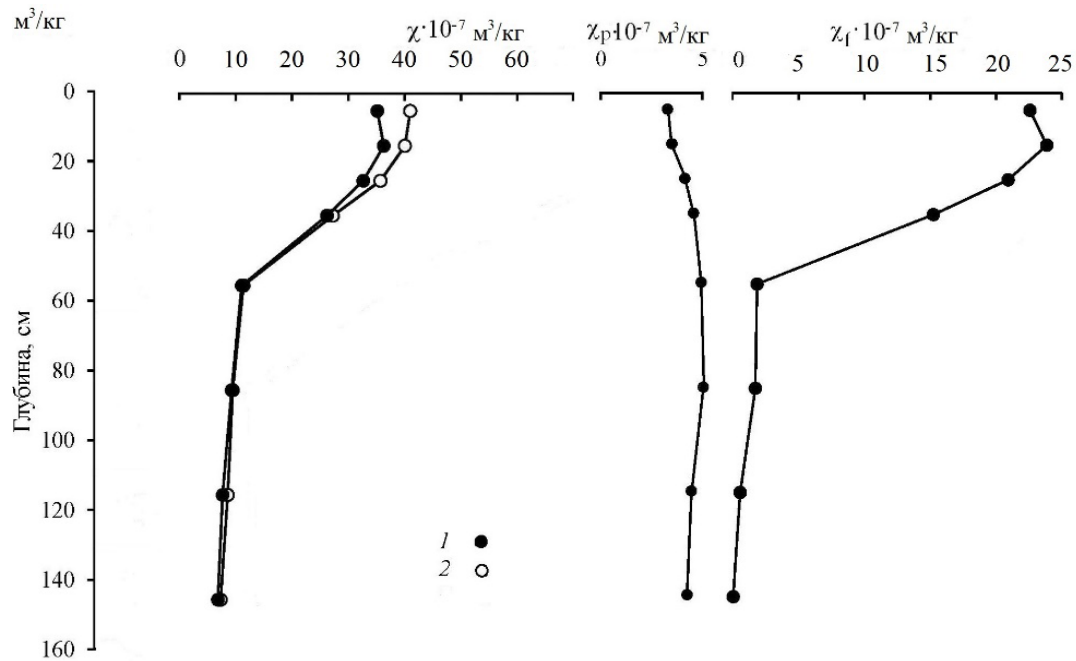


Рисунок 2. Профильные распределения магнитных параметров светло-серой лесной почвы: 1 – исходные образцы; 2 – образцы после удаления органического вещества

Figure 2. Profile distributions of magnetic parameters of light gray forest soil: 1 – original samples; 2 – samples after removal of organic matter

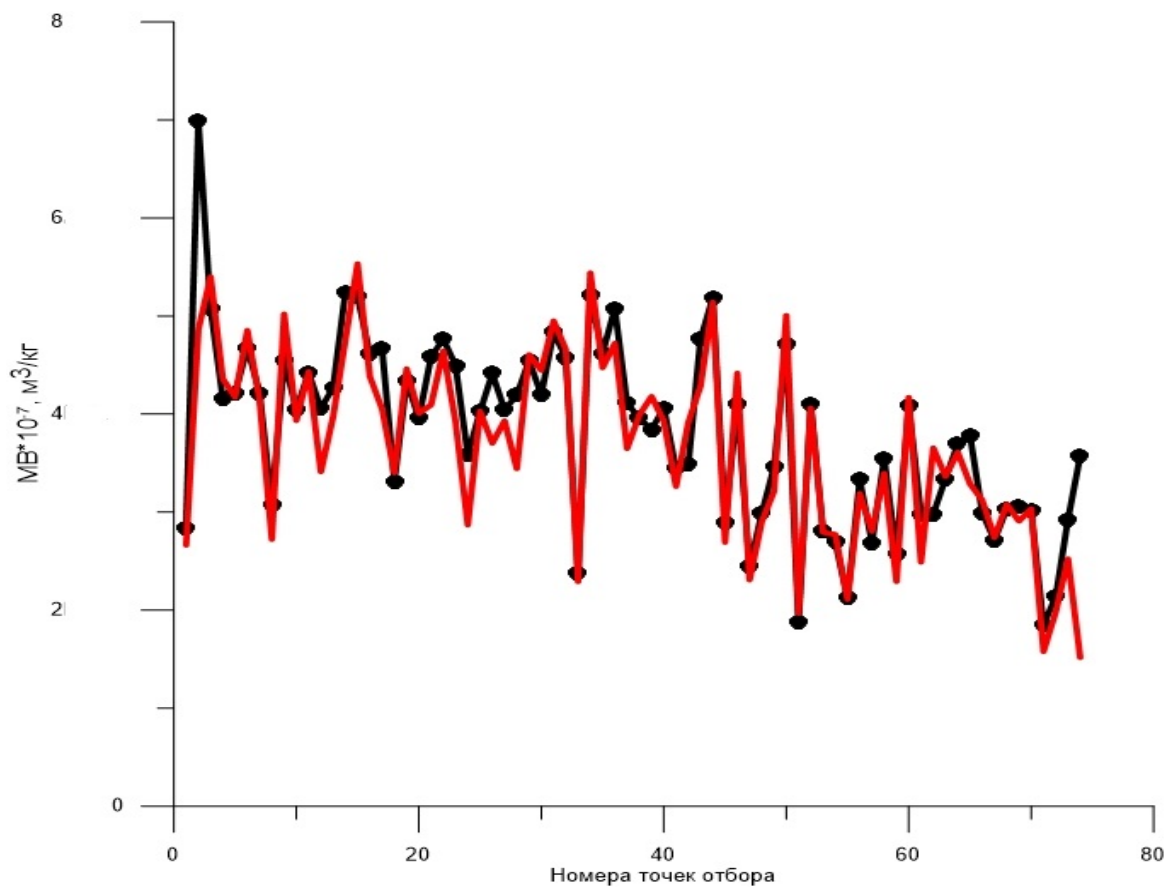


Рисунок 3. Значения магнитной восприимчивости по 74 пробам с глубины 0–15 см:

черная кривая – исходные образцы, красная кривая – образцы после удаления органического вещества

Figure 3. Magnetic susceptibility values for 74 samples from 0–15 cm depth:

black curve – original samples, red curve – samples after removal of organic matter

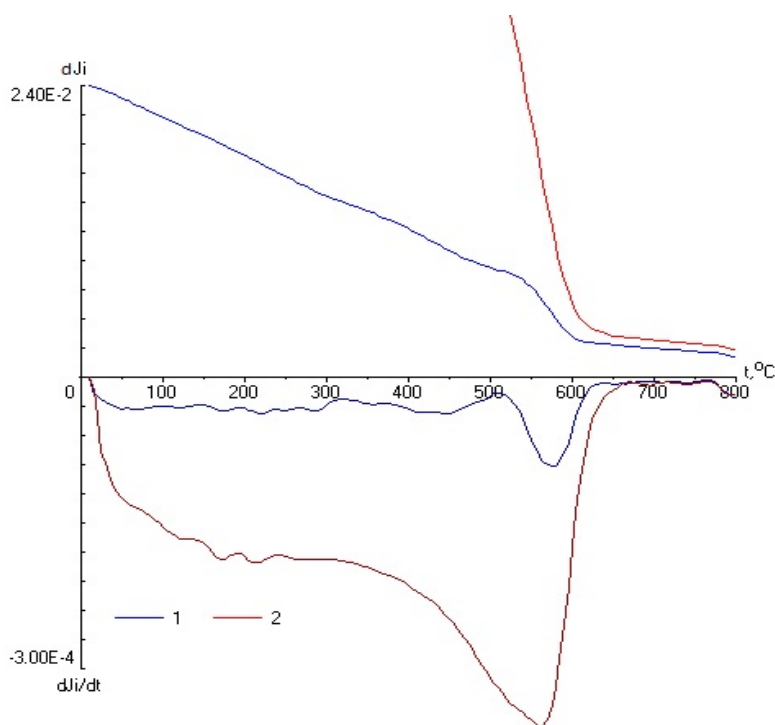


Рисунок 4. Кривые дифференциального термоманнитного анализа образца № 51 «Дубравный лес».

Синяя кривая – первый нагрев, красная кривая – второй нагрев

Figure 4. Curves of detailed thermomagnetic analysis of sample No. 51 "Dubravniy forest".

Blue curve – first heating, red curve – second heating

Тяжелые металлы

Во всех образцах определялась концентрация подвижных форм следующих тяжёлых металлов: никель, медь,

цинк и свинец. По результатам проведенных исследований установлено следующее их распределение.

Таблица 1. Результаты определения подвижных форм тяжелых металлов

Table 1. Results of determination of mobile forms of heavy metals

Металл Metal	Мини- мальное Minimum	Макси- мальное Maximum	Среднее арифметическое Arithmetic average	Стандартное отклонение Standard deviation	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Экссесс Kurtosis	Асимметрия Asymmetry
Ni (мг/кг) Ni (mg/kg)	1,37	8,02	4,39	1,30	0,29	0,06	0,15
Cu (мг/кг) Cu (mg/kg)	1,08	8,03	4,30	2,03	0,47	-1,34	-0,08
Pb (мг/кг) Pb (mg/kg)	0,19	1,73	0,53	0,28	0,52	7,45	2,41
Zn (мг/кг) Zn (mg/kg)	1,92	28,74	12,24	5,45	0,44	0,03	0,67

Подвижные формы меди измерены во всех образцах в концентрации от 1,08 до 8,03 мг/кг, при среднем значении 4,30 мг/кг. Предельно допустимая концентрация подвижных форм меди в почвах составляет 3 мг/кг, соответственно коэффициент опасности изменяется в интервале от 0,36 до 2,68 единиц, при среднем значении 1,43. Загрязнение почв исследуемой территории подвижными формами никеля обнаружено в 51 из 74 образцах (68,9 %).

Подвижные формы никеля были определены во всех образцах в концентрации от 1,37 до 8,02 мг/кг, при среднем значении 4,39 мг/кг. Предельно допустимая концентрация подвижных форм никеля в почвах составляет 4 мг/кг, соответственно коэффициент опасности изменяется в интервале от 0,34 до 2,01 единиц, при среднем значении 1,1. Загрязнение

почв исследуемой территории подвижными формами никеля обнаружено в 45 из 74 образцах (60,8 %).

Подвижные формы цинка определены во всех образцах в концентрации от 1,92 до 28,74 мг/кг, при среднем значении 12,24 мг/кг. Предельно допустимая концентрация подвижных форм цинка в почвах составляет 23 мг/кг, соответственно коэффициент опасности изменяется в интервале от 0,08 до 1,25 единиц, при среднем значении 0,53. Загрязнение почв исследуемой территории подвижными формами никеля обнаружено в 2 из 74 образцах (2,7 %).

Подвижные формы свинца обнаружены во всех образцах в концентрации от 0,19 до 1,73 мг/кг, при среднем значении 0,53 мг/кг. Предельно допустимая концентрация подвижных форм свинца в почвах составляет 6 мг/кг, соответственно коэффициент опас-

ности изменяется в интервале от 0,03 до 0,29 единиц, при среднем значении 0,09. Загрязнение почв исследуемой территории подвижными формами свинца не установлено.

Геохимический ряд по средней концентрации элементов для исследуемых почв выглядит следующим образом: $Zn > Ni > Cu > Pb$, а по среднему значению коэффициента опасности $Cu > Ni > Zn > Pb$. Основными элементами загрязнителями почв на исследуемой территории являются соединения меди и никеля, но вследствие, того, что их концентрации не значительно превышают предельно допустимые, то степень загрязнения почв оценивается как допустимая. Скорее всего, установленные значения элементов являются

региональными значениями для исследуемых почв и не являются результатом техногенного воздействия.

Таким образом, результаты измерения магнитных свойств исследуемых почв, указывающие на отсутствие загрязнения тяжелыми металлами подтверждены результатами определения подвижных форм тяжелых металлов методом атомной абсорбции.

Взаимоотношения между магнитной восприимчивостью и подвижными формами тяжелых металлов

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

Таблица 2. Корреляционные взаимосвязи между магнитными свойствами и концентрацией подвижных форм тяжелых металлов

Table 2. Correlations between magnetic properties and concentration of mobile forms of heavy metals

	$\chi+OM$	χ	Ni	Cu	Pb	Zn
$\chi+OM$	1,00	0,9	0,08	0,02	0,16	0,01
χ		1,00	0,23	0,11	0,24	0,14
Ni			1,00	0,63	0,49	0,82
Cu				1,00	0,55	0,66
Pb					1,00	0,68
Zn						1,00

Примечание: $n=74$; $p=0,001$; $r=0,38$

Note: $n=74$; $p=0.001$; $r=0.38$

При расчётах были установлены значимые коэффициенты корреляции (при $p < 0,001$) для всех пар исследуемых подвижных форм тяжелых металлов, что свидетельствует об едином источнике поступления данных элементов в почву в данном случае об их унаследованности от геологической матрицы материнских пород.

Отсутствие высоких корреляционных взаимосвязей между магнитной восприимчивостью и тяжелыми металлами, возможно, связано с незначительными выбросами металлов на исследуемой территории. Особый интерес вызывает значительный рост значений коэффициентов корреляции при анализе данных магнитной восприимчивости после удаления органического вещества, по сравнению с данными, полученными без проведения данной процедуры. Возможно, это связано с удалением магнитных минералов, имеющих биогенное происхождение или связанных с органическим веществом

ВЫВОДЫ

1. Исследованная светло-серая лесная почва характеризуется аккумулятивным типом профильного распределения магнитной восприимчивости.
2. По оценке вклада диа-/парамагнитной, суперпарамагнитной и ферромагнитной компонент по коэрцитивным спектрам выявлено, что основной вклад в магнитную восприимчивость вносит ферромагнитная компонента. По данным термомагнитного анализа показано, что прирост магнитной восприимчивости в светло-серой лесной почве обусловлен вкладом ферромагнитных минералов магнетитовой природы. По данным измерений магнитной восприимчивости в поверхностных слоях глубиной до 15 см загрязнение тяжелыми металлами отсутствует.
3. Проведенные исследования содержания подвижных форм тяжелых металлов методом атомной

абсорбции показало превышение над предельно допустимыми концентрациями меди и никеля и отсутствие загрязнения соединениями цинка и свинца. Установленные загрязнения незначительны и позволяют отнести почвы к категории «допустимое загрязнение».

4. Результаты измерения магнитной восприимчивости и концентрации подвижных форм тяжелых металлов не противоречат друг другу и свидетельствуют об отсутствии в исследуемых почвах магнитных минералов и тяжёлых металлов техногенного происхождения. Значимые коэффициенты корреляции между значениями подвижных форм тяжёлых металлов указывают об их общем происхождении – минералогический состав материнских пород.

5. Установленный рост значений коэффициентов корреляции между магнитной восприимчивостью после удаления органического вещества и концентрацией подвижных форм тяжелых металлов, по сравнению с магнитной восприимчивостью до удаления органического вещества, возможно, необходимо использовать как методический подход при проведении комплексных петромагнитных и эколого-геохимических исследований.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности и за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030).

ACKNOWLEDGMENT

This work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment project № FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities and has been

supported by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (PRIORITY-2030).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еремин В.Н., Шешнев А.С., Решетников М.В., Теслинова О.В. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах Ботанического сада Саратовского университета // Известия Саратовского университета. 2020. Т. 20. N 1. С. 41–45. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-41-45>
2. Шешнев А.С., Еремин В.Н., Решетников М.В., Теслинова О.В. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах на территории рекреационной зоны "Парк Победы" (Саратов) // Известия Саратовского университета. 2020. Т. 20. N 4. С. 256–261. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-4-256-261>
3. Шешнев А.С., Еремин В.Н., Прокофьева Е.В., Решетников М.В. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвенном покрове городского парка города Вольска // Известия Саратовского университета. 2018. Т. 18. N 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-1-62-69>
4. Маджид Д.С., Решетников М.В., Еремин В.Н., Шешнев А.С. Концентрация подвижных форм тяжелых металлов и магнитные свойства почв г. Вольск Саратовской области // Юг России: экология, развитие. 2020. Т. 15. N 1(54). С. 137–144. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-137-144>
5. Evans M., Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego: Acad. Press, 2003. 311 p.
6. Liu Q., Robersts A.P., Larrasoña J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Old-field F. Environmental magnetism: Principles and applications // Rev. Geophys. 2012. V. 50. N 4. Art. RG4002. P. 1–50.
7. Magiera T., Strzyszcz Z., Rachwal M. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe // Geoderma. 2006. V. 130. N 3–4. P. 299–311.
8. Magiera T., Strzyszcz Z., Rachwal M. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia Industrial Region, Poland // Forest ecology and management. 2007. V. 248. N 1–2. P. 36–42.
9. Lu S.G., Bai S.Q., Fu L.X. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils // Pedosphere. 2008. N 18. P. 479–485.
10. Sapkota B., Cioppa M. Using magnetic and chemical measurements to detect atmospherically-derived metal pollution in artificial soils and metal uptake in plants // Environmental pollution. 2012. V. 170. P. 131–144.
11. 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. N 66. P. 141–155.
12. 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. N 67. P. 813–831.
13. Boguta P., Sokołowska Z. Interactions of Zn (II) ions with humic acids isolated from various type of soils. Effect of pH, Zn concentrations and humic acids chemical properties // PLoS One. 2016. T. 11. N 4. Article number: e0153626.
14. Yurtseven-Sandker A., Cioppa M. T. Tracking the historical traces of soil pollution from an iron-sintering plant by using magnetic susceptibility in Wawa, Ontario, Canada // Water, Air, Soil Pollution. 2016. V. 227. N 12. P. 1–20.
15. Menshov O., Kruhlov B., Andreeva O. Magnetic and atmogeochemical studies at the hydrocarbon area Nedilna, Ukraine // Materials of International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring. 2021. V. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2034>
16. Maity R., Venkateshwarlu M., Mondal S., Kapawar M., Gain D., Chatterjee S., Paul P. Mineral magnetic and geochemical characterization of the dust and soils around Mejia Thermal Power Plant, West Bengal: Implications to source apportionment // Journal of Earth System Science. 2022. V. 131. N 138. <https://doi.org/10.1007/s12040-022-01882-5>
17. 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. N 66. P. 409–420.
18. Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements // Environ. Geol. 2002. N 42. P. 857–870.
19. Zawadzki J., Fabijanczyk P., Reduction of soil contamination uncertainty assessment using magnetic susceptibility measurements and coest method // Proc. ECOpole. 2008. N 2(1). P. 171–174.
20. Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Яонов П.Г. Палеомагнитный анализ // Изд-во Казан. ун-та. 1986. 167 с.
21. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov V.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica. 1998. V. 49. P. 224–226.
22. Вадюнина А.Ф., Бабанин В.Ф. Магнитная восприимчивость некоторых почв СССР // Почвоведение. 1972. N 10. P. 56–66.
23. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral Sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction // ARPN Journal of Earth Sciences. 2015. V. 4. P. 1–6.
24. Фаттахова Л.А., Шинкарев А.А., Косарева Л.П. Магнитные профили почв Волжско-Камской лесостепи // Ученые записки Казанского Университета. 2016. V. 158. P. 391–403.

REFERENCES

1. Eremin V.N., Sheshnev A.S., Reshetnikov M.V., Teslinova O.V. Content of mobile forms of heavy metals in soils of the Botanical Garden of Saratov University. *News of Saratov University*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 41–45. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-1-41-45>
2. Sheshnev A.S., Eremin V.N., Reshetnikov M.V., Teslinova O.V. Content of mobile forms of heavy metals in soils on the territory of the recreational zone "Victory Park" (Saratov). *News of Saratov University*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 256–261. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2020-20-4-256-261>
3. Sheshnev A.S., Eremin V.N., Prokof'eva E.V., Reshetnikov M.V. Content of mobile forms of heavy metals in the soil cover of the city park of the city of Volsk. *News of Saratov University*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 62–69. (In Russian) <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2018-18-1-62-69>
4. Madzhid D.S., Reshetnikov M.V., Eremin V.N., Sheshnev A.S. Concentration of mobile forms of heavy metals and magnetic properties of soils in Volsk, Saratov region. *South of Russia: ecology, development*, 2020, vol. 15, no. 1(54), pp. 137–144. (In Russian) <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2020-1-137-144>
5. Evans M., Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego, Academic Press Publ., 2003, 311 p.
6. Liu Q., Robersts A.P., Larrasoña J.C., Banerjee S.K., Guyodo Y., Tauxe L., Old-field F. Environmental magnetism: Principles and applications. *Reviews of Geophysics*. 2012, vol. 50, no. 4, Art. RG4002, pp. 1–50.
7. Magiera T., Strzyszcz Z., Rachwal M. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic

- susceptibility in Central Europe. *Geoderma*. 2006, vol. 130, no. 3–4, pp. 299–311.
8. Magiera T., Strzyszczyk Z., Rachwał M. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia Industrial Region, Poland. *Forest ecology and management*. 2007, vol. 248, no. 1–2, pp. 36–42.
 9. Lu S.G., Bai S.Q., Fu L.X. Magnetic properties as indicators of Cu and Zn contamination in soils. *Pedosphere*. 2008, no. 18, pp. 479–485.
 10. Sapkota B., Cioppa M. Using magnetic and chemical measurements to detect atmospherically-derived metal pollution in artificial soils and metal uptake in plants. *Environmental pollution*. 2012, vol. 170, pp. 131–144.
 11. El Baghdadi M., Barakat A., Sajieddine M., Nadem S. Heavy metal pollution and soil magnetic susceptibility in urban soil of Beni Mellal City (Morocco). *Environmental Earth Sciences*. 2012, no. 66, pp. 141–155.
 12. 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. *Environmental Earth Sciences*. 2012, no. 67, pp. 813–831.
 13. Boguta P., Sokołowska Z. Interactions of Zn (II) ions with humic acids isolated from various type of soils. Effect of pH, Zn concentrations and humic acids chemical properties. [PLoS One]. 2016, vol. 11, no. 4, article number. e0153626.
 14. Yurtseven-Sandker A., Cioppa M. T. Tracking the historical traces of soil pollution from an iron-sintering plant by using magnetic susceptibility in Wawa, Ontario, Canada. *Water, Air, Soil Pollution*. 2016, vol. 227, no. 12, pp. 1–20.
 15. Menshov O., Kruhlov B., Andreeva O. Magnetic and atmogeochemical studies at the hydrocarbon area Nedilna, Ukraine. *Materials of International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring*, 2021, vol. 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2034>
 16. Maity R., Venkateshwarlu M., Mondal S., Kapawar M., Gain D., Chatterjee S., Paul P. Mineral magnetic and geochemical characterization of the dust and soils around Mejia Thermal Power Plant, West Bengal: Implications to source apportionment. *Journal of Earth System Science*, 2022, vol. 131, no. 138. <https://doi.org/10.1007/s12040-022-01882-5>
 17. 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. *Environmental Earth Sciences*. 2012, no. 66, pp. 409–420.
 18. Hanesch M., Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environmental Geology*. 2002, no. 42, pp. 857–870.
 19. Zawadzki J., Fabijanczyk P., Reduction of soil contamination uncertainty assessment using magnetic susceptibility measurements and coest method. *Proceedings ECOpole*. 2008, no. 2(1), pp. 171–174.
 20. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. *Paleomagnitnyi analiz* [Paleomagnetic analysis]. Kazan, Kazan University Publ., 1986, 167 p. (In Russian)
 21. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geologica Carpathica*. 1998, vol. 49, pp. 224–226.
 22. Vadyunina A.F., Babanin V.F. Magnetic susceptibility of some soils in the USSR. *Pochvovedenie* [Soil Science]. 1972, no. 10, pp. 56–66. (In Russian)
 23. Kosareva L.R., Nourgaliev D.K., Kuzina D.M., Spassov S., Fattakhov A.V. Ferromagnetic, dia-/paramagnetic and superparamagnetic components of Aral Sea sediments: significance for paleoenvironmental reconstruction. [ARPN Journal of Earth Sciences]. 2015, vol. 4, pp. 1–6.
 24. Fattakhova L.A., Shinkarev A.A., Kosareva L.R. Magnetic profiles of soils of the Volga-Kama forest-steppe. *Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta* [Scientific notes of Kazan University]. 2016, vol. 158, pp. 391–403.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Лейсан А. Фаттахова отобрала пробы почв, провела петромагнитные измерения и их анализ, написала разделы «Введение» и «Материалы и методы исследования». Михаил В. Решетников определил концентрацию тяжелых металлов, написал разделы «Результаты и их обсуждение» и «Выводы». Диляра М. Кузина отобрала пробы почв, провела детальный термомангнитный анализ. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Leysan A. Fattakhova undertook soil sampling, conducted petromagnetic measurements and their analysis and wrote the sections "Introduction" and "Materials and Methods of Research". Mikhail V. Reshetnikov determined the concentration of heavy metals and wrote the sections "Results and discussion" and "Conclusions". Dilyara M. Kuzina undertook soil sampling and detailed thermomagnetic analysis. All authors equally participated in the writing of the article and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Лейсан А. Фаттахова / Leysan A. Fattakhova <http://orcid.org/0000-0002-2192-8591>
 Михаил В. Решетников / Mikhail V. Reshetnikov <https://orcid.org/0000-0001-8298-029X>
 Диляра М. Кузина / Dilyara M. Kuzina <http://orcid.org/0000-0003-1626-4636>