

УДК 631.48

МАГНИТНЫЕ ПРОФИЛИ ПОЧВ ВОЛЖСКО-КАМСКОЙ ЛЕСОСТЕПИ

Л.А. Фаттахова, А.А. Шинкарев, Л.Р. Косарева

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

Изучены магнитные свойства целинных лесостепных почв, сформировавшихся на исходно вертикально однородных рыхлых почвообразующих породах. В работе использованы профильные образцы целинной темно-серой лесной легкоглинистой почвы на алеврите казанского яруса пермской системы и целинного выщелоченного средне-мощного тучного легкоглинистого чернозема на четвертичном делювиальном суглинке. Обе почвы характеризуются аккумулятивным типом профильных картин распределения магнитной восприимчивости, ее составляющих и F -фактора, отражающих изменения ферримагнитной фракции. В гумусовой части профиля магнетики присутствуют преимущественно во фракции < 2.5 мкм. Оценка вклада диа-/парамагнитной, суперпарамагнитной и ферромагнитной компонент по коэрцитивным спектрам показывает, что прирост магнитной восприимчивости в органогенных горизонтах лесостепных почв обусловлен вкладом ферромагнитной компоненты. Обнаружены сильные прямые связи между магнитной восприимчивостью и содержанием оксалаторастворимых соединений железа и между магнитной восприимчивостью и значениями коэффициента Швертмана. Методом термомагнитного анализа фракции < 2.5 мкм показано, что прирост магнитной восприимчивости в профилях лесостепных почв обусловлен формированием маггемит-магнетитовых ассоциаций. Главным образом ферримагнитная фракция представлена мелкими однодоменными зернами.

Ключевые слова: целинная темно-серая лесная почва, целинный выщелоченный чернозем, магнитная восприимчивость, ферромагнитная компонента, несиликатные соединения Fe, профильная дифференциация, термомагнитный анализ

Введение

Фактический материал по магнитным свойствам почв показывает, что магнитные характеристики ряда зональных почв могут закономерно изменяться с глубиной, при этом обнаруживается тесная связь с типом и выраженностью почвообразовательного процесса [1]. Магнитные свойства определяются в первую очередь содержанием в почвах соединений Fe, их фазовым составом и дисперсностью [2]. Ферримагнитные минералы в профилях большей части современных автоморфных почв северного полушария, которые сформированы на глубоко переработанных рыхлых отложениях четвертичного возраста, могут быть обломочными и аутигенными. Основное количество аутигенных магнитных минералов почвенного происхождения образуется в органогенных горизонтах, где

процессы выветривания при прямом и косвенном влиянии на них микроорганизмов и растений протекают особенно интенсивно [1].

По современным представлениям причины накопления ферримагнитных минералов в гумусовых горизонтах почв могут быть самыми разнообразными и не ограничиваются рамками педогенного происхождения ферримагнетиков *in situ* [3,4]. При этом, несмотря на широкое использование данных магнитных измерений при изучении почв, почвенно-лессовых комплексов, а также речных, озерных и морских отложений и других природных объектов, потенциально содержащих материал почвенных профилей в той или иной стадии их развития, механизмы формирования магнитных минералов в почвах продолжают оставаться предметом дискуссий. Можно лишь уверенно констатировать, что магнитный профиль почвы формируется как результат сложных процессов энерго- и массообмена, приводящих к закономерной вертикальной дифференциации исходной почвообразующей породы по составу и свойствам, а специфические особенности магнитных профилей конкретных почв будут определяться как биоклиматическими и геоморфологическими условиями, так и предысторией почвообразующих пород. Поэтому для более объективной интерпретации причинно-следственных связей очевидную полезность имеет расширение круга изучаемых почвенных объектов.

В статье приводятся результаты изучения магнитных свойств целинных зональных почв Волжско-Камской лесостепи, сформировавшихся на исходно вертикально однородных рыхлых почвообразующих породах.

1. Объекты и методы

В экспериментах использованы профильные образцы целинной темно-серой лесной легкоглинистой почвы (Алексеевский административный район Республики Татарстан (РТ)) и целинного выщелоченного среднемошного тучного легкоглинистого чернозема (Камско-Устьинский административный район РТ).

Характеристика магнитного профиля предполагает сравнение системы генетических горизонтов с горизонтом С, которое может быть корректным только при наличии четких свидетельств того, что почвенный индивидуум сформировался в едином и однородном отложении. Исходная вертикальная однородность почвообразующих пород исследованных почв показана по отношениям концентраций Ti, Zr и Y [5].

В основании профилей лесостепных почв лежат обычные для РТ рыхлые породы. Материнским для темно-серой лесной почвы был алевроит казанского яруса пермской системы. Спектры дифракции от порошковых препаратов, представленные на рис. 1, показывают, что кроме глинистых минералов в породе присутствуют кварц, кальцит, калиевые полевые шпаты (преимущественно микроклин) и плагиоклазы, с преобладанием альбита. Как примесь диагностируется доломит. Материнской породой выщелоченного чернозема был четвертичный делювиальный суглинок. В породе присутствуют глинистые минералы, кварц, кальцит, доломит, калиевые и натриевые полевые шпаты. Как малая примесь присутствуют амфиболы.

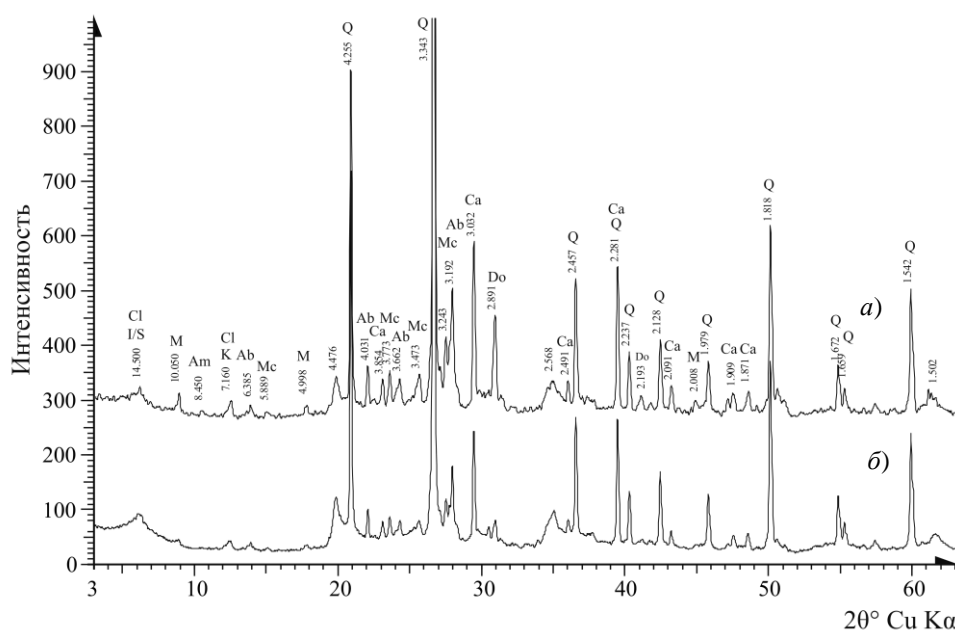


Рис. 1. Рентген-дифрактограммы порошковых препаратов почвообразующих пород выщелоченного чернозема (а) и темно-серой лесной почвы (б). Обозначения минералов: I/S – иллит-сметтит, M – иллит, Am – амфиболы, Cl – хлорит, K – каолинит, Ab – альбит, Mc – микроклин (ортоклаз), Ca – кальцит, Q – кварц, Do – доломит

Предварительную пробоподготовку почвенных образцов проводили согласно рекомендациям Международной организации по стандартизации [6]. Первоначально измерения магнитных параметров проводились на высушенных и измельченных в агатовой ступке образцах. Дальнейшая пробоподготовка включала удаление карбонатов и органического вещества (ОВ) и отделение глинистой фракции. Образцы обрабатывали 1 моль/л CH_3COOH в течение суток, отмывали дистиллированной водой, затем в течение 15–20 дней подвергали многократной обработке H_2O_2 (30%) при комнатной температуре. Последующие операции включали отделение осадка центрифугированием, его высушивание и гомогенизацию. Удаление карбонатов и ОВ также проводили перед отделением фракции частиц со стоксовым эквивалентным диаметром < 2.5 мкм. Глинистую фракцию отделяли методом отмучивания после расчетной седиментации в столбе жидкости.

Для измерения магнитной восприимчивости (χ) использовался измеритель MS2-B фирмы Bartington Instruments Ltd (Англия). Замеры каждого образца производили в двух режимах: в режиме высоких и в режиме низких частот (0.460 кГц для χ_{HF} и 1.65 кГц для χ_{LF} соответственно). Предварительно была проведена нормировка по массе проб. Для получения коэрцитивных спектров нормального намагничивания до полей 0.5 Тл использовался коэрцитивный спектрометр J_meter [7, 8], позволяющий отдельно регистрировать остаточную и индуктивную намагниченности образцов при комнатной температуре. Намагничивание образцов проводилось из естественного состояния. По кривым нормального 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}).

Термомагнитный анализ (ТМА) образцов проводили на экспрессных весах Кюри [9]. Измеряли зависимость индуктивной намагниченности от температуры при скорости нагрева $100\text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ до $800\text{ }^\circ\text{C}$ в магнитном поле 0.4 Тл .

Спектры дифракции от валовых порошковых препаратов регистрировались на дифрактометре D8 ADVANCE фирмы Bruker Axs (Германия) с геометрией $\theta - 2\theta^\circ$ в режиме непрерывного сканирования с шагом 0.02° и экспозицией в каждой точке 3 секунды.

Выделение оксалаторастворимых соединений Fe (Fe_o) проводили в темноте [10]. Железо определяли фотометрически с сульфосалициловой кислотой [11, 12]. Свободные оксиды железа (Fe_f) выделяли дитионит-цитратат-бикарбонатом [12]. Железо определяли фотометрически с тиоцианатом калия [10]. Содержание гумуса определяли по Тюрину [14].

Обработку данных проводили с использованием пакета MS Excel. По критерию Шапиро – Уилка для уровня значимости $\alpha = 0.05$ экспериментально измеренные значения магнитной восприимчивости, ее ферромагнитной составляющей и показателей группового состава соединений железа в профилях лесостепных почв характеризовались нормальным распределением. Поэтому для оценки связи между показателями использовали параметрические показатели.

2. Результаты и их обсуждение

Графический анализ показывает, что целинные лесостепные почвы характеризуются аккумулятивным типом профильных картин распределения магнитной восприимчивости и содержания гумуса (рис. 2). Селективное удаление ОВ не оказывает влияния на картину профильной дифференциации магнитной восприимчивости. Несколько повышенные абсолютные значения χ_{lf} в верхней части и основании профиля можно приписать удалению ОВ и карбонатов, поскольку измерение магнитной восприимчивости проводилось в пробах, нормированных по массе.

В гумусовой части профиля магнетики присутствуют преимущественно в тонкодисперсных минеральных частицах и их содержание во фракции $< 2.5\text{ мкм}$ закономерно снижается к почвообразующей породе. Аккумулятивное распределение магнитной восприимчивости в целинных почвах, сформировавшихся на литологически однородной породе, уже предполагает педогенную природу магнетиков. Частицы педогенных магнетиков, как правило, высокодисперсны и разница измерений χ при разных частотах, которая отражает наличие в магнитной фракции тонкодисперсных зерен, интерпретируется как индикатор биокосных взаимодействий [15].

Расчет частотно-зависимой магнитной восприимчивости ($F = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\%$) показывает, что значения F -фактора варьируются в пределах от $\sim 2\%$ до $\sim 12\%$ для валовых образцов и от $\sim 3\%$ до $\sim 16\%$ для препаратов фракции $< 2.5\text{ мкм}$ в почвообразующей породе и верхней части профиля лесостепных почв соответственно. При этом, как и в случае магнитной восприимчивости, целинные

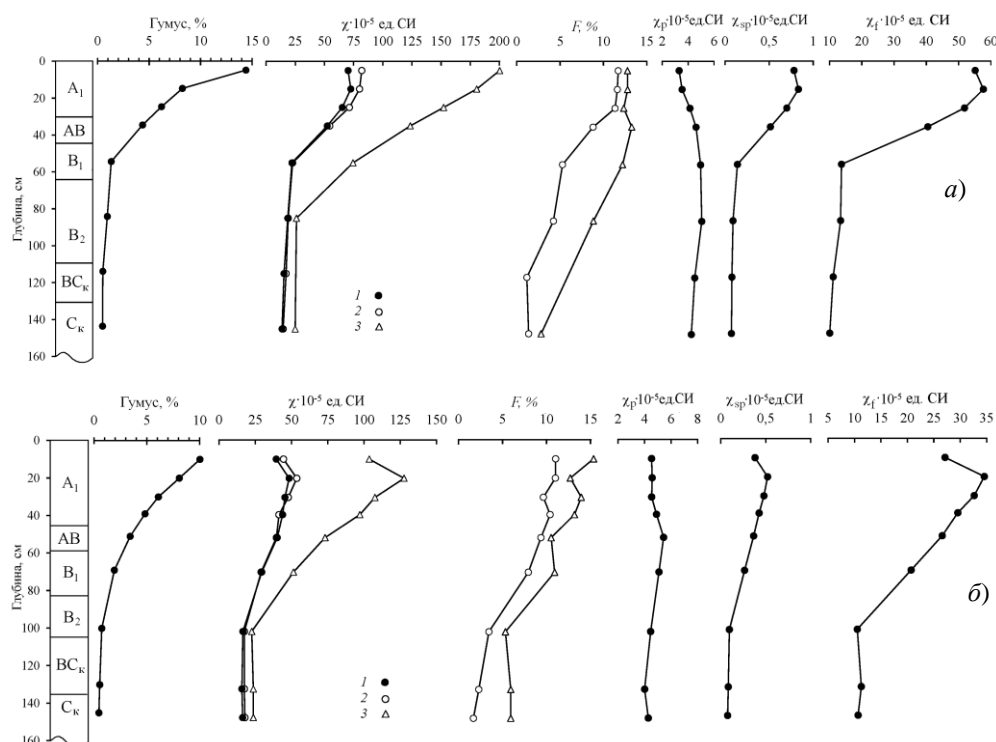


Рис. 2. Профильные распределения магнитных параметров в темно-серой лесной почве (а) и выщелоченном черноземе (б): 1 – исходные образцы; 2 – образцы после удаления органического вещества; 3 – препараты фракции с размером частиц < 2.5 мкм, выделенные после удаления карбонатов и органического вещества

лесостепные почвы характеризуются аккумулятивным типом профильных картин распределения F -фактора, отражающего главным образом однодоменное состояние ферромагнетиков. Совсем не обязательно, чтобы характеристики магнитных свойств и содержание гумуса функционально зависели друг от друга. Однако следует учитывать, что однотипное поведение профильных кривых значений этих параметров отчасти может быть опосредовано и вкладом ОВ биогенных органо-аккумулятивных поверхностных горизонтов в создание оптимальных условий для гетеротрофных микроорганизмов, синтезирующих магнетики [2].

Коэрцитивные спектры позволяют определить вклад диа-/парамагнитной (χ_p), ферромагнитной (χ_f) и суперпарамагнитной (χ_{sp}) компонент в магнитную восприимчивость [16]. Вид кривых профильного распределения χ_p , χ_f и χ_{sp} (рис. 2) и сильные прямые связи (на уровне значимости $\alpha = 0.001$) между общей магнитной восприимчивостью и ее ферромагнитной составляющей (рис. 3) однозначно показывают, что прирост магнитной восприимчивости в органогенных горизонтах лесостепных почв обусловлен вкладом ферромагнитной компоненты.

Магнитную восприимчивость в почвенных профилях часто сопоставляют с содержанием различных форм соединений железа. Обнаруживаются сильные прямые связи (на уровне значимости $\alpha = 0.001$) между магнитной восприимчивостью и содержанием Fe_0 (рис. 4), и между магнитной восприимчивостью и значениями коэффициента Швертмана (Fe_0/Fe_D при параллельной схеме экстракции)

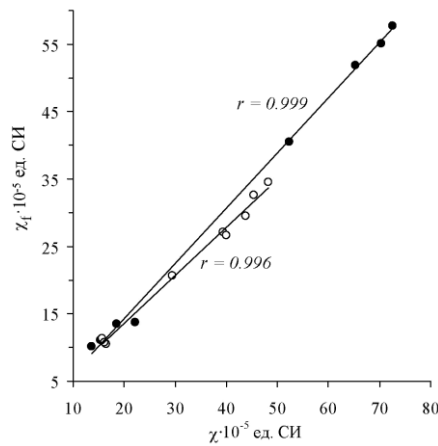


Рис. 3. Зависимость между общей магнитной восприимчивостью и ее ферромагнитной составляющей в профильных образцах темно-серой лесной почвы (●) и выщелоченного чернозема (○)

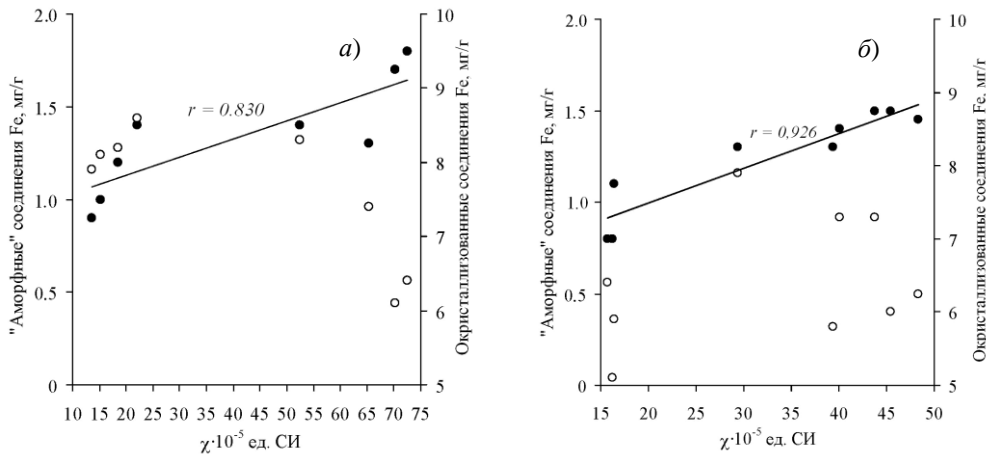


Рис. 4. Зависимость между магнитной восприимчивостью профильных образцов темно-серой лесной почвы (а) и выщелоченного чернозема (б) и содержанием в них несиликатных окристаллизованных (○) и «аморфных» (●) соединений Fe

(рис. 5). Связь между магнитной восприимчивостью и содержанием несиликатных окристаллизованных соединений железа (Fe_D-Fe_O) отсутствует (рис. 4).

Это, тем не менее, не исключает возможности образования в поверхностных горизонтах сильномагнитных оксидов железа. Конечно, результаты корреляционного анализа можно формально расценивать как свидетельство определяющего вклада «аморфных» и слабоокристаллизованных форм в магнитные свойства гумусовой части профиля. Однако специалистам хорошо известно, что магнетит очень слабо растворяется дитионит-цитратом и в то же время хорошо растворим реактивом Тамма, особенно в виде дисперсных частиц [2].

Изучение магнито-минералогических особенностей валовых образцов и препаратов фракции < 2.5 мкм было проведено методом дифференциального термомангнитного анализа (ДТМА). На рис. 6 показаны интегральные (в верхней части

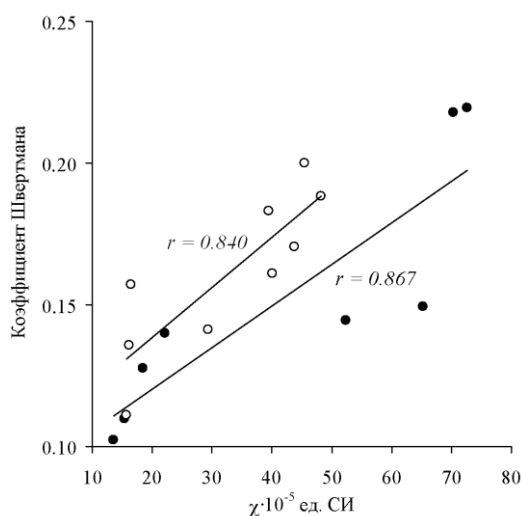


Рис. 5. Зависимость между магнитной восприимчивостью и долей «аморфных» и слабокристаллизованных форм среди всех несиликатных соединений Fe в профильных образцах темно-серой лесной почвы (●) и выщелоченного чернозема (○)

рисунка) и дифференциальные (в нижней части рисунка) кривые ТМА исходных валовых образцов целинных лесостепных почв. Термомагнитный анализ позволил выявить, что основным носителем намагниченности почв является магнетит. Для всех образцов характерно наличие свободной, связанной, кристаллизационной воды и полное окисление магнитных минералов в ходе термомагнитных исследований. Помимо этого каждый образец содержит незначительное количество гематита. Выгорание органического материала отражается на кривых в диапазоне температур 480–580 °С ростом намагниченности за счет формирования магнетита. Пик на дифференциальной кривой около 300 °С связан с наличием в образцах сульфидов железа. Об этом также свидетельствует наличие перегиба на дифференциальных кривых повторного нагрева в этой же температурной области.

Кривые ДТМА фракции < 2.5 мкм, выделенной после удаления карбонатов и ОВ, более информативны (рис 7). На дифференциальных кривых фракции < 2.5 мкм, выделенной из органогенных горизонтов, кроме пика, связанного с наличием в зернах свободной и связанной воды, присутствует пик в области 180 °С, характерный для маггемит-магнетитовых ассоциаций и обусловленный снятием напряжений [9], связанных с маггемитизацией зерен магнетита. Интенсивность пика снижается от гумусовой части профиля к материнским породам, что согласуется с наличием прямой корреляционной зависимости между общей магнитной восприимчивостью и ее ферромагнитной составляющей (рис. 3). В образцах также присутствуют сульфиды железа.

О размерности магнитных частиц можно судить, исходя из анализа диаграмм Дзэ (рис. 8). В исходных валовых образцах из органогенных горизонтов целинных лесостепных почв магнитная фракция представлена главным образом очень мелкими однодоменными частицами с примесью многодоменных и суперпарамагнитных зерен.

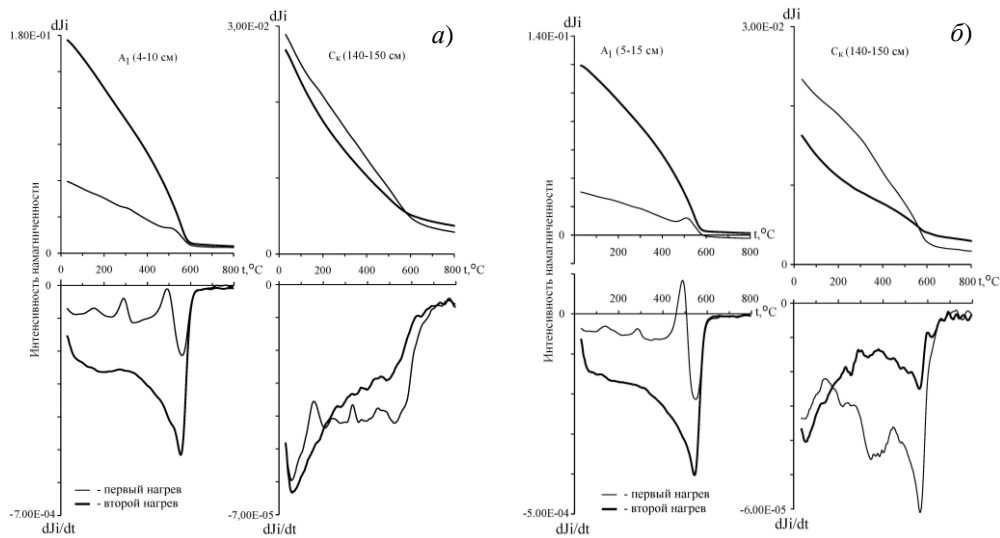


Рис. 6. Кривые ТМА образцов из верхней части и основания профиля целинной темно-серой лесной почвы (а) и целинного выщелоченного чернозема (б)

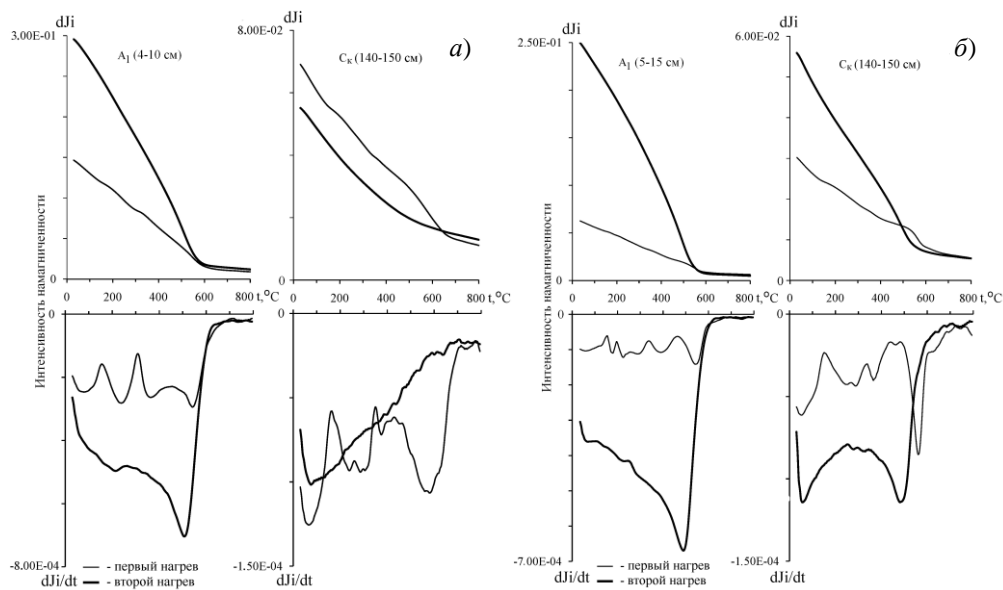


Рис. 7. Кривые ТМА фракции с размером частиц $< 2.5 \mu\text{м}$ образцов из верхней части и основания профиля целинной темно-серой лесной почвы (а) и целинного выщелоченного чернозема (б)

Заключение

Комплексом современных методов магнитного анализа, включавшим магнитометрию, коэрцитивную спектрометрию и ДТМА, проведено исследование магнитных профилей целинных зональных почв Волжско-Камской лесостепи. Исследованные почвы образованы на типичных для региона литологически однородных рыхлых почвообразующих породах, и на фоне постепенного падения

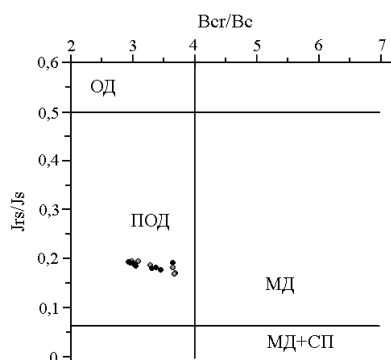


Рис. 8. Характеристики размеров магнитных зерен в валовых образцах из верхней части профиля темно-серой лесной почвы (●) и выщелоченного чернозема (○) по гистерезисным параметрам лесостепных почв на теоретической диаграмме Дзю: ОД – однодоменная; МД – многодоменная; ПОД – псевдооднодоменная; СП – суперпарамагнитная области диаграммы

содержания ОВ с глубиной закономерно уменьшается и магнитная восприимчивость. При наличии наиболее благоприятных предпосылок для формирования органо-минерального комплекса развитие почв во времени и под луговой и под лесной растительностью привело к хорошо выраженному аккумулятивному типу магнитного профиля за счет накопления ферромагнитных минералов магнетитовой и маггемитовой природы, сосредоточенных преимущественно в глинистой фракции. Аккумулятивное распределение магнитной восприимчивости предполагает, что образование тонкодисперсных однодоменных частиц магнетиков с примесью многодоменных и суперпарамагнитных зерен происходит как результат внутripочвенного структурно-вещественного преобразования железосодержащих минералов почвообразующей породы при прямом или косвенном участии биоты.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. – М.; Ярославль: ЯГТУ, 1995. – 222 с.
2. Водяницкий Ю.Н. Химия и минералогия почвенного железа. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. – 236 с.
3. 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-Science Rev.* – 2009. – V. 95. – P. 158–188. – doi: 10.1016/j.earscirev.2009.05.001.
4. Torrent J., Liu Q.S., Barrón V. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain // *Eur. J. Soil Sci.* – 2010. – V. 61. – P. 161–173. – doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01216.x.

5. Шинкарев А.А., Корнилова А.Г., Лыгина Т.З., Гиниятуллин К.Г., Гильмутдинов Р.Р. Использование элементного анализа для оценки исходной вертикальной однородности почвообразующей породы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2010. – Т. 152, кн. 4. – С. 78–91.
6. ISO 11464. 1994. Soil Quality – Pretreatment of samples for physico-chemical analysis. – 11 p.
7. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // *Geologica Carpathica*. – 1998. – V. 49. – P. 224–226.
8. Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Коэрцитивный спектрометр. Патент РФ на полезную модель. № 81805. – 2009. – Бюл. ФИПС № 9.
9. Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. – 167 с.
10. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No 42, Version 4.0. – Lincoln, NE: USDA-NRCS, 2004. – 700 p.
11. Глебова Г.И. Показатели и методы оценки группового (фракционного) состава соединений химических элементов в почвах // Теория и практика химического анализа почв. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 248–309.
12. Федорова Н.Н., Касаткина Г.А., Растворова О.Т. Показатели и методы определения элементного состава минеральной части почв (валовой анализ) // Теория и практика химического анализа почв. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 141–193.
13. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of soil analysis. Mineralogical, organic and inorganic methods. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 993 p.
14. Растворова О.Т., Андреев Д.П. Валовой анализ органической части почв // Теория и практика химического анализа почв. – М.: ГЕОС, 2006. – С. 115–140.
15. Evans M.E., Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmental Magnetism. – San Diego: Acad. Press, 2003. – 311 p.
16. 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, No 1. – P. 1–6.

Поступила в редакцию
25.05.16

Фаттахова Лейсан Айдаровна, аспирант кафедры почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: L.a.fattakhova@yandex.com

Шинкарев Александр Александрович, доктор биологических наук, профессор кафедры почвоведения

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Ashinkar@mail.ru

Косарева Лина Раисовна, инженер-проектировщик кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: Lina.kosareva@mail.ru

Magnetic Soils Profiles in the Volga-Kama Forest-Steppe Region*L.A. Fattakhova*^{*}, *A.A. Shinkarev*^{**}, *L.R. Kosareva*^{***}*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*E-mail: **L.a.fattakhova@yandex.com, **Ashinkar@mail.ru, ***Lina.kosareva@mail.ru*

Received May 25, 2016

Abstract

The magnetic properties of virgin forest-steppe soils developed on the originally vertically uniform unconsolidated parent material have been investigated. The profile samples of virgin dark-grey forest light-clayey soil derived from a siltstone of the Kazan layer of the Upper Permian and virgin leached medium-thick fertile light-clayey chernozem derived from a Quaternary heavy deluvial loam have been considered. Both soils are characterized by the accumulative type of magnetic susceptibility and *F*-factor values distribution patterns with depth. In the humus part of the soil profile, magnetics are present predominantly in the < 2.5 μm fraction. The coercivity spectra allowed to determine the contribution of dia-/paramagnetic and ferromagnetic components to magnetic susceptibility. It has been found that magnetic susceptibility enhancement in the organogenic horizons of virgin forest-steppe soils occurs due to the contribution of ferromagnetic components. The results indicate a strong positive linear correlation between the magnetic susceptibility and oxalate-extractable Fe, as well as between the magnetic susceptibility and Schwertmann's criterion values. Using the method of thermomagnetic analysis of the < 2.5 μm fraction, it has been found that the magnetic susceptibility enhancement in the profiles of forest-steppe soils took place due to the formation of maghemite-magnetite associations. The predominantly ferromagnetic fraction consists of small single-domain grains.

Keywords: virgin dark-grey forest soil, virgin leached chernozem, magnetic susceptibility, ferromagnetic component, non-silicate compounds of Fe, profile differentiation, thermomagnetic analysis

Acknowledgments. This study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities.

Figure Captions

- Fig. 1. The X-ray diffractograms of powder preparations of the parent rock materials of leached chernozem (*a*) and dark-grey forest soil (*b*). Minerals: I/S – illite-smectite, M – illite, Am – amphiboles, Cl – chlorite, K – kaolinite, Ab – albite, Mc – microcline (orthoclase), Ca – calcite, Q – quartz, Do – dolomite.
- Fig. 2. Profile distributions of the magnetic parameters in dark-grey forest soil (*a*) and leached chernozem (*b*): 1 – original samples; 2 – samples after the removal of organic matter; 3 – preparations of the < 2.5 μm fraction isolated after the removal of carbonates and organic matter.
- Fig. 3. Dependence between the general magnetic susceptibility and its ferromagnetic component in the profile samples of dark-grey forest soil (●) and leached chernozem (○).
- Fig. 4. Dependence between the magnetic susceptibility of the profile samples of dark-grey forest soil (*a*) and leached chernozem (*b*) and the content of non-silicate crystalized (○) and “amorphous” (●) compounds of Fe.
- Fig. 5. Dependence between the magnetic susceptibility and the proportion of “amorphous” and weakly crystalized forms among all non-silicate compounds of Fe in the profile samples of dark-grey forest soil (●) and leached chernozem (○).

Fig. 6. TMA curves of the samples from the upper part and the bottom of the profile of virgin dark-grey forest soil (a) and virgin leached chernozem (b).

Fig. 7. TMA curves of the < 2.5 μm fraction of the samples from the upper part and bottom of the profile of virgin dark-grey forest soil (a) and virgin leached chernozem (b).

Fig. 8. Characteristics of magnetic grain sizes in the bulk samples from the upper part of the profile of dark-grey forest soil (●) and leached chernozem (○) based on the hysteresis parameters of forest-steppe soils on Day's theoretical diagram: SD – single-domain; MD – multi-domain; PSD – pseudo-single-domain; SP – super-paramagnetic domains of the diagram.

References

1. Babanin V.F., Trukhin V.I., Karpachevskii L.O., Ivanov A.V., Morozov V.V. Soil Magnetism. Moscow, Yaroslavl, YaGTU, 1995. 222 p. (In Russian)
2. Vodyanitskii Yu. N. Chemistry and Mineralogy of the Soil Iron. Moscow, Pochv. Inst. im. V.V. Dokuchaeva, 2003. 236 p. (In Russian)
3. 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, pp. 158–188. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.05.001.
4. Torrent J., Liu Q.S., Barrón V. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. *Eur. J. Soil Sci.*, 2010, vol. 61, pp. 161–173. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01216.x.
5. Shinkarev A.A., Kornilova A.G., Lygina T.Z., Giniyatullin K.G., Gilmutdinov R.R. Assessing parent material uniformity by elemental analysis. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2010, vol. 152, no. 4, pp. 78–91. (in Russian)
6. ISO 11464. Soil quality – pretreatment of samples for physico-chemical analysis. 1994. 11 p.
7. Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer. *Geol. Carpathica*, 1998, vol. 49, pp. 224–226.
8. Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. Coercivity spectrometer. Patent RF no. 81805, *Byull. FIPS*, 2009, no. 9. (In Russian)
9. Burov B.V., Nurgaliev D.K., Jasonov P.G. Paleomagnetic Analysis. Kazan, Kazan. Gos. Univ., 1986. 166 p. (In Russian)
10. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No 42, Version 4.0. Lincoln, NE, USDA-NRCS, 2004. 700 p.
11. Glebova G.I. Theory and Practice of Chemical Analysis of Soils. *Pokazateli i metody otsenki gruppovogo (fraktsionnogo) sostava soedinenii khimicheskikh elementov v pochvakh* [Indexes and Methods for Estimating Group (Fractional) Composition of Chemical Elements in Soils]. Moscow, GEOS, 2006, pp. 248–309. (in Russian)
12. Fedorova N.N., Kasatkina G.A., Rastvorova O.T. Theory and Practice of Chemical Analysis of Soils. *Pokazateli i metody opredeleniya elementnogo sostava mineral'noi chasti pochv (valovoi analiz)* [Indexes and Methods for Estimating Element Composition in the Mineral Part of Soils (Total Element Determination)]. Moscow, GEOS, 2006, pp. 141–193. (in Russian)
13. Pansu M., Gautheyrou J. Handbook of Soil Analysis. Mineralogical, Organic and Inorganic Methods. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. 993 p.
14. Rastvorova O.T., Andreev D.P. Theory and Practice of Chemical Analysis of Soils. *Valovoi analiz organicheskoi chasti pochv* [The Bulk Analysis of an Organic Part of Soils]. Moscow, GEOS, 2006, pp. 115–140. (in Russian)
15. Evans M.E., Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. San Diego, Acad. Press, 2003. 311 p.

16. 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. *ARPJ. Earth Sci.*, 2015. vol. 4, no. 1, pp. 1–6.
-

⟨ **Для цитирования:** Фаттахова Л.А., Шинкарев А.А., Косарева Л.Р. Магнитные профили почв Волжско-Камской лесостепи // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 3. – С. 391–403. ⟩

⟨ **For citation:** Fattakhova L.A., Shinkarev A.A., Kosareva L.R. Magnetic soils profiles in the Volga-Kama forest-steppe region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 3, pp. 391–403. (In Russian) ⟩