

УДК 631.421

СРАВНЕНИЕ ПЛОЩАДНЫХ И ПРОФИЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ СТЕПНЫХ ПОЧВ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ РАВНИНЫ

© 2023 г. В. В. Мальшев^а *, А. О. Алексеев^а^аИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2а, Пущино, Московская область, 142290 Россия

*e-mail: vladmalysheff@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.12.2022 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 07.03.2023 г.

С целью развития методов поверхностного зондирования почв выполнен сравнительный анализ площадных и профильных измерений магнитной восприимчивости на участках 100 м². Проведено исследование 3 площадок с черноземами обыкновенными (Haplic Chernozems), черноземами южными (Haplic Chernozems) и светло-каштановыми почвами (Haplic Kastanozems (Endosalic, Cambic)). Дополнительно на территории Ергенинской возвышенности изучена катена, включавшая элювиальную, трансэлювиальную и трансэлювиально-аккумулятивную позиции ландшафта. Результаты площадных измерений магнитной восприимчивости (κ_s) с использованием прибора КТ-20 с датчиком 3F-32 (Terraplus) коррелируют ($R^2 = 0.7$) с профильными измерениями в полевых и лабораторных условиях. Показано, что площадной тип съемки κ_s корректно фиксирует объемную магнитную восприимчивость до глубины 30 см. Вариация κ_s на площадках с различными типами почв в основном отражает почвенно-климатическую зональность и пространственную неоднородность, выраженную в различном гранулометрическом и минералогическом составах слоя 0–30 см на площади 10 × 10 м. Площадная магнитная восприимчивость почв может являться важным дополнительным показателем, способным отразить особенности почвообразующих и ландшафтно-геохимических процессов, происходящих в верхнем слое почвы. Варьирование κ_s на площадках в различных позициях ландшафта происходит под влиянием плоскостного смыва и изменения направленности процессов оксидогенеза железа в зависимости от положения почвенного профиля в рельефе. Комплекс измерений площадной и профильной магнитной восприимчивости может применяться для изучения возможных нарушений поверхностного слоя почв и мониторинговых задач.

Ключевые слова: черноземы, каштановые почвы, соединения железа, магнетизм почв, пространственная неоднородность

DOI: 10.31857/S0032180X22601591, **EDN:** VPDTAR

ВВЕДЕНИЕ

Последние годы в практику почвенных исследований широко внедряются методы дистанционного зондирования, которые потенциально могут упростить региональное картографирование почв. Однако они неэффективны там, где почвы лежат под маскирующим покровом растительности или других объектов. Методы дистанционного зондирования страдают от ошибок, вызванных спектральной неоднозначностью (например, различные материалы, излучающие схожие спектры), а также в связи с атмосферным рассеянием. В начале 1990-х годов развитие получило новое направление — проксимальное почвенное зондирование, в основе которого лежат

непрерывные измерения пространственных изменений почвенных показателей в режиме реального времени с использованием приповерхностных геофизических методов (радарные съемки, измерение электрического сопротивления или проводимости, магнитной восприимчивости, рентгеновская флуоресценция, электромагнитная индукция и др.) для анализа закономерностей геопро пространственного распределения почв, но обычно в небольших масштабах (≤ 1 га) [24]. Полезность методов проксимального зондирования для сельскохозяйственных, геотехнических, археологических исследований хорошо известна [23, 30, 32, 34]. Несмотря на это, необходима дальнейшая оценка таких методов для регионального картографирования почв, в том числе в ур-

банизированной местности. Одним из таких методов может быть измерение магнитной восприимчивости, так как известно о ее широком использовании для составления карт загрязнения городских почв [10, 27–29]. Оборудование для магнитных методов измерения относительно дешево по сравнению с другими геофизическими методами, надежно и портативно используется в полевых условиях, с простым сбором данных и небольшой обработкой, необходимой для точного определения аномальных зон, при условии, что были проведены значительные фоновые измерения. Подобное оборудование универсально для успешного обнаружения различных захороненных объектов криминалистической экспертизы, нарушенного грунта и поверхностных выгоревших участков в различных типах почв и отложений [32].

Магнитная восприимчивость является стандартным физическим показателем, применяемым для характеристики почвообразовательных процессов. Он широко используется в генетическом почвоведении [7, 8, 32, 33], экологии [10], палеопочвоведении [2, 11, 19]. Востребованность показателя магнитной восприимчивости обусловлена простотой определения и доказанной связью с физическими, химическими и минералогическими характеристиками почв [21, 36].

При изучении магнитной восприимчивости почв стандартно производятся два типа измерений. Первый тип – это площадные измерения. Выполняются в полевых условиях на поверхности почвы, часто с использованием специальных датчиков типа петли Bartington MS2D [22] или каппаметров КТ-5 [14]. Значения площадной магнитной восприимчивости используют для построения карт. С их помощью моделируют эрозионные процессы [25], определяют единицы картографирования [37], составляют картограммы почв [9] и т.д. Преимущество данного типа измерения определяется его не деструктивностью, что позволяет получать картину, соответствующей природной.

Второй тип представляет собой профильное измерение магнитной восприимчивости, включая почвообразующую породу. Выполняется как в полевых, так и в лабораторных условиях. Характеристика профильного распределения магнитной восприимчивости является дополнительным признаком, применяемым для определения типа почв [13, 21], а также для диагностики некоторых элементарных почвенных процессов, таких как оглеение, иллювирующее, осолонцевание [7]. Наиболее эффективная интерпретация магнитометрических данных в почвоведении требует интеграции двух рассмотренных типов измерений.

Величина магнитной восприимчивости в степных почвах определяется, в первую очередь

содержанием в ней сильно- и слабомагнитных соединений железа. Первые представлены ферромагнитными минералами: магнетитом, маггемитом. Образование магнетита связывают с диссимбиотической жизнедеятельностью бактерий железоредукторов [2]. Новообразованный мелкодисперсный магнетит может самопроизвольно окислиться до маггемита. Вторая группа представлена антиферромагнитными минералами: гематитом, гетитом. Считается, что образование этих минералов происходит в конкурентных условиях. Гетит образуется из любого источника железа через раствор [35]. Гематит формируется путем превращения (включая дегидратацию) ферригидрита, даже в присутствии избытка воды [18]. Количество данных минералов в почве, их размер и дисперсность определяет величину магнитной восприимчивости.

Исследования магнетизма почв последних 20 лет [2, 7, 12, 20, 27, 37] показали, что магнитные характеристики закономерно изменяются по профилю почв, но неоднородны в площадном выражении. Варьирование по площади определяется неоднородностью почвенного покрова и различной интенсивностью элементарных почвенных процессов [20]. Данные закономерности вызывают повышенный интерес к использованию методов профильного и площадного исследования магнитной восприимчивости для изучения пространственной неоднородности почв.

Целью настоящего исследования является использование сравнительного анализа площадных и профильных измерений магнитной восприимчивости для изучения варьирования процессов оксидогенеза железа и выявления неоднородностей в поверхностном слое степных почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в Ростовской области (площадка 1), Ставропольском крае (площадка 2) и Республике Калмыкия (площадка 3). Площадку 1 заложили на пашне в окрестностях х. Чумбур-Коса (46°57'49" N, 38°56'53" E) на пологом склоне водораздела. Изучали черноземы обыкновенные (Haplic Chernozems по WRB). Площадку 2 заложили в окрестностях с. Отказное (44°17'23" N, 43°51'22" E) в верхней части пологой балки на целинном участке. Здесь изучали черноземы южные (Haplic Chernozems по WRB). Площадка 3 расположена в окрестностях п. Зунда-Толга (45°36'39" N, 44°19'39" E) на водораздельном пространстве. Здесь изучали светло-каштановые солонцеватые почвы (Haplic Kastanozems (Endosalic, Cambic) по WRB). Почвообразующими породами для всех изученных почв являлись лёссовидные суглинки.

С целью оценки влияния рельефа на показатель магнитной восприимчивости дополнитель-

но на территории Ергенинской возвышенности изучали катену, включающая три площадки на элювиальной, трансэлювиальной и трансэлювиально-аккумулятивной позициях. Площадки заложены вблизи с. Ремонтное Ростовской области (46°32'59" N, 43°41'33" E). Здесь исследовали светло-каштановые солонцеватые почвы (Haplic Kastanozems (Endosalic, Cambic) по WRB) на лёссовидных суглинках [14].

Полевые измерения объемной магнитной восприимчивости (κ_s) на площадках выполняли с использованием прибора КТ-20 с датчиком 3F-32 (Terraplus, Канада) на частоте 1 кГц. КТ-20 – это портативный полевой измерительный прибор, предназначенный для измерения магнитной восприимчивости и удельной проводимости образца. С появлением датчика большого диаметра 3F-32 стало возможно использовать систему КТ-20 для проведения малоглубинных исследований, поскольку появилась возможность измерять параметры почв на глубину примерно до 30 см.

Датчик 3F-32 имеет диаметр 32 см и отличается наличием трех рабочих частот, подобранных таким образом, чтобы обеспечивать определенные преимущества при измерении магнитной восприимчивости и удельной проводимости. Прибор позволяет выполнять единичные измерения в определенном месте или осуществлять непрерывный сбор данных для картографирования целого участка. Встроенный приемник GPS снабжает данные координатами места. Кроме того, в приборе имеется встроенная цифровая камера для визуального документирования представляющих интерес образцов. Данный прибор позволяет получать значения κ_s , которые являются безразмерными и выражаются в единицах 10^{-3} ед. СИ. Измерения выполняли с шагом 1 м на заранее размеченной площадке размером 10×10 м. После измерений в пределах площадки с помощью почвенного бура отбирали средний образец почвы из трех скважин до почвообразующей породы через 10 см. Также по углам площадок отобрали среднюю пробу почв из слоя 0–30 см. В полученных образцах в лабораторных условиях измеряли удельную магнитную восприимчивость χ (10^{-8} м³/кг) с помощью прибора Carrabridge KLY-2 и параллельно прибором КТ-20 со стандартным датчиком с двумя рабочими частотами 1 и 10 кГц (аналогично распространенному прибору КТ-5). Корреляцию между показателями κ_s и χ определяли методом регрессионного анализа с коэффициентом значимости $p < 0.05$.

Для определения пространственной вариабельности объемной магнитной восприимчивости использовали метод вариографии. Строили вариограммы – экспериментальные графики зависимости полудисперсии κ_s от расстояния между точками апробирования. Выбор наиболее под-

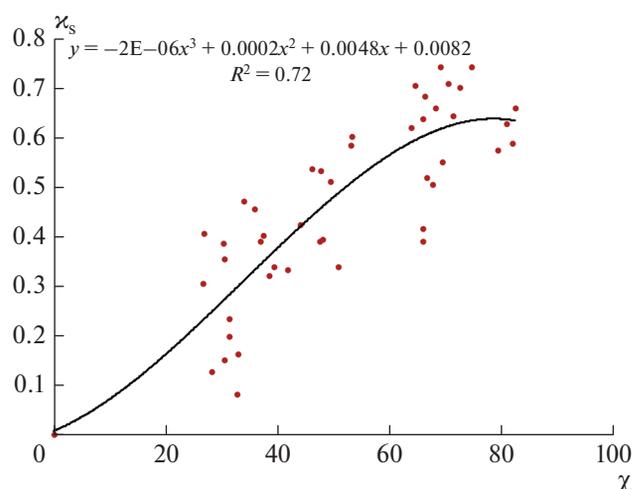


Рис. 1. Сравнение профильной магнитной восприимчивости (χ) почв в верхних 30 см с площадной магнитной восприимчивостью (κ_s).

ходящей модели осуществляли с использованием показателей качества. Полудисперсию рассчитывали по формуле:

$$\gamma(h) = 1/(2N(h)) \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2,$$

где $z(x_i)$ и $z(x_i + h)$ – результаты измерений κ_s в точках x_i и $x_i + h$, а $2N(h)$ – количество пар точек, удаленных друг от друга на расстояние h [14, 29].

Полученные модели использовали для построения картограмм, которое выполняли с помощью метода кригинга. Его принцип основан на определении веса значений переменной в окрестных точках для оценки значения переменной в искомой точке или области. Вариографию и построение картограмм магнитной восприимчивости почв выполняли в программе ArcMap 10.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты площадных измерений магнитной восприимчивости κ_s прибором КТ-20 с датчиком 3F-32 и профильных измерений χ до глубины 30 см на приборе Carrabridge KLY-2 показали корреляцию. Она показывает, что площадной тип съемки прибором КТ-20 может корректно фиксировать магнитную восприимчивость до глубины 30 см (рис. 1). Значения κ_s или χ магнитной восприимчивости равны 0 при измерениях воздуха, без контакта с образцом.

Статистический анализ данных показал, что средние и медианные значения площадной магнитной восприимчивости (κ_s) почв на исследуемых площадках значимо не различаются (табл. 1). По показателям варьирования (вариация, коэффициент вариации, стандартное отклонение) наи-

Таблица 1. Статистические характеристики площадной магнитной восприимчивости

Параметр	Почва		
	светло-каштановая	чернозем южный	чернозем обыкновенный
Объем выборки	121	121	121
Нижний квартиль	0.58	0.48	0.54
Медиана	0.63	0.57	0.63
Верхний квартиль	0.72	0.65	0.70
Минимум	0.45	0.21	0.24
Максимум	0.94	1.06	0.85
Среднее	0.65	0.57	0.62
Вариация	0.01	0.02	0.01
Коэффициент вариации, %	15.76	32.26	21.83
Стандартное отклонение	0.09	0.18	0.11
Межквартильный размах	0.14	0.17	0.16
Стандартная ошибка	0.0009	0.0015	0.0011

большей вариабельностью значений κ_s характеризуется чернозем южный, наименьшей – светло-каштановая почва.

Для изучения распределения κ_s в пространстве использовали геостатистический метод. Данный метод ранее применяли для исследования пространственной вариабельности отдельных почвенных свойств сухостепной и степной зон [16]. Для площадной магнитной восприимчивости, измеренной на заложенных площадках, были построены вариограммы (рис. 2). Полученные вариограммы были аппроксимированы гауссовой, экспоненциальной и сферической моделью. Далее выбирали модель с наименьшим значением средней стандартной ошибки [31].

Во всех почвах на исследуемых площадках имеется пространственная вариация, но проявляется она на различном расстоянии. Для чернозема обыкновенного это расстояние составляет 1–2.5 м. Из всех исследованных почв, только для чернозема обыкновенного вариограмма площадной магнитной восприимчивости имела квазипериодическую форму. Такая форма и небольшое расстояние вариации κ_s , по-видимому, может характеризовать сельскохозяйственную обработку и изменения микрорельефа. При этом на поверхность может выноситься слабомагнитный материал, который будет снижать значения магнитной восприимчивости. Эта вариация носит циклический характер и проявляется на небольшом расстоянии, в результате значения восприимчивости пахотного горизонта последовательно растут и снижаются [9].

Вариограммы, построенные для объемной магнитной восприимчивости, измеренной на площадках с черноземом южным и светло-каштановой почвой, имеют схожую форму. Для черно-

зема южного варьирование значений κ_s происходит на расстояниях 1–4 м, что близко к чернозему обыкновенному. Форма вариограммы имеет некоторую периодичность. Для светло-каштановой почвы варьирование κ_s происходит на расстояниях 1–6 м. По форме вариограмма имеет слабовыраженную периодичность.

Поскольку измерения проводили в сходных по размеру площадках и в одинаковом направлении, обнаруженные с использованием вариографии в пространственно-распределенных данных скрытые закономерности могут быть связаны с наличием неоднородных структур, проявляющихся в верхнем 0–30 см слое почвы. Для более детального изучения пространственного распределения κ_s аппроксимированные модели вариограммы использовали для построения картограмм методом кригинга. На построенных картограммах хорошо видны особенности пространственной изменчивости κ_s в слое 0–30 см исследуемых почв (рис. 3).

Для характеристики процессов пространственного изменения магнитной восприимчивости площадные измерения проводили в комплексе с профильными. Профильные распределения удельной магнитной восприимчивости (χ) степных почв представляют собой кривые аккумулятивного характера, с закономерным уменьшением χ вниз по профилю, где наибольшие значения приурочены к верхним горизонтам чернозема южного ($85 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), а наименьшие – к материнской породе ($18 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$). Такое распределение χ является типичным для степных почв Русской равнины [2].

Во всех исследованных почвах магнитная восприимчивость в верхних горизонтах почв была

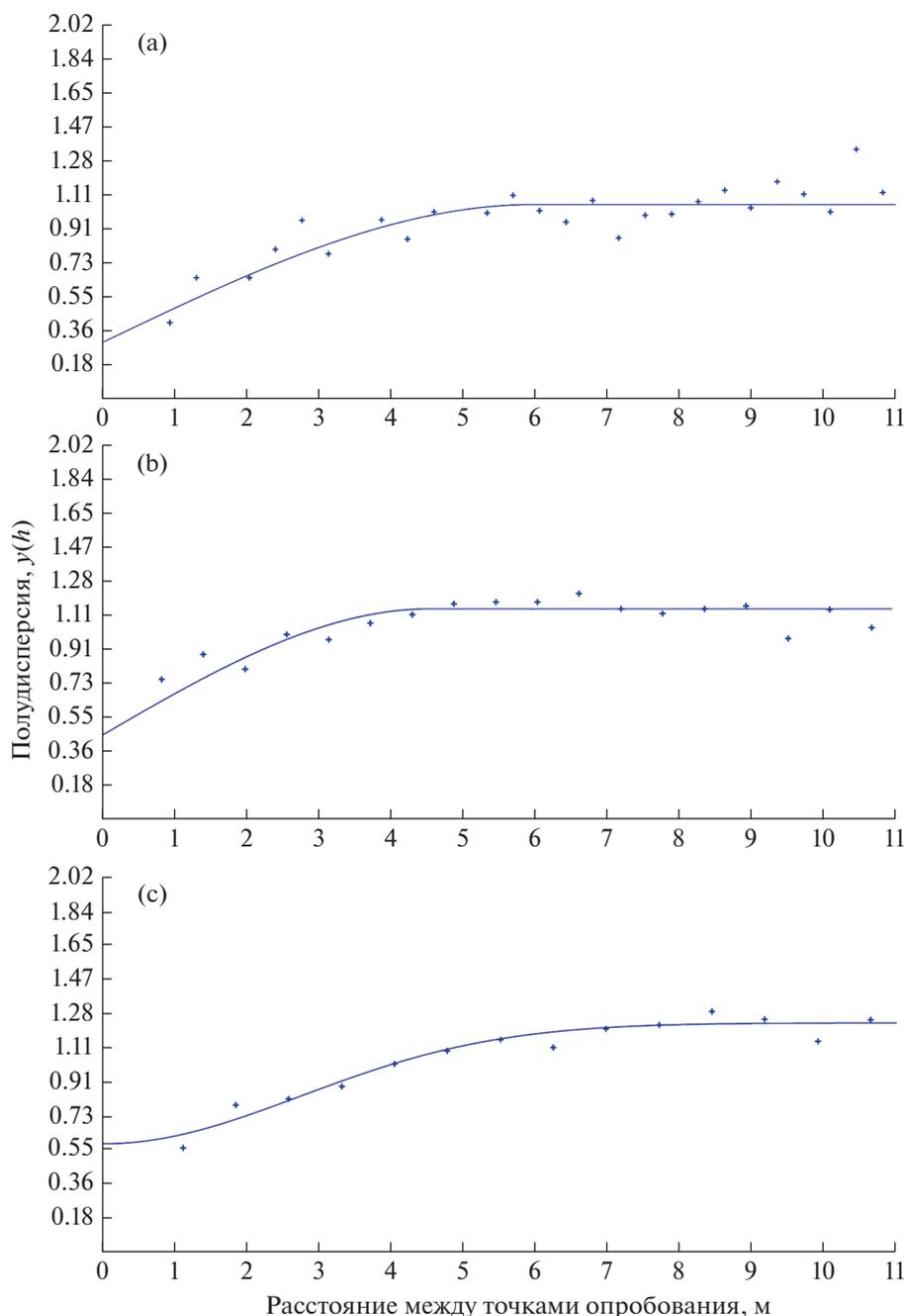


Рис. 2. Вариограммы распределения κ_s в черноземе обыкновенном (а), черноземе южном (б) и светло-каштановой (с) почве. Точки – экспериментальные усредненные значения, сплошная линия – результат аппроксимации моделью.

больше, чем в почвообразующих породах. Как показано ранее [3], в верхних горизонтах в ходе почвообразования происходит образование сильномагнитных минералов преимущественно в илистой фракции.

Варьирование объемной магнитной восприимчивости на изученных площадках с исследуемыми почвами существенно различается. Пространственные карты распределения κ_s для чер-

нозема обыкновенного хорошо демонстрируют варьирование в результате распашки. Величина κ_s в пределах изученного участка изменяется от 0.3 до 0.8×10^{-3} ед. СИ. Имеются области размером 1–2 м со значениями κ_s $0.4\text{--}0.5 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Значения κ_s в диапазоне $0.6\text{--}0.7 \times 10^{-3}$ ед. СИ занимают 32% от общей площади, а в $0.5\text{--}0.6$ и $0.7\text{--}0.8 \times 10^{-3}$ ед. СИ по 20% соответственно. Удельная магнитная восприимчивость снижается в

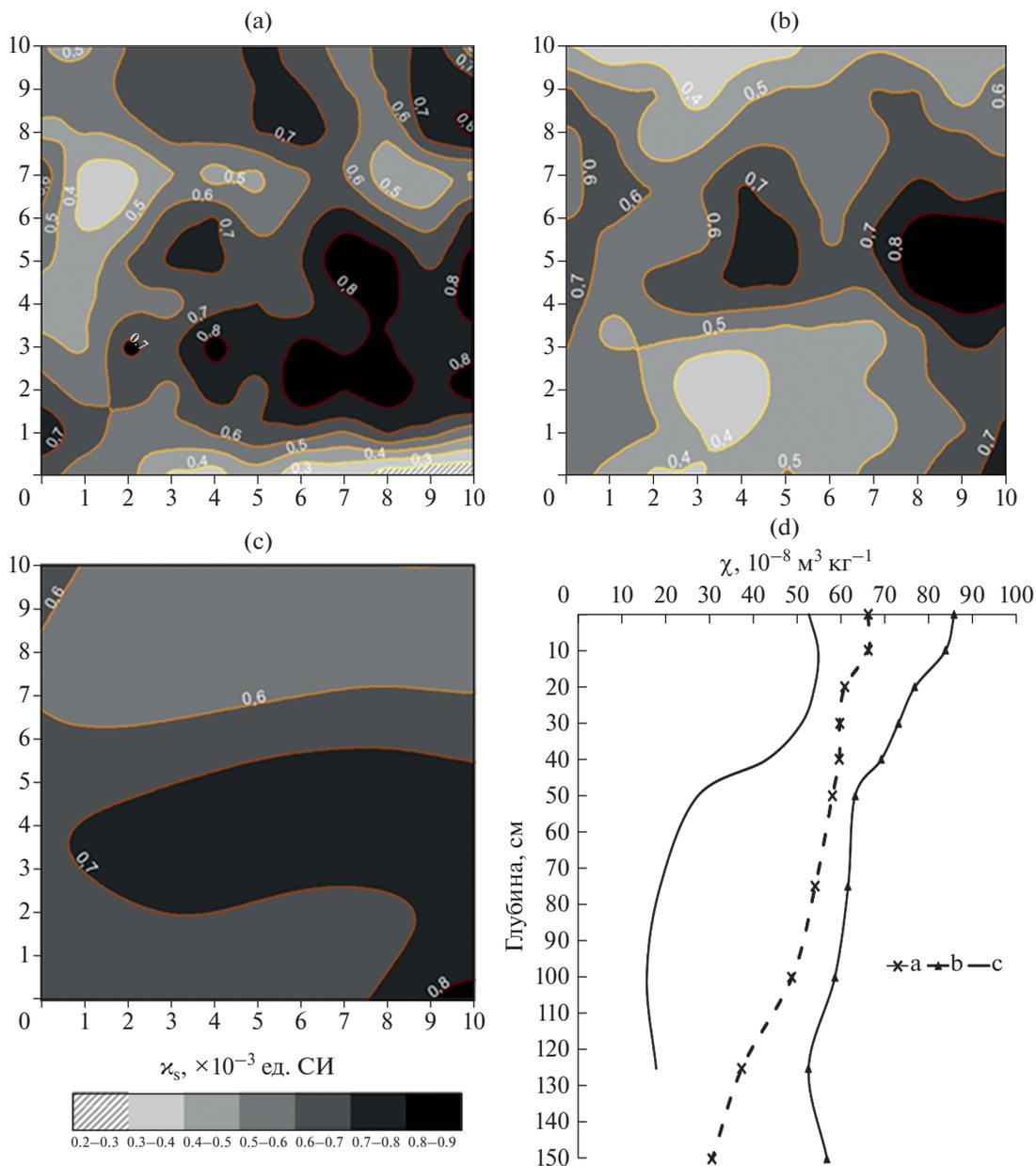


Рис. 3. Пространственные карты χ_s на площадках 10×10 м и профильное распределение χ в черноземе обыкновенном (а), черноземе южном (б) и светло-каштановой почве (с).

слое 0–30 см от 66 до 60×10^{-8} м³/кг. Полученные данные говорят, что, помимо перемешивания материала, в ходе распашки происходит изменение гидрологических, окислительно-восстановительных, кислотно-щелочных и биохимических условий среды. В результате меняется направленность процесса образования, накопления и превращения в почве оксидов железа [2, 35]. На исследуемой площадке с черноземом обыкновенным вариации χ_s определяются агрогенным воздействием, которое изменяет направленность и скорость оксидогенеза железа.

Профильное распределение магнитной восприимчивости показало, что для верхних слоев чернозема южного характерны наибольшие значения χ (с 85 до 76×10^{-8} м³/кг), которые снижаются к почвообразующей породе. На исследуемой площадке значения χ_s имеют наибольшую вариацию и находятся в диапазонах $0.3\text{--}0.4$, $0.6\text{--}0.7$, $0.7\text{--}0.8$, $0.8\text{--}0.9 \times 10^{-3}$ ед. СИ. Эти диапазоны составляют по 14% от всей площади. Значения χ_s в диапазонах $0.4\text{--}0.5$ и $0.5\text{--}0.6$ составляют 18 и 23% соответственно. Исследуемая площадка рас-

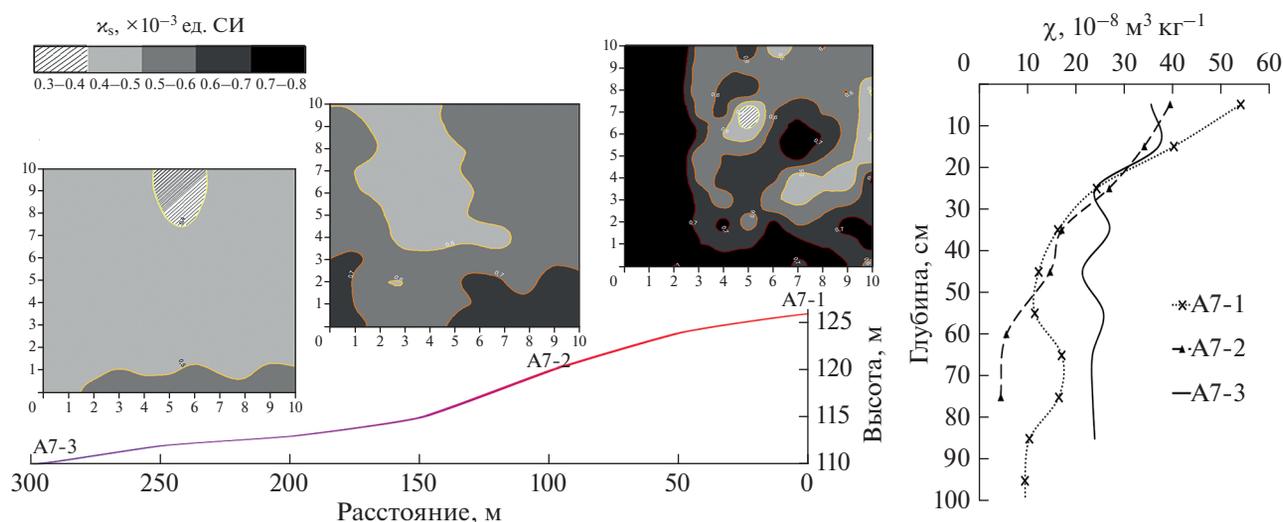


Рис. 4. Пространственные карты χ_s на площадках 10×10 м и профильные распределение χ для почв в них. Площадки расположены в пределах катены на различных типах ландшафта: А7-1 – элювиальный, А7-2 – трансэлювиальный, А7-3 – трансэлювиально-аккумулятивный.

полагалась на целинном участке с проективным покрытием около 90% с преобладанием лугово-злаковых ассоциаций. Подобное пространственное распределение магнитной восприимчивости на данной площадке, скорее всего, зависит от микрорельефа, который определяет биогеохимические особенности и видовую структуру растительности, что может приводить к различному содержанию железа в верхних горизонтах почв [26].

При анализе площадки со светло-каштановой почвой обнаружено, что χ_s в основном представлена диапазонами $0.5-0.6$, $0.6-0.7$, $0.7-0.8 \times 10^{-3}$ ед. СИ, которые составляют соответственно 39, 29, 20% от всей площади распределения. Профиль удельной магнитной восприимчивости светло-каштановой почвы носит аккумулятивный характер и имеет область увеличения χ в слое 10–20 см до 54×10^{-8} м³/кг, что может быть обусловлено элювиально-иллювиальным распределением илистой фракции в связи с солонцовым процессом [5]. Слабое варьирование χ_s на площадке со светло-каштановой почвой, может свидетельствовать о зависимости между минералогией оксидов железа с условиями почвообразования, в первую очередь с климатическими условиями, определяющими интенсивность процесса оксидогенеза железа, а также со степенью выраженности солонцового процесса.

Таким образом, изменения объемной магнитной восприимчивости по площади, в первую очередь связаны с условиями распределения, накопления, количеством и формами минералов железа, характерными для исследуемых типов почвы. Площадная магнитная восприимчивость может выявить пространственную почвенную неоднородность, которая на исследованных площадках вызвана биогеохимическими, геоморфологическими и антропогенными факторами.

родность, которая на исследованных площадках вызвана биогеохимическими, геоморфологическими и антропогенными факторами.

В ряде работ магнитная восприимчивость использовалась как показатель, отражающий особенности оксидогенеза железа, латеральной миграции вещества и геохимических процессов в пределах ландшафтной катены [2, 14, 22]. С целью дополнения полученных результатов провели исследование по изучению распределения объемной магнитной восприимчивости на трех площадках, расположенных на элювиальной, трансэлювиальной и трансэлювиально-аккумулятивной позиции склона.

Изменения χ_s на площадках и χ в профиле почвы на различных типах ландшафта представлены на рис. 4. По полученным данным можно сказать, что значения χ_s и χ верхнего слоя светло-каштановых почв снижаются от элювиальной к трансэлювиально-аккумулятивной позиции склона. Максимальные значения χ_s характерны для площадки А7-1, расположенной в верхней части склона, для нее характерен максимальный коэффициент вариации и преобладание значений в диапазоне $0.7-0.8 \times 10^{-3}$ ед. СИ в размере 43% от общей площади. В этом же диапазоне значения на площадках А7-2 и А7-3 составляют 17 и 2% соответственно. Показатель χ в слое 0–30 уменьшается от 39 до 31×10^{-8} м³/кг⁻¹ от элювиальной к трансэлювиально-аккумулятивной позиции склона.

Высокие значения χ_s и χ в почвах на элювиальной части склона могут свидетельствовать, что на данном типе ландшафта нет латерального сноса, соответственно в верхней части профиля накапливаются сильномагнитные минералы железа.

Для данной площадки характерна сильная вариация κ_s , что может быть связано с пестротой и неоднородностью почвенного покрова, определяемого микрорельефом [17]. В пределах 100 м² наблюдался комплекс из светло-каштановых, солонцов и лугово-каштановых почв. На трансэлювиальный и трансэлювиально-аккумулятивный позициях становится значимым влияние плоскостного смыва, который определяет латеральную миграцию вещества. В трансэлювиальной позиции начинается вынос пылеватой и илистой фракций из верхних слоев почв, что приводит к уменьшению восприимчивости. При этом в трансэлювиально-аккумулятивной зоне происходит накопление крупнопылеватых частиц, что определяет слабую вариацию и низкие значения магнитной восприимчивости. Таким образом, показатель магнитной восприимчивости отчетливо фиксирует неоднородность гранулометрического состава степных почв. Немаловажным фактором, влияющим на снижение магнитной восприимчивости от элювиальной к трансэлювиально-аккумулятивной позиции склона, является возрастание рН в сторону щелочных условий, увеличение количества карбонатов, снижение величины окислительно-восстановительного потенциала и изменение содержания органического вещества, что приводит к ослаблению процессов оксидогенеза железа в зависимости от положения почвенного профиля в рельефе. Ранее показано [1, 4, 5], что в зависимости от положения почвы в сопряженном геохимическом ландшафте складываются различные условия преобразования минерального вещества при почвообразовании, детально рассмотрены закономерности формирования состояния соединений железа в почвах, обусловленные этими факторами. Так, почвы элювиальных ландшафтов характеризуются повышенной степенью окисленности по сравнению с почвами подчиненных ландшафтов даже при большей степени увлажненности и биогенности. Это обусловлено значительным поступлением кислорода с атмосферными осадками и большей степенью дренированности элювиального ландшафта. Пойменные почвы занимают особую область в координатах Eh–рН. По сравнению с почвами автоморфного ряда для них характерно большее разнообразие окислительно-восстановительной обстановки, но значительно более узкий интервал рН [1, 4, 6, 14, 15].

Полученные данные показывают, что применение комплекса профильных и площадных измерений магнитной восприимчивости является чувствительным инструментом, который позволяет определить неоднородность почвенного покрова, вызванную естественными и антропогенными факторами.

Широкое использование магнитной восприимчивости в изучении загрязненных почв тяжелыми металлами, при исследовании памятников археологии, мониторинговой оценке влияния климатических изменений на почвы [2, 10, 11, 27, 28] и полученные результаты показали, что площадные исследования позволяют существенно расширить информативность исследований магнитных свойств почв. Учитывая одновременно измеряемые параметры почв прибором КТ-20, возможно проведение комплексных исследований по изучению почвенного покрова, позволяющих получать дополнительно информацию о водном и солевом режиме по данным удельной электропроводимости почв. Эти измерения были получены на всех исследованных площадках, но в настоящей статье не обсуждались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построение карт пространственного распределения κ_s дает визуальное представление о неоднородности почвенных свойств степей в слое 0–30 см. В связи с этим рекомендуем опираться на карты площадного распределения магнитной восприимчивости при планировании точек для отбора проб при профильных магнитометрических исследованиях почв.

Площадная магнитная восприимчивость может выявить пространственную почвенную неоднородность, которая на исследованных площадках вызвана геоморфологическими, биогеохимическими и антропогенными факторами. Вариация κ_s на площадках с различными типами почв (чернозем обыкновенный, чернозем южный, светло-каштановая) в основном связана с неоднородностью распределения, накопления, количеством и формами минералов железа. Изменения κ_s на площадках в различных позициях склона происходят под влиянием плоскостного смыва и ослабления процессов оксидогенеза железа в зависимости от положения почвенного профиля в рельефе.

Комплекс измерений площадной и профильной магнитной восприимчивости может быть использован для исследования почвенных неоднородностей, вызванных антропогенными и естественными факторами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Выражаем огромную благодарность участникам полевых работ П.И. Калинину, А.Ю. Овчинникову, М.В. Ельцову.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-29-05178 МК.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Моргун Е.Г., Самойлова Е.М.* Геохимические закономерности формирования состояния соединений железа в почвах сопряженных ландшафтов Центрального Предкавказья // Литология и полезные ископаемые. 1996. № 1. С. 12–22.
2. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В.* Оксидогенез железа в почвах степной зоны. М.: ГЕОС, 2012. 204 с.
3. *Алексеев А.О., Алексеева Т.В., Махер Б.А.* Магнитные свойства и минералогия соединений железа в степных почвах // Почвоведение. 2003. № 1. С. 62–74.
4. *Алексеев А.О., Ковалевская И.С., Моргун Е.Г., Самойлова Е.М.* Магнитная восприимчивость почв сопряженных ландшафтов // Почвоведение. 1988. № 8. С. 27–35.
5. *Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Демкин В.А., Алексеева В.А., Соколовская З., Хайнос М., Калинин П.И.* Физико-химические и минералогические диагностические признаки солонцового процесса в почвах Нижнего Поволжья в позднем голоцене // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1171–1189.
6. *Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Ковалевская И.С., Осина Г.Н., Моргун Е.Г.* Минералогический состав илистой фракции почв сопряженных ландшафтов Ставропольской возвышенности // Почвоведение. 1988. № 9. С. 113–124.
7. *Бабанин В.Ф., Трухин В.И., Карпачевский Л.О., Иванов А.В., Морозов В.В.* Магнетизм почв. Ярославль–М.: Изд-во ЯГТУ, 1995. 219 с.
8. *Вадюнина А.Ф., Смирнов Ю.А.* Использование магнитной восприимчивости для изучения почв и их картирования // Почвоведение. 1978. № 7. С. 87–96.
9. *Водяницкий Ю.Н.* Опыт составления картограммы магнитной восприимчивости дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 1979. № 11. С. 83–87.
10. *Водяницкий Ю.Н., Шоба С.А.* Магнитная восприимчивость как индикатор загрязнения тяжелыми металлами городских почв (обзор литературы) // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2015. № 1. С. 13–20.
11. *Демкин В.А., Рысков Я.Г., Алексеев А.О., Олейник С.А., Губин С.В., Лукашов А.В., Кригер В.А.* Палеопедологическое изучение археологических памятников степной зоны // Известия АН СССР. Сер. географическая. 1989. № 6. С. 40–51.
12. *Золотая Л.А., Коснырева М.В.* Возможности магнитных измерений при решении задач почвенной геофизики // Геофизика. 2014. № 4. С. 63–68.
13. *Иванов А.В.* Магнитное и валентное состояние железа в твердой фазе почв. Автореф. дис. ... д. б. н. М., 2003. 41 с.
14. *Калинин П.И., Кудреватых И.Ю., Ваганов И.М., Борисов А.В., Алексеев А.О.* Биогеохимические процессы в степных ландшафтах Ергенинской возвышенности в голоцене // Почвоведение. 2018. № 5. С. 526–537.
15. *Рысков Я.Г., Алексеева Т.В., Алексеев А.О., Ковалевская И.С., Олейник С.А., Моргун Е.Г., Самойлова Е.М.* Геохимические обстановки в почвах сопряженных ландшафтов Центрального Предкавказья // Литология и полезные ископаемые. 1993. № 2. С. 55–65.
16. *Сидорова В.А., Красильников П.В.* Почвенно-географическая интерпретация пространственной вариативности химических и физических свойств поверхностных горизонтов почв степной зоны // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1168–1178.
17. *Хитров Н.Б.* Связь почв солонцового комплекса Северного Прикаспия с микрорельефом // Почвоведение. 2005. № 3. С. 271–284.
18. *Чухров Ф.В., Ермилова Л.П., Горшков А.И.* Гипергенные окислы железа в геологических процессах. М.: Наука, 1975. 207 с.
19. *Alekseeva T., Alekseev A., Maher B., Demkin V.* Late Holocene climate reconstructions for the Russian steppe, based on mineralogical and magnetic properties of buried palaeosols // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2007. V. 249. P. 103–127. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.01.006>
20. *Blundell A., Dearing J.A., Boyle J.F., Hannam J.A.* Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales // Earth-Sci. Rev. 2009. V. 95. P. 158–188. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.05.001>
21. *Cervi E.C., Maher B., Polisei P.C., de Souza Junior I.G., da Costa A.C.S.* Magnetic susceptibility as a pedogenic proxy for grouping of geochemical transects in landscapes // J. Appl. Geophys. 2019. V. 169. P. 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.017>
22. *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. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00080-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00080-1)
23. *Hartemink A.E., Minasny B.* Towards digital soil morphometrics // Geoderma. 2014. V. 230. P. 305–317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>
24. *Howard J.L., Orlicki K.M., LeTarte S.M.* Evaluation of some proximal sensing methods for mapping soils in urbanized terrain, Detroit, Michigan, USA // Catena. 2016. V. 143. P. 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.011>
25. *Kruglov O., Menshov O.* Mapping of the soil magnetic susceptibility for the erosion processes modeling // Eur. Association Geoscientists Engineers. 2019. V. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903250>
26. *Kudrevatykh I., Kalinin P., Mitenko G., Alekseev A.* (2021). The role of plant in the formation of the topsoil chemical composition in different climatic conditions of steppe landscape // Plant and Soil. 2021. V. 465(1–2). P. 453–472. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05019-3>
27. *Magiera T., Strzyszczyk Z., Kapicka A., Petrowsky E.* Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe // Geoderma. 2006. V. 130. P. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.002>
28. *Magiera T., Strzyszczyk Z., Rachwał M.* Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia Industrial Region, Poland // For-

- est Ecology Management. 2007. V. 248. P. 36–42.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.034>
29. *Martin A.P., Ohneiser C., Turnbull R.E., Strong D.T., Demler S.* Soil magnetic susceptibility mapping as a pollution and provenance tool: an example from southern New Zealand // *Geophys. J. Int.* 2018. V. 212(2). P. 1225–1236.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggx484>
 30. *Obade V. de P., Lal R.* Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS) // *Catena.* 2013. V. 104. P. 77–92.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.014>
 31. *Oliver M.A., Webster R.A.* Tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging // *Catena.* 2014. V. 113. P. 56–69.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
 32. *Pringle J.K., Giubertoni M., Cassidy N.J., Wisniewski K.D., Hansen J.D., Linford N.T., Daniels R.M.* The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool // *Forensic Sci. Int.* 2015. V. 246. P. 31–42.
<https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.10.046>
 33. *Ramos P.V., Inda A.V., Barrón V., Teixeira D.D.B., Marques J., Jr.* Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in southern Brazil // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2021. V. 85. P. 102–116.
<https://doi.org/10.1002/saj2.20164>
 34. *Reynolds J.M.* An Introduction to applied and environmental geophysics. N.Y.: Wiley, 2011. 711 p.
 35. *Schwertmann U., Taylor R. M.* Iron oxides. Minerals in soil environments. 1989. V. 1. P. 379–438.
<https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c8>
 36. *Siqueira D.S., Marques Jr.J., Matias S.S.R., Barrón V., Torrent J., Baffa O., Oliveira L.D.* Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements // *Soil Use and Management.* 2010. V. 26. P. 425–431.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>
 37. *Zawadzki J., Fabijańczyk P., Magiera T., Rachwał M.* Geostatistical microscale study of magnetic susceptibility in soil profile and magnetic indicators of potential soil pollution // *Water, Air, Soil Poll.* 2015. V. 226. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1007/s11270-015-2395-5>

Comparison of Areal and Profile Distribution of Magnetic Susceptibility in Steppe Soils of the Russian Plain

V. V. Malyshev¹, * and A. O. Alekseev¹

¹*Institute of Physical, Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

**e-mail: vladmalysheff@yandex.ru*

A comparative analysis of areal and profile measurements of magnetic susceptibility was carried out in order to improve methods of surface sensing of the earth, as well as to take into account small-scale mapping of soils and the identification of anomalies associated with anthropogenic pollution or violation of the surface layer of soils. Two sites with Haplic Chernozems and one Haplic Kastanozems (Endosalic, Cambic) were studied. Additionally, a catena was studied on the territory of the Ergensinsky upland with the inclusion of sites in various positions of the landscape (eluvial, transeluvial, transeluvial-accumulative). The comparison of the areal and profile magnetic susceptibility measured to a depth of 30 cm showed a direct correlation ($R^2 = 0.7$). It was found that the areal type of survey correctly captures the volumetric magnetic susceptibility (χ_s) to a depth of 30 cm. The variation of χ_s at sites with different types of soils reflects soil-climatic zonality and spatial lithological heterogeneity, expressed in different granulometric and mineralogical composition of the 0–30 cm layer on an area of 10×10 m. The areal magnetic susceptibility of soils can be an important additional indicator capable of reflecting the features of soil-forming, lithological and landscape geochemical processes occurring in the upper soil layer. Variation of χ_s at sites in different positions of the landscape occurs under the influence of planar flushing and a change in the direction of iron oxidogenesis processes depending on the position of the soil profile in the relief. The complex of measurements of areal and profile magnetic susceptibility can be used to study soil inhomogeneities caused by anthropogenic, paleocryogenic, geomorphological and lithogenic factors. Such an approach can be widely applied to the study of polluted soils and monitoring of agricultural land.

Keywords: Chernozems, Kastanozems, iron compounds, soil magnetism, spatial heterogeneity