

УДК 631.437.8
PACS 75.90.+w

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ

© 2020 г. Л.А. Фаттахова^{1*}, В.П. Щербаков², Д.М. Кузина¹, А.Н. Даутов¹, Н.К. Сычёва²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, г. Казань, Республика Татарстан, Россия

² Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия

*e-mail: l.a.fattakhova@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования магнитных свойств дерново-среднеподзолистых супесчаных и дерново-подзолистых суглинистых почв на территории национального парка «Марий Чо-дра» в юго-восточной части Республики Марий Эл. Образцы отобраны вдоль береговой линии карстового озера Яльчик и вверх по склону от озера. По результатам измерений магнитной восприимчивости показано, что изученные почвы характеризуются как аккумулятивным, так и элювиально-иллювиальным типом распределения минеральных компонентов по профилю в зависимости от условий почвообразования и рекреационной активности данной территории. Показано, что увеличение магнитной восприимчивости в органогенных горизонтах изученных почв обусловлено вкладом ферримагнитной компоненты. Методами дифференциального термомагнитного анализа и разложения коэрцитивных спектров на компоненты выявлено, что основными носителями намагниченности представленных почв являются тонкозернистые магнетит и гематит, имеющие педогенное происхождение.

Ключевые слова: коэрцитивная спектрометрия, магнитная восприимчивость, методы магнитного анализа, дерново-подзолистая почва, почвообразование, морфология почв.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2020.3-4>

Цитирование: Фаттахова Л.А., Щербаков В.П., Кузина Д.М., Даутов А.Н., Сычёва Н.К. Изменение магнитных свойств дерново-подзолистых почв в зависимости от условий почвообразования // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 3. С. 51–63. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.3-4>

ВВЕДЕНИЕ

Любая почва обладает магнитными свойствами. Наиболее просто измеряемой и, соответственно, наиболее доступной характеристикой магнитных свойств почвы является магнитная восприимчивость (МВ) – величина, которая определяется в первую очередь концентрацией в почвах соединений железа, их фазовым составом и дисперсностью [Hanesch *et al.*, 2007]. Поскольку МВ может являться критерием структурных свойств почв [Вадюнина, Бабанин, 1972], то представляет значительный интерес выяснить, как распределяются значения МВ в зависимости от изменения условий почвообразования.

На сегодняшний день есть несколько вариантов генезиса магнитных свойств почв: педогенный, литогенный, космогенный и техногенный. Характер распределения значений магнитной восприимчивости по почвенному профилю специфичен для каждого типа почв и зависит от магнитной восприимчивости почвообразующих пород, процессов выветривания, свойств самих почв – содержания органического вещества, минерального и гранулометрического состава, водного режима, окислительно-восстановительного режима, состава новообразованных железистых минералов, биогенной активности и т.д. [Бабанин *и др.*, 1995; Иванов, 2003].

Вместе с тем, как показывают исследования последних лет, изучение только МВ не дает возможность сделать достаточно обоснованные выводы о генезисе магнитных минералов в почвах – для этого необходимо изучить и их гистерезисные свойства. Так, в работе [Фаттахова *и др.*, 2020] на основе метода коэрцитивной спектрометрии (КС) представлен способ разделения вкладов литогенных и педогенных магнитных минералов в интенсивность остаточной намагниченности насыщения J_{rs} и соотношение этих вкладов с содержанием органики. В частности, в упомянутой работе показано, что в серых лесных и черноземных почвах именно педогенная компонента наиболее тесно связана с концентрацией гумуса по глубине профиля.

Влияние почвообразующей породы на магнитные свойства почв весьма наглядно иллюстрируются данными, полученными при реализации проекта геологических исследований на территории Европы в части «Геохимического картирования почв сельскохозяйственных и пастбищных угодий Европы» (см. сайт в Интернете: http://gemas.geolba.ac.at/image/GEMAS_Brochure.pdf, а также [Reimann *et al.*, 2014]). Анализ 2096 проб пахотных почв с сеткой отбора 50×50 км показал, что карта магнитной восприимчивости в пахотном слое по существу больше отражает фоновую карту литогенной магнитной восприимчивости.

Если рассматривать влияние рельефа на магнитные свойства почв, то здесь особенно важно, что с горизонтальным и вертикальным расчленением земной поверхности связан дренаж почвы и перемещение вниз по профилю тонкодисперсных частиц с преобладающими токами воды. Соответственно, в низинах значения МВ будут возрастать в силу увеличения содержания тонкодисперсных магнитных частиц [Thompson, Oldfield, 1986; De Jong et al., 1998], а на крутых склонах будут наблюдаться низкие значения МВ в результате высоких темпов эрозионного выноса почвенного материала [Dearing, 2000].

Степень дренажа определяет окислительно-восстановительные условия в почвенном профиле, которые, в свою очередь, влияют как на деятельность почвенной микрофлоры, так и на протекание химических реакций, приводящих к трансформации железосодержащих минералов. Считается, что ферримагнетики в почвах, которые находятся в режиме длительного затопления (оглеения), подвергаются восстановительному растворению в анаэробных условиях [Mullins, 1977; Maher, 1986; Thompson, Oldfield, 1986; Dearing et al., 1995; De Jong et al., 2000], в результате которого катионы Fe^{3+} восстанавливаются до Fe^{2+} . А так как соединения Fe^{2+} лучше растворимы, то они переходят из твердой фазы в раствор, с которым удаляются, что и приводит к существенному уменьшению магнитной восприимчивости оглеенных горизонтов почв.

С другой стороны, замечено, что в очень пористых почвах, где преобладающими являются макропоры, формирование вторичных ферримагнитных минералов сильно сдерживается. По мнению исследователей, это может происходить либо потому, что малое количество микропор не благоприятствует процессам микробной трансформации, либо потому, что железосодержащие минералы удаляются из профиля как в результате выщелачивания, так и в результате хелатирования в кислых условиях [Dearing et al., 1985, 1995, 1996; Maher, 1986].

Трансформация (преобразование) микроорганизмов возможна при наличии достаточного количества микропор. Но в случае песчаных почв, где преобладают макропоры, общая пористость имеет небольшой объем. Тем самым песчаные почвы отлично пропускают воду, вместе с которой удаляются поступающие в почвенный профиль вещества. С увеличением глинистости почвы растет содержание микропор в объеме общей пористости. Увеличивается водонепроницаемость, в порах начинают обитать микроорганизмы, простейшие и другие представители почвенной биоты. Почва становится богатой на органические и минеральные вещества.

В настоящей статье приведены результаты сравнительного исследования магнитных свойств дерново-среднеподзолистых супесчаных и дерново-подзолистых суглинистых почв, находящихся в разных условиях почвообразования, но при этом расположенных максимально близко друг от друга. Цель работы – сопоставление изменений содержания органического вещества в почвах по профилю и в зависимости от их генезиса с соответствующими магнитными характеристиками.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использованы профильные образцы дерново-среднеподзолистых супесчаных и дерново-подзолистых суглинистых почв, отобранные на территории национального парка «Марий Чодра» Республики Марий Эл в непосредственной близости от оз. Яльчик. Озеро имеет карстовое происхождение провального типа. Со всех сторон оно окружено смешанным хвойно-широколиственным лесом с преобладанием сосны. Незначительные площади заняты низинными травяными болотами. Для данной местности типичны эрозионно-денудационный и карстовый ландшафты, что обусловлено особым литологическим составом пород.

Всего было обработано 17 неполных профилей почв до глубины 60 см (рис. 1). Профили располагались как по береговой линии озера, так и вверх по склону, к лесу. Из каждого профиля послойно, через 5 см, было отобрано 12 образцов.

Предварительную подготовку почвенных образцов проводили согласно ГОСТ ISO 11464-2015 «Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа» (М.: Стандартиформ, 2015. 11 с.). Измерения магнитных параметров осуществляли на высушенных и измельченных в агатовой ступке образцах. Магнитную восприимчивость (χ) определяли мультиспектральным измерителем магнитной восприимчивости AGICO MFK1-FA.

Для получения коэрцитивных спектров нормального намагничивания до полей 0.5 Тл использовался коэрцитивный спектрометр J_meter [Буров и др., 1986; Jasonov et al., 1998], позволяющий отдельно регистрировать остаточную J_r и индуктивную J_i намагниченности образцов при комнатной температуре. Коэрцитивные спектры могут быть использованы для определения вклада диа-/парамагнитных (χ_p), ферримагнитных (χ_f) и суперпарамагнитных (χ_{sp}) компонентов магнитной восприимчивости. 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}).

Дифференциальный терромагнитный анализ (ДТМА) образцов проводили на экспрессных весах Кюри [Буров и др., 1986]. Измеряли зависимость индуктивной намагниченности от температуры при скорости нагрева 100 °С/мин до 800 °С в магнитном поле 0.4 Тл. Содержание гумуса определяли по Тюрину [Растворова, Андреев, 2006].

Обработку данных проводили с использованием пакета MS Excel и Grapher.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Дерново-среднеподзолистые супесчаные (на примере т. 1, 2) и дерново-подзолистые суглинистые (на примере т. 2.1, 2.5) почвы характеризуются аккумулятивным и элювиально-иллювиальным типом профильных



Рис. 1. Схема отбора образцов

Цифры – точки обследования: 1–9 – дерново-среднеподзолистые супесчаные почвы; 2.1–2.7, 10 – дерново-подзолистые суглинистые почвы

картин распределения компонентов магнитной восприимчивости, при этом наибольший вклад в магнитную восприимчивость вносит ферромагнитная компонента (рис. 2, 3). Также из приведенных на рис. 2, 4 данных видно, что в супесчаной почве минеральные компоненты не задерживаются в верхних частях профиля и их концентрация стремительно уменьшается вниз по профилю. Из этой тенденции явно выпадают т. 1 и 2, но к этому вопросу мы вернемся ниже.

В суглинистой же почве спад МВ также имеет место, но он далеко не столь катастрофичен, как это происходит в супесчаных почвах, а в некоторых точках (т. 2.1, 2.5) наблюдается даже аккумуляция минеральных компонентов на некоторой промежуточной глубине (10–35 см) с последующим убыванием вниз по профилю. Это говорит о более плотной структуре почвы, позволяющей задерживать как минеральные компоненты, так и органическое вещество в иллювиальном горизонте.

Содержание гумуса по профилю дерново-подзолистой суглинистой почвы снижается не более чем в 2 раза, и даже на глубине 50–60 см остается на порядок выше, чем в дерново-подзолистой супесчаной почве. Это говорит о достаточно равномерном распределении гумуса по профилю суглинистой почвы. Также следует отметить, что содержание гумуса увеличивается по мере подъема профилей вверх по склону (рис. 5). Лес становится все гуще, опад листвы с деревьев увеличивается, что приводит к лучшему задержанию дождевой воды и хорошему увлажнению почвы. В таких

условиях кислорода в почву поступает меньше, что сдерживает разложение органического вещества и способствует накоплению гумуса.

Из вида кривых магнитной восприимчивости и гумуса по глубине профиля, приведенных на рис. 4, 5, видно, что распределение этих параметров существенно неоднородно. В особенности следует отметить т. 1, 2 (супесчаные почвы) и т. 10 (суглинистые почвы), где поведение этих кривых явно выпадает из распределения магнитной восприимчивости и гумуса по профилям сходного типа почв, но расположенных в других точках. Наиболее вероятной причиной этого расхождения может быть антропогенное загрязнение почв этих точек ввиду прибрежного расположения (см. рис. 1).

Отмеченная кластеризация распределения магнитной восприимчивости и гумуса по точкам подтверждается и диаграммой МВ–гумус (рис. 6). Видно, что магнитная восприимчивость и гумус действительно образуют слабо пересекающиеся кластеры.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОМАГНИТНЫЙ АНАЛИЗ

Изучение магнито-минералогических особенностей валовых образцов изучаемых почв было проведено методом дифференциального терромагнитного анализа (ДТМА). Для образцов суглинистой почвы (т. 10, 2.1–2.7) наблюдается сходная картина по распределению магнитных минералов по профилю (рис. 7). В верхней части профиля (0–10 см) отмечается присутствие сульфидов и карбонатов железа, которые при

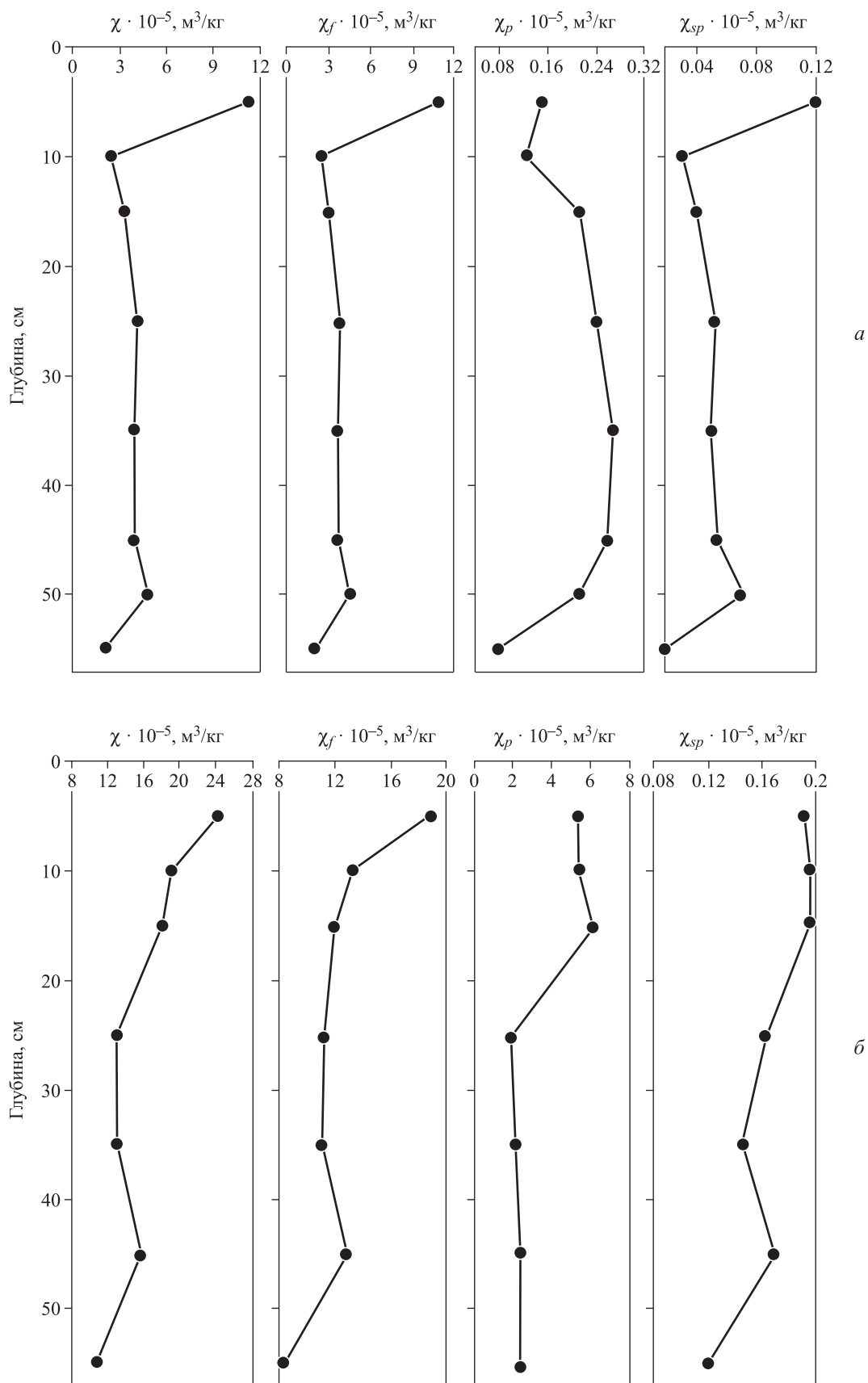


Рис. 2. Профильное распределение магнитных параметров в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве в точках 1 (а) и 6 (б)

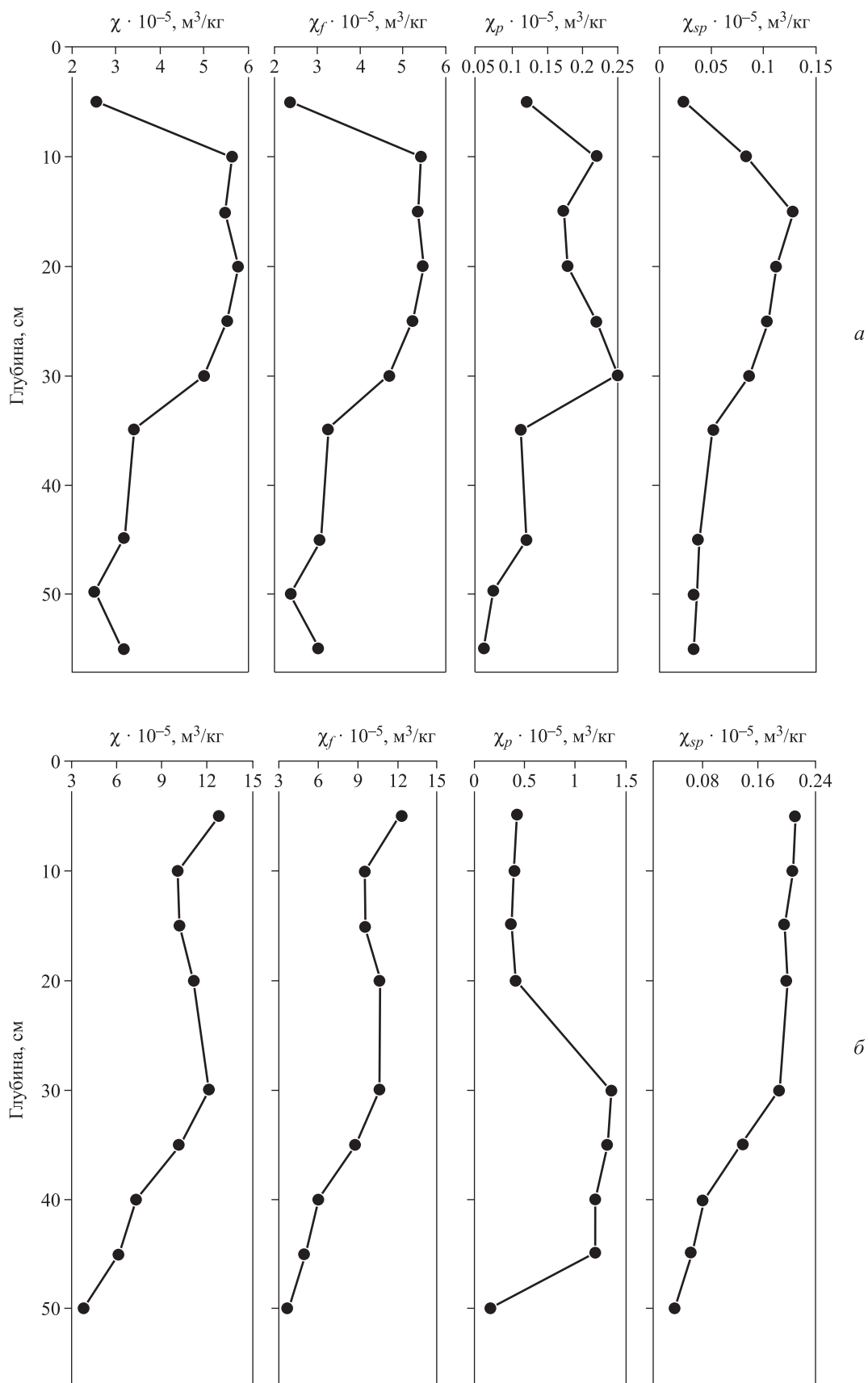


Рис. 3. Профильное распределение магнитных параметров в дерново-подзолистой суглинистой почве в точках 2.1 (а) и 2.5 (б)

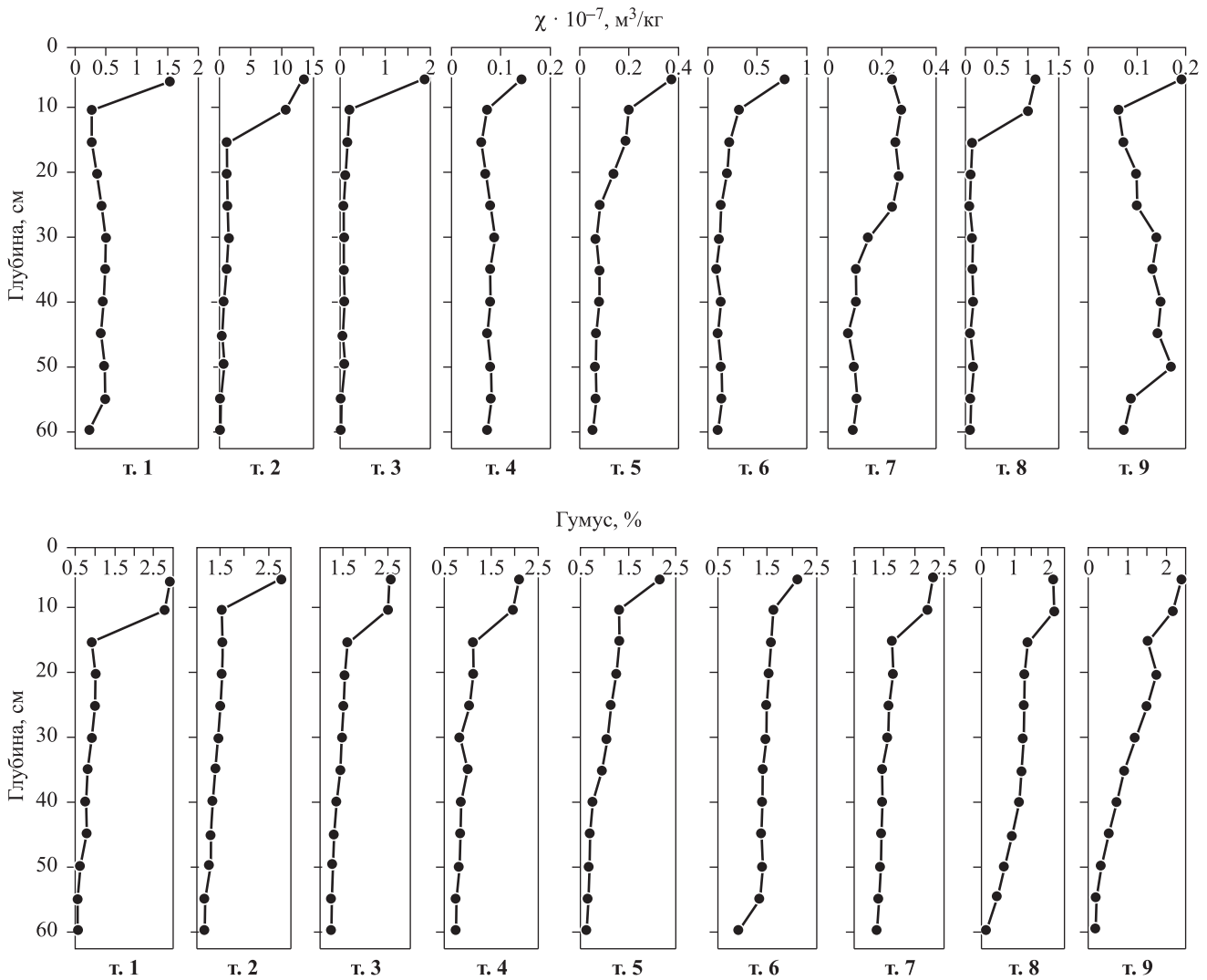


Рис. 4. Профильное распределение магнитной восприимчивости и гумуса в дерново-среднеподзолистой супесчаной почве

нагревании до температур выше $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ переходят в магнетит (см. рис. 7, а). На диаграмме ДТМА этот эффект выражен в некотором увеличении намагниченности при температуре около $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ и резком спаде при достижении температуры Кюри магнетита. Наряду с магнетитом в некоторых образцах также присутствует гематит.

У образцов из более глубоких горизонтов интенсивность намагниченности на порядок слабее, поэтому термокривые здесь выглядят вогнутыми, а дифференциальные кривые – очень зашумленными. В некоторых образцах присутствует (титано)магнетит с T_c около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и можно предполагать вероятное присутствие гидроксидов железа, о чем свидетельствует область заметного понижения величины производной на дифференциальных кривых при $T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 7, б). В основном же, в силу малого содержания ферритмагнитной фракции, в образцах из этих горизонтов преобладает пара- и диамагнетизм. Парамагнетизм образцов выражается в вогнутости термомагнитных кривых (см. рис. 7, б), диамагнетизм особенно характерен для

нижней части разреза (от 45 см), где для некоторых образцов отмечается уход интегральных кривых в отрицательную область, что и говорит о присутствии большого количества диамагнитного материала.

Схожая картина распределения магнитных минералов по профилю наблюдается и в дерново-среднеподзолистых супесчаных почвах (т. 1–9), особенно в верхнем горизонте, только меньшей интенсивности (см. рис. 7, в). Небольшой рост намагниченности в районе $450\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим спадом в окрестности T_c магнетита связан, скорее всего, с диссоциацией пирита и образованием магнетита. Как следствие, намагниченность пробы значительно увеличивается после первого нагрева, а на кривой повторного нагрева появляется гематит ввиду окисления магнетита. Изначально в пробе также присутствует магнетит и, вероятно, гематит, который в силу маленькой намагниченности насыщения и малой концентрации не так явно проявляется на термомагнитных кривых.

О размерности магнитных частиц можно судить, исходя из диаграмм Дэя [Day et al., 1977] (рис. 8). Хотя

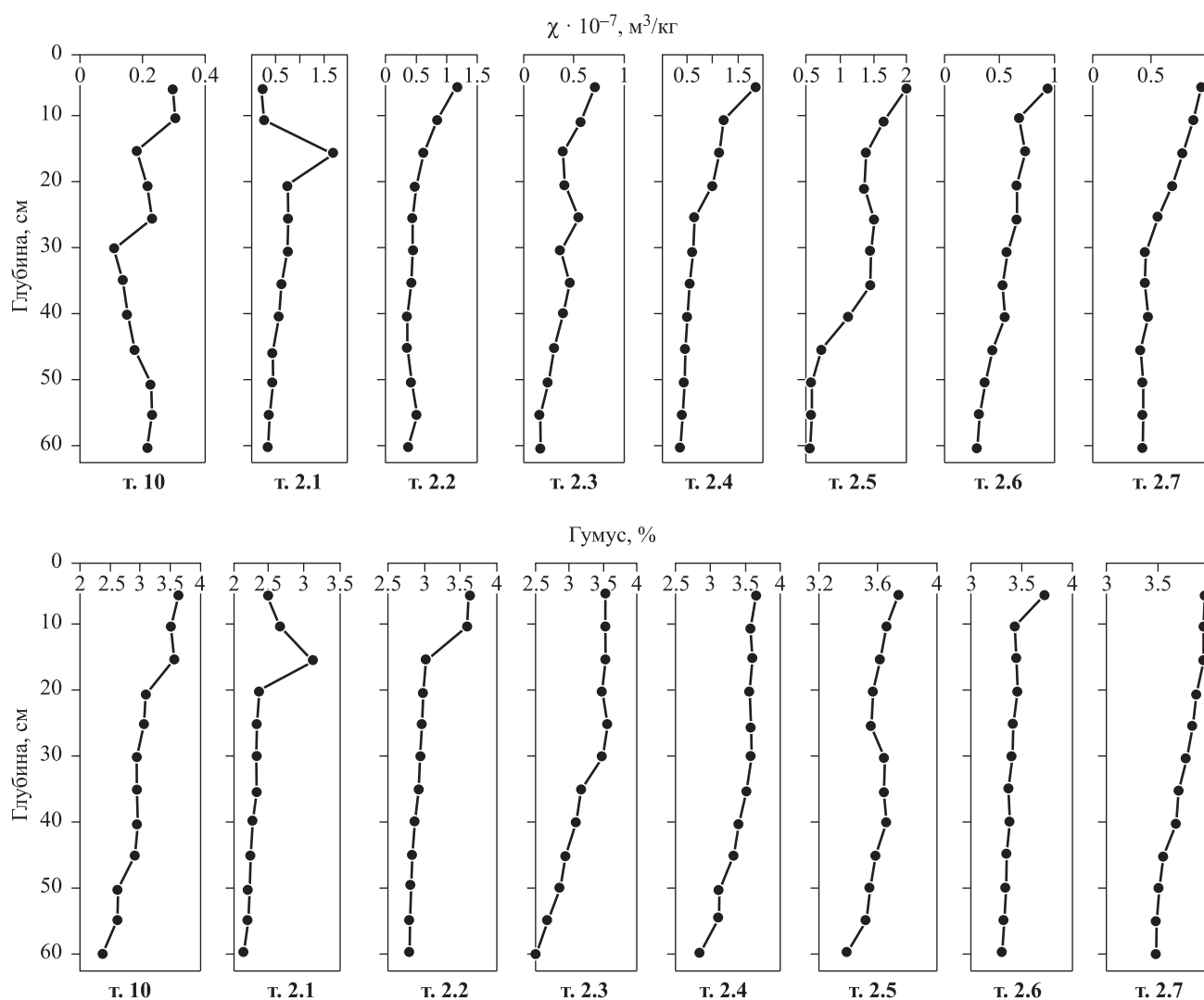


Рис. 5. Профильное распределение магнитной восприимчивости и гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве

вид диаграмм Дзя у образцов супесчаных почв, взятых вдоль береговой линии, и образцов суглинистых почв, отобранных вверх по склону, к лесу, различен (суглинистые почвы демонстрируют более компактную структуру), тем не менее, все образцы демонстрируют псевдооднородное (ПОД) поведение ферромагнитных частиц.

КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ КОЭРЦИТИВНЫХ СПЕКТРОВ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

Коэрцитивные спектры (КС) образцов рассчитывались по измеренным на них петлям гистерезиса [Jasonov et al., 1998]. Для получения КС на каждом образце измерялась кривая перемагничивания остаточной намагниченности насыщения $J_{rs}(B)$ при приложении к образцу обратно направленного постепенно возрастающего внешнего магнитного поля B . КС рассчитывался как производная $dJ_{rs}(B)/dB$.

Далее, следуя методике, изложенной в работах [Fabian et al., 2016; Фаттахова и др., 2020; Kosareva et al.,

2020], нами было выполнено разложение КС на компоненты (рис. 9, а). Для удобства анализа спектры нормировались с тем, чтобы интеграл по каждому КС был равен единице. Из представленных на рис. 9, а данных ясно следует, что КС образцов изученной коллекции состоит из достаточно компактной мягкой компоненты с максимумом ~ 20 мТ и протяженной компоненты, имеющей магнитомягкое плато на интервале 0–50 мТ и жесткий хвост, простирающийся до 300 мТ. Магнитомягкая компонента по своей форме и параметрам хорошо отвечает так называемой ЕХ-компоненте педогенного магнетита, образующегося в органическом слое, как это описано в статьях [Egli, 2004; Фаттахова и др., 2020]. На рис. 9, б показано изменение интенсивности этой компоненты по профилю, рассчитанное по ряду точек. Как следует из представленных на рисунке данных, компонента ЕХ практически отсутствует в супесчаных почвах (т. 4, 5 и 6), которые характеризуются присутствием почти исключительно жесткой магнитной компоненты (рис. 9, в). Судя по результатам ДТМА, эту компоненту следует связать с гематитовой

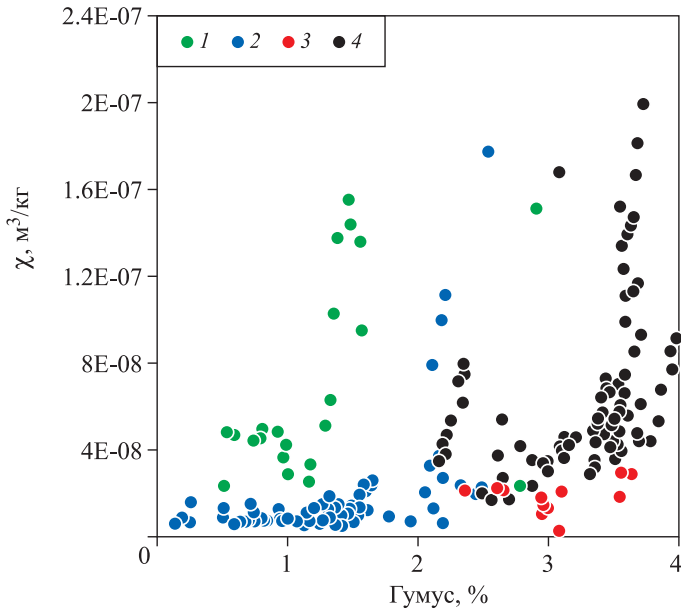


Рис. 6. Распределение исследуемых дерново-подзолистых почв на диаграмме магнитная восприимчивость – гумус

1, 2 – супесчаные почвы: 1 – т. 1, 2; 2 – т. 3–9; 3, 4 – суглинистые почвы: 3 – т. 10, 2.1–2.3; 4 – т. 2.4–2.7

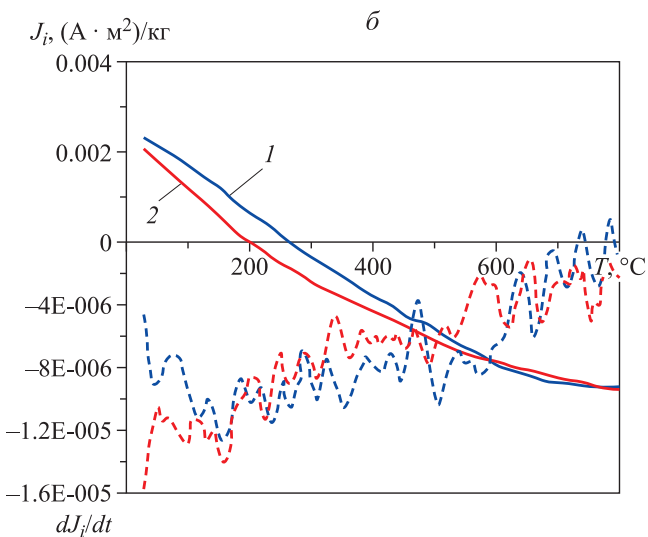
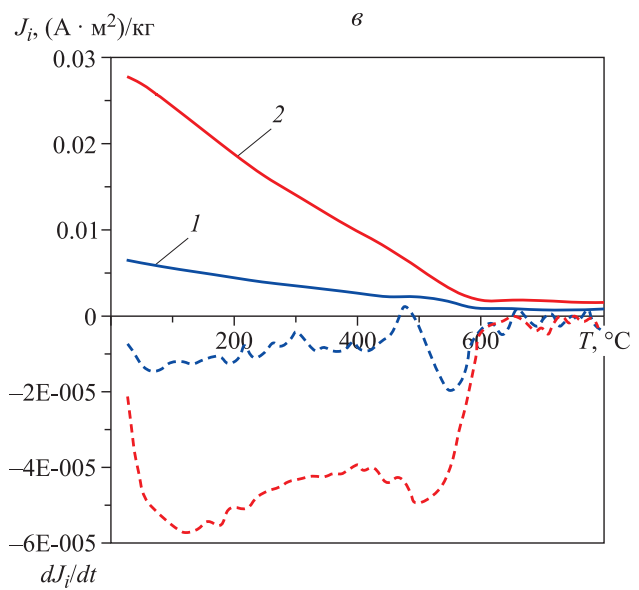
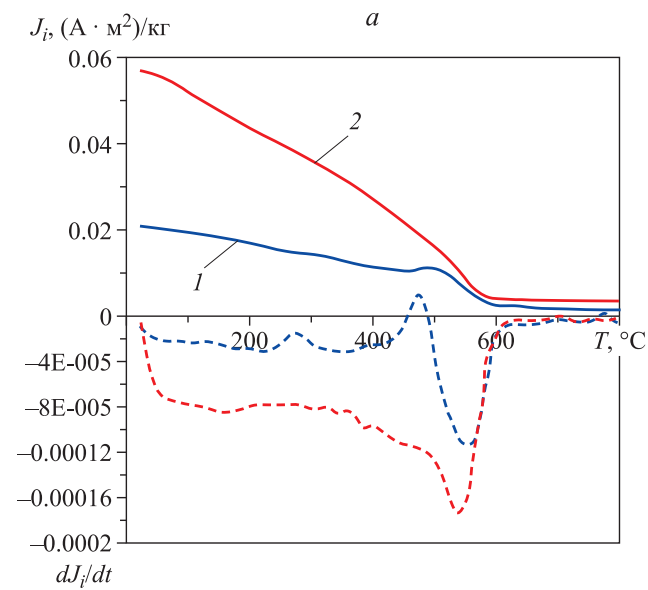
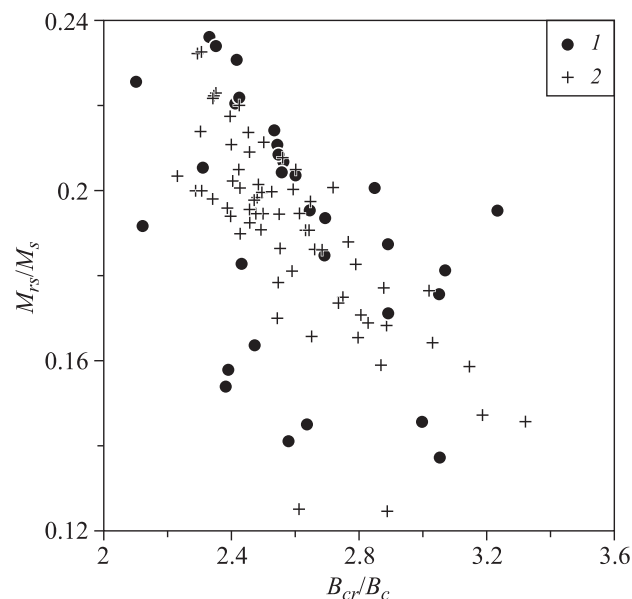


Рис. 7. Зависимость индуктивной намагниченности от температуры образцов с глубин 0–5 см (т. 2.5) (а), 55–60 см (т. 2.2) (б) и 0–5 см (т. 5) (в) исследуемых дерново-подзолистых почв

1 – первый нагрев, 2 – повторный нагрев. Пунктирные линии – дифференциальные кривые (производные dJ_i/dt)

Рис. 8. Диаграммы Дзя для дерново-подзолистой суглинистой (1) и дерново-среднеподзолистой супесчаной (2) почв

M_{rs} – остаточная намагниченность насыщения; M_s – намагниченность насыщения; B_{cr} – остаточная коэрцитивная сила; B_c – коэрцитивная сила



составляющей, коэрцитивность которой несколько понижена за счет малого размера частиц. Снижение коэрцитивности и тот факт, что КС этой компоненты содержит и магнитомягкую часть (плато на интервале 0–50 мТ), говорит о том, что эта компонента также имеет педогенное происхождение и неразрывно связана с присутствием педогенного магнетита.

Анализ парных корреляций между магнитными параметрами почв показал, что ферромагнитные минералы в обоих видах почв имеют весьма однородные магнитные свойства (таблица). Действительно, корреляции между параметрами, представленными в таблице, превышают 69 %, а если рассмотреть отдельно корреляции между χ , M_s и M_{rs} , то они превышают 90 %. Это означает, что магнитные минералы в исследованных почвах весьма однородны по своим свойствам, а вариации корреляций определяются практически исключительно концентрацией ферромагнетика.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованные дерново-среднеподзолистые супесчаные почвы характеризуются невысоким средним содержанием гумуса и гранулометрическим составом с преобладанием фракций песка. Вместе с тем, как это было показано на рис. 4, в, в приповерхностных слоях всех супесчаных почв на глубинах 5–10 см отмечается заметное увеличение содержания гумуса. Ниже оно сначала резко падает, а затем постепенно уменьшается. Такое поведение концентрации гумуса можно объяснить тем, что супесчаные почвы имеют низкую влагоемкость, и вся поступающая в них влага быстро уходит вниз по профилю, унося с собой органические вещества. Что же касается магнитной восприимчивости, то она также имеет повышенные величины в приповерхностном слое супесчаных почв, а в ряде точек достигает достаточно высоких значений – $\sim 1.06 \cdot 10^{-6}$ СИ ($\text{м}^3/\text{кг}$). Однако ниже восприимчивость стремительно падает до уровня $\sim 2.62 \cdot 10^{-8}$ СИ ($\text{м}^3/\text{кг}$). Для объяснения такого катастрофического падения восприимчивости следует вспомнить, что в состав гумуса входят разные

группы соединений, среди которых присутствуют гуминовые кислоты и фульвокислоты. Обычно в дерново-подзолистых почвах преобладают фульвокислоты, водные растворы которых имеют сильноокислую реакцию, в результате чего часть минерального состава почвы растворяется. В частности, это относится и к ферромагнитным минералам шпинельной группы (магнетит), которые в кислотной среде при увлажнении почв имеют тенденцию к быстрому разрушению. В результате магнитная восприимчивость глубинных слоев дерново-среднеподзолистых супесчаных почв в основном обеспечивается за счет гексагонального педогенного гематита, также обычно присутствующего в почвах в значительном количестве [Jordanova, 2017], но вместе с тем не растворяющегося в кислотном окружении.

Кривые магнитной восприимчивости дерново-подзолистых суглинистых почв ведут себя подобно профилям гумуса в таких почвах, также демонстрируя постепенный спад величины восприимчивости с глубиной, хотя в некоторых случаях (т. 10, 2.1, 2.3, 2.5) наблюдается локальный максимум (или «полочка») по профилю МВ на глубинах 15–35 см. Подобное поведение МВ характерно для элювиально-иллювиального типа почвенного профиля, к которому в той или иной степени относятся суглинистые почвы, отличающиеся от супесчаных более высокой связностью и влагоемкостью. По этим причинам такие почвы намного лучше обеспечены минеральными веществами и гумусом, как это видно из сопоставления приведенных на рис. 4 и 5 данных, и, соответственно, способны синтезировать намного большее количество педогенных магнитных минералов.

На рис. 9, б также видно, что интенсивность мягкой компоненты заметно уменьшается с глубиной в суглинистых почвах в отличие от поведения жесткой компоненты, которое мало меняется после некоторого спада в поверхностном слое (глубиной до 10 см) (см. рис. 9, в). Спаду интенсивности мягкой компоненты естественным образом соответствует рост магнитной жесткости образцов B_{cr} (рис. 10). А поскольку, как

Матрица корреляций

	M_{rs}	B_{cr}	M_s	B_c	χ	J_r
M_{rs}	1	-0.77	0.95	-0.72	0.94	0.99
B_{cr}		1	-0.69	0.87	-0.76	-0.78
M_s			1	-0.69	0.93	0.95
B_c				1	-0.72	-0.73
χ					1	0.94
J_r						1

Примечания. M_{rs} – остаточная намагниченность насыщения; M_s – намагниченность насыщения; B_{cr} – остаточная коэрцитивная сила; B_c – коэрцитивная сила; χ – магнитная восприимчивость; J_r – остаточная намагниченность. Выделенные корреляции значимы на уровне 95 %.

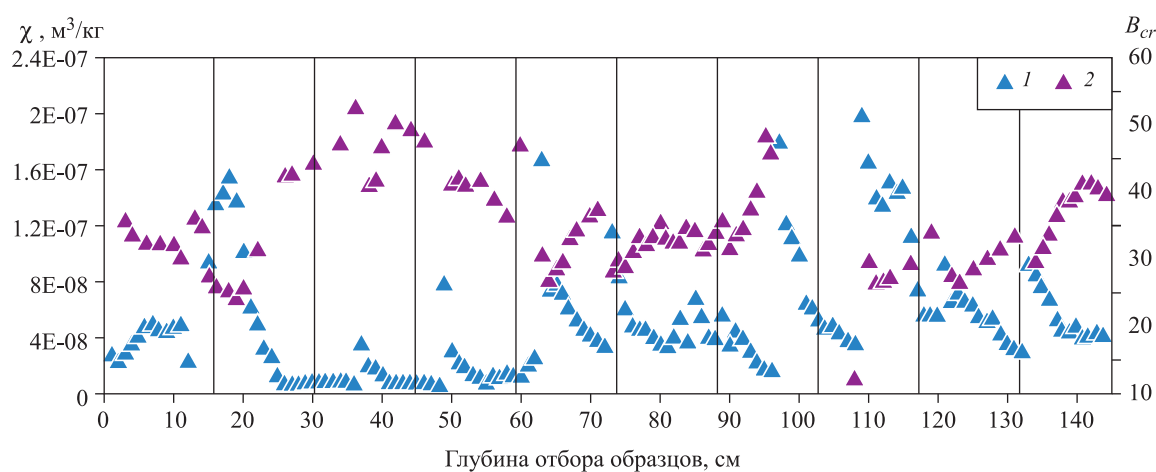


Рис. 10. Профильное распределение значений магнитной восприимчивости (1) и B_{cr} (2) в исследуемых дерново-подзолистых суглинистых почвах

педогенного магнетита является, скорее всего, упоминаемое выше растворение частиц магнетита фульвокислотами при интенсивном увлажнении. В пользу этой гипотезы говорит и то, что концентрация жесткой компоненты, ассоциируемой с гематитом, не снижается с глубиной, поскольку гематит очень слабо растворяется в соляной кислоте.

ВЫВОДЫ

1. По оценке вклада диа-/парамагнитной, суперпарамагнитной и ферримагнитной компонент по коэрцитивным спектрам выявлено, что основной вклад в магнитную восприимчивость исследуемых почв вносит ферримагнитная компонента.

2. Почвы береговой части озера с супесчаным гранулометрическим составом имеют низкое содержание гумуса и низкие значения магнитной восприимчивости.

3. Почвы с суглинистым гранулометрическим составом имеют относительно высокое содержание гумуса и повышенные значения магнитной восприимчивости, при этом величины этих параметров имеют тенденцию

к увеличению при движении вверх по склону, от берега к лесу.

4. Поверхностные слои (глубиной до 10 см) как супесчаных, так и суглинистых почв в большинстве случаев характеризуются намного более высоким содержанием гумуса.

5. Ферримагнитные минералы в обоих видах почв имеют однородные магнитные свойства и представлены тонкозернистыми магнитомягким магнетитом и магнито жестким гематитом, имеющими педогенное происхождение.

6. Распределение восприимчивости (и в какой-то мере гумуса) в прибрежных почвах (т. 1, 2 и 10) заметно выпадает из общих характеристик, характерных для почв остальных точек, по-видимому, в силу антропогенного загрязнения.

7. Магнитная восприимчивость глубоких слоев почв в основном обеспечивается за счет гексагонального педогенного гематита, поскольку магнетитовая составляющая ферримагнитных минералов растворяется

в водном растворе фульвокислот, образующемся при каждом увлажнении почв осадками.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Часть работ Д.М. Кузиной выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому (Приволжскому) федеральному университету для выполнения государственного задания № 671-2020-0049 в сфере научной деятельности. Проведение расчетов и компонентный анализ по методу неотрицательной матричной факторизации осуществлялось в рамках госзадания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (Н.К. Сычёва, В.П. Щербаков).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В. Магнетизм почв. М.; Ярославль: ЯГТУ, 1995. 222 с.
- Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1986. 167 с.
- Вадюнина А.Ф., Бабанин В.Ф. Магнитная восприимчивость некоторых почв СССР // Почвоведение. 1972. № 10. С. 56–66.
- Иванов А.В. Магнитное валентное состояние железа в твердой фазе почв: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: МГУ, 2003. 41 с.
- Растворова О.Т., Андреев Д.П. Валовой анализ органической части почв // Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. С. 115–140.
- Фаттахова Л.А., Щербаков В.П., Кузина Д.М. Петромагнитные свойства залежных почв как индикатор содержания в них органического вещества // Геофизические процессы и биосфера. 2020. Т. 19, № 1. С. 51–65. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-3>
- Day R., Fuller M., Schmidt V. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // Phys. Earth Planet. Inter. 1977. V. 13. P. 260–267.
- Dearing J.A. Natural magnetic tracers in fluvial geomorphology // Tracers in geomorphology / Ed. by I.D.L. Foster. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2000. P. 57–82.
- Dearing J.A., Maher B.A., Oldfield F. Geomorphological linkages between soils and sediments: The role of magnetic measurements // Geomorphology and soils. London: Allen and Unwin, 1985. P. 245–266.
- Dearing J.A., Lees J.A., White C. Mineral magnetic properties of gleyed soils under oak and corsican pine // Geoderma. 1995. V. 68. P. 309–319.
- Dearing J.A., Hay K., Baban S., Huddleston A.S., Wellington E.M.H., Loveland P.J. Magnetic susceptibility of topsoils: A test of conflicting theories using a national database // Geophys. J. Inter. 1996. V. 127. P. 728–734.
- De Jong E., Nestor P.A., Pennock D.J. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution // Catena. 1998. V. 32. P. 23–35.
- De Jong E., Pennock D.J., Nestor P.A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan Canada // Catena. 2000. V. 40. P. 291–305.
- Egli R. Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 2. Fundamental properties of coercivity distributions // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29, is. 13/14. P. 851–867.
- Fabian K., Shcherbakov V.P., Kosareva L., Nourgaliev D. Physical interpretation of isothermal remanent magnetization endmembers: New insights into the environmental history of Lake Hovsgul, Mongolia // GGG. 2016. V. 17. P. 4669–4683. <https://doi.org/10.1002/2016GC006506>
- Hanesch M., Rantitsch G., Hemetsberger S., Scholger S. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping // Sci. Tot. Environ. 2007. V. 382. P. 351–363.
- Jasonov P.G., Nurgaliev D.K., Burov B.V., Heller F. A modernized coercivity spectrometer // Geologica Carpathica. 1998. V. 49. P. 224–226.
- Jordanova N. Soil magnetism: Applications in pedology, environmental science and agriculture. Elsevier Acad. Press, 2017. 466 p.
- Kosareva L.R., Kuzina D.M., Nurgaliev D.K., Sitdikov A.G., Luneva O.V., Khasanov D.I., Suttie N., Spassov S. Archaeomagnetic investigations in Bolgar (Tatarstan) // Stud. Geophys. Geod. 2020. V. 64, is. 2. P. 255–292.
- Maher B.A. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements // Phys. Earth Planet. Inter. 1986. V. 42. P. 76–92.
- Mullins C.E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review // J. Soil Sci. 1977. V. 28. P. 223–246.
- Reimann C., Birke M., Demetriades A., Filzmoser P., O'Connor P. (Eds.) Chemistry of Europe's agricultural soils. Pt. A. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2014. 523 p.
- Stacey F.D., Banerjee S.K. The physical principles of rock magnetism. Amsterdam: Elsevier, 1974. 195 p.
- Thompson R., Oldfield F. Environmental magnetism. London: Allen and Unwin, 1986. 227 p.

Сведения об авторах

ФАТТАХОВА Лейсан Айдаровна – Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий. Россия, Республика Татарстан, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5. E-mail: l.a.fattakhova@yandex.ru

ЩЕРБАКОВ Валерий Прохорович – Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский район, пос. Борок, д. 142. E-mail: shcherbakovv@list.ru

КУЗИНА Диляра Мтыгуловна – Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий. Россия, Республика Татарстан, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5. E-mail: di.kuzina@gmail.com

ДАУТОВ Айрат Наильевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий. Россия, Республика Татарстан, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5. E-mail: Ajrat.Dautov@kpfu.ru

СЫЧЁВА Наталия Константиновна – Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский район, пос. Борок, д. 142. E-mail: sycheva@borok.yar.ru

CHANGES IN MAGNETIC PROPERTIES OF SOD-PODZOLIC SOILS DEPENDING ON SOIL FORMATION CONDITIONS

© 2020 L.A. Fattakhova^{1*}, V.P. Shcherbakov², D.M. Kuzina¹, A.N. Dautov¹, N.K. Sycheva²

¹ Kazan (Volga) Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

² Geophysical Observatory «Borok» – Branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth,
Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, Russia

*e-mail: l.a.fattakhova@yandex.ru

Abstract. The paper presents the results of a study of soil cover in the territory of the «Mari Chodra» national park in the south-eastern part of the Republic of Mari El. Magnetic properties of sod-medium podzolic sandy-loam soils and sod-podzolic loam soils were studied. Samples were taken along the shoreline of the karst Yalchik Lake and up the slope from the lake. Based on the results of magnetic susceptibility measurements it is shown that the studied soil profiles are characterized by both accumulative and eluvial-illuvial distribution of mineral components depending on the conditions of soil formation and recreational activity of the given territory. It is shown that the increase of magnetic susceptibility in organogenic horizons of sod-medium podzolic and sod-podzolic soils is due to the contribution of a ferrimagnetic component. By methods of differential thermomagnetic analysis and decomposition of coercive spectra into components revealed that the main carriers of the magnetization of the presented soils are fine-grained magnetite and hematite, that's have a pedogenic origin.

Keywords: coercive spectrometry, magnetic susceptibility, magnetic analysis methods, sod-podzolic soil, soil formation, soil morphology.

About the authors

FATTAKHOVA Leysan Aydarovna – Kazan (Volga) Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies. Russia, Republic of Tatarstan, 420008, Kazan, Kremlevskaya st., 4/5. E-mail: l.a.fattakhova@yandex.ru

SHCHERBAKOV Valeriy Prokhorovich – Geophysical Observatory «Borok» – Branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 152742, Yaroslavl region, Nekouz district, Borok, 142. E-mail: shcherbakovv@list.ru

KUZINA Dilyara Mtygullova – Kazan (Volga) Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies. Russia, Republic of Tatarstan, 420008, Kazan, Kremlevskaya st., 4/5. E-mail: di.kuzina@gmail.com

DAUTOV Airat Nailevich – Kazan (Volga) Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies. Russia, Republic of Tatarstan, 420008, Kazan, Kremlevskaya st., 4/5. E-mail: Ajrat.Dautov@kpfu.ru

SYCHEVA Natalia Konstantinovna – Geophysical Observatory «Borok» – Branch of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 152742, Yaroslavl region, Nekouz district, Borok, 142. E-mail: sycheva@borok.yar.ru

Cite this article as: Fattakhova L.A., Shcherbakov V.P., Kuzina D.M., Dautov A.N., Sycheva N.K. Changes in magnetic properties of sod-podzolic soils depending on soil formation conditions, *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2020, vol. 19, no. 3, pp. 51–63 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2020.3-4>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, vol. 56, iss. 10. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>