Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 5. С. 89–103

УДК 631.4

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ И ВАРЬИРОВАНИЕ СВОЙСТВ АГРОЧЕРНОЗЕМОВ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

М.А. Смирнова[1], А.Н. Геннадиев[2], Ю.Г. Чендев[3], М.В. Бочарников[4]

[1, 2, 4] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*
[3] *Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Институт наук о Земле, кафедра природопользования и земельного кадастра*

[1] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, доц., канд. геогр. наук; e-mail: summerija@yandex.ru*
[2] *Кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, проф., д-р геогр. наук; e-mail: alexagenna@mail.ru*
[3] *Зав. кафедрой, д-р геогр. наук; e-mail: chendev@bsu.edu.ru*
[4] *Кафедра биогеорафии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru*

Поиск связей между различными почвенными свойствами и оценка уровня их варьирования имеет важное фундаментальное значение для понимания сущности функционирования почв, а с практической точки зрения позволяет оптимизировать планирование полевых и лабораторных исследований, создает основу для проектирования систем дифференцированного внесения удобрений и точного земледелия. Работа основана на данных о содержании органического углерода, актуальной кислотности, плотности почв, содержания гранулометрических фракций, обменного кальция, магния и углекислоты карбонатов. В качестве объектов исследования выбраны 12 пахотных черноземов на юге Среднерусской возвышенности (Белгородская обл.). Образцы почв отбирались послойно, каждые 20 см до глубины 3 м. Для пахотных черноземов выявлена слабая степень скоррелированности исследованных свойств между собой. Наименее скоррелированными с другими почвенными свойствами являются плотность почвы, содержание органического углерода, содержание гранулометрических фракций 0,25–0,05 мм, 0,01–0,005 мм. Корреляция между содержанием углекислоты карбонатов и pH наблюдается только для аккумулятивно-карбонатного и переходного к нему горизонтов. Наибольшим числом корреляций между различными почвенными свойствами характеризуется подпахотная часть гумусового горизонта и верхняя часть переходного к аккумулятивно-карбонатному горизонту. Наименьшее количество корреляций между почвенными свойствами отмечено для глубин 80–100 см. Сравнение коэффициентов вариации одних и тех же свойств, но рассчитанных для одного и того же разреза (т. е. вариация внутри профиля) и для одних и тех же глубин, но из разных разрезов (т. е. латеральная вариация), показало, что большая внутрипрофильная вариация, чем латеральная, наблюдается для содержания органического углерода, кальция и магния.

Ключевые слова: педометрика, органическое вещество почв, агрохимические свойства, Белгородская область

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.5.9

ВВЕДЕНИЕ

Почва является сложной многокомпонентной системой, обладающей целым рядом свойств, необходимых для нормального функционирования природной среды, и обеспечивающих благосостояние человечества [Amundson et al., 2015; Добровольский, Никитин, 1990]. Иногда почва воспринимается, особенно не специалистами, как некое статичное, «неповоротливое» во времени и пространстве тело. Между тем все больше специальных почвенных исследований нацеливается на познание почвы как динамичной системы с не детерминированным поведением, когда, последующее пространственное и временное состояние такой системы описывается как величинами, которые могут быть предсказаны, так и случайными [Красильников, Таргульян, 2019]. Такой взгляд на почву должен стать достоянием географической науки.

Пространственная изменчивость почв является их неотъемлемым качеством и важной сущностной характеристикой. При этом выделяются различные масштабы такой изменчивости: мега-, макро-, микроструктуры почвенного покрова и «вложенные» в микроструктуры ненаправленные коротко-периодичные варьирования почвенных свойств [Княжнева и др., 2006; Сидорова, Красильников, 2007]. Проблема заключается в том, что последние в настоящий момент изучены недостаточно, хотя познание их природы и форм важно как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Поиск связей между различными почвенными свойствами и оценка уровня их варьирования имеют важное фундаментальное значение для понимания сущности функционирования почв и динамичности их связи с факторами почвообразования. Можно также отметить, что в условиях широкого развития методов дистанционного исследования почв и картографирования содержания органического углерода в почвах по данным их отражательной способности [Ladoni et al., 2010; Чинилин, Савин, 2018], обоснование и количественная характеристика связей между содержанием органического углерода и различными почвенными свойствами раскрывает возможности оперативного создания целого ряда карт. С практической точки зрения анализ особенностей варьирования свойств почв в пространстве позволяет оптимизировать планирование полевых и лабораторных исследований, создает основу для точного земледелия, проектирования систем дифференцированного внесения удобрений и др. Решение таких прикладных задач, как повышение плодородия почв, оценка опасности накопления в них загрязняющих веществ, способности почвенного покрова к самоочищению, становится более эффективным и быстрым, когда выявляются корреляционные связи и уровни варьирования контролирующих почвенных свойств – содержания органического углерода, физической глины и ила, плотности почв, ее актуальной кислотности и др. [Геннадиев, Пиковский, 2007; Bünemann et al., 2018]. Перечисленные свойства в той или иной степени взаимосвязаны друг с другом [Безуглова, Юдина, 2006; Murphy, 2015; Rasmussen et al., 2018; Fukumasu et al., 2022]. Так, показано, что содержание органического углерода в почвах обладает высокой степенью связанности с содержанием илистой фракции и физической глины для целого ряда почв [Безуглова, Юдина, 2006; Murphy, 2015; Schimel et al., 1994; Wagner et al., 2007]. В работе [Rasmussen et al., 2018] говорится о связи между актуальной кислотностью и органическим углеродом, содержанием углекислоты карбонатов. Содержание различных гранулометрических фракций зачастую обладает высокой степенью корреляции друг с другом [Шеин, 2009; Zhang et al., 2022].

Вместе с тем большая многофакторность изменчивости свойств почв во времени и пространстве, различия в характерном времени установления климаксного состояния для разных почвенных свойств, региональная специфичность сочетания условий почвообразования значительно усложняют поиск взаимосвязи между почвенными свойствами [Княжева и др., 2006; Сидорова, Красильников, 2007; Красильников, Таргульян, 2019].

Цель данного исследования – выявление, анализ и интерпретация корреляционных связей между базовыми почвенными свойствами: содержанием органического углерода, актуальной кислотностью, плотностью почвы, содержанием гранулометрических фракций (1–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,01–0,005; 0,005–0,001; <0,001 и <0,01 мм), обменного кальция, магния и углекислоты карбонатов, а также оценка их латерального и вертикального варьирования. В качестве объектов исследования выбраны пахотные черноземы юга Среднерусской возвышенности (Белгородская обл.). Образцы почв отбирались послойно, каждые 20 см до глубины 3 м. Особенность данного исследования заключается в поиске корреляционных связей не только для поверхностных, но и для более глубоких горизонтов почв. На двух ключевых участках было заложено по шесть почвенных разрезов на пашнях. Наша гипотеза состоит в том, что корреляционные связи между одними и теми же свойствами, но выявляемые для разных глубин, могут быть разной степени выраженности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевые исследования проведены в Белгородской области на участках «Бондарев» (Красноярский р-н) и «Приветный» (Вейделевский р-н), расположенных в пределах наиболее влажной («Бондарев», гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) равен 1,24) и наиболее сухой («Приветный», ГТК = 1,02) лесостепи юга Среднерусской возвышенности (рис. 1). Расстояние между участками составляет около 250 км.

Каждый из участков заложен на ровной водораздельной поверхности, включает пашню и, в центральной части участка, лесополосу. На полях в условиях неорошаемого земледелия проводится традиционное выращивание зерновых сельскохозяйственных культур, на обоих участках используется сходная система обработки почвы. Древесный состав лесополос участков одинаков – преобладает ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), встречаются вяз малый (*Ulmus minor*) и клен ясенелистный (*Acer negundo*), возраст деревьев составляет 60–65 лет. Ширина лесополосы на участке «Бондарев» равна 40 м, состоит из 12 сдвоенных рядов деревьев; на участке «Приветный» – 30 м, представлена семью рядами деревьев. Грунтовые воды в обоих случаях залегают на глубинах более 6 м. Почвообразующие породы представлены карбонатными лессовидными тяжелыми суглинками на участке «Бондарев» и карбонатными лессовидными легкими глинами на участке «Приветный».

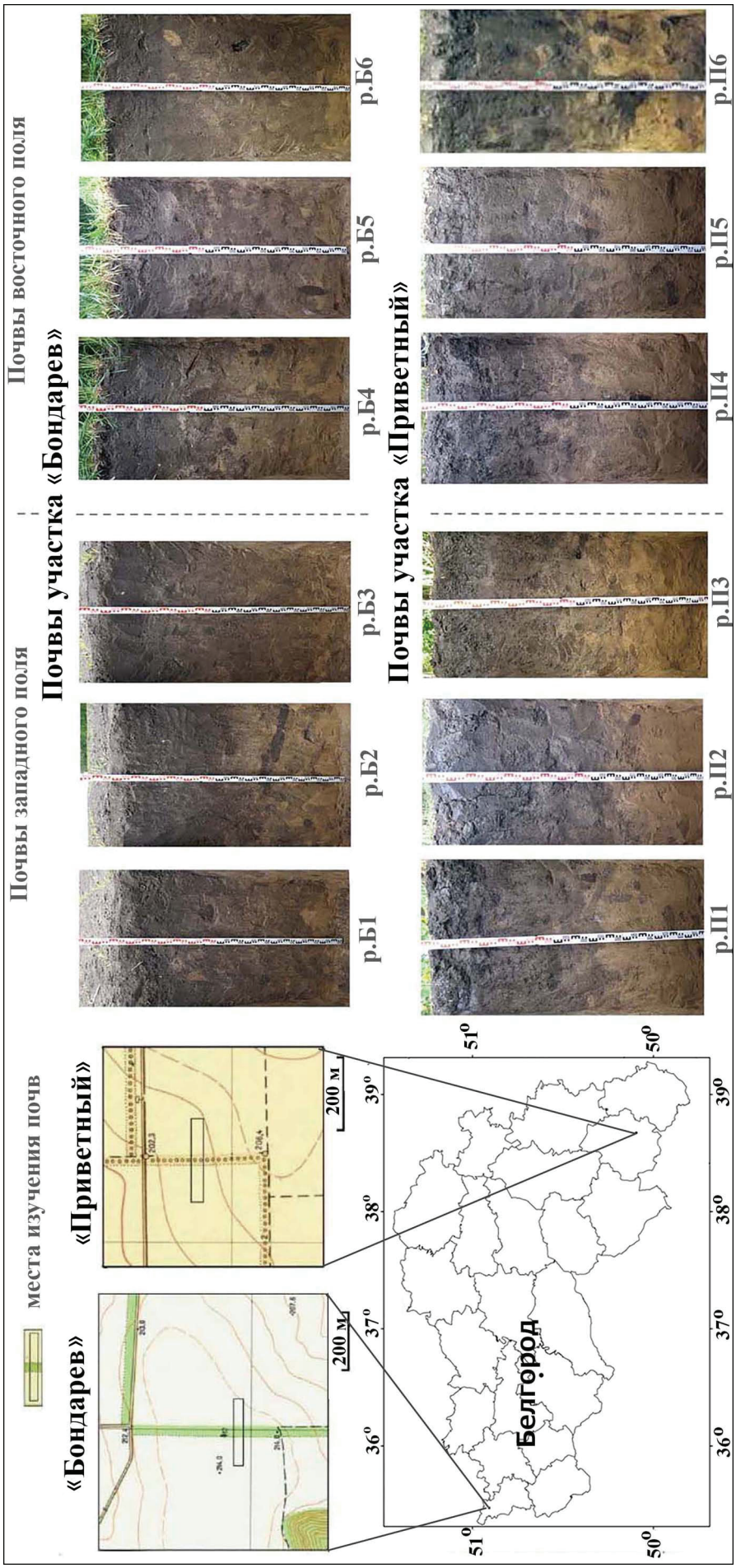


Рис. 1. Расположение участков «Бондарев», «Приветный» и профили исследованных почв

Fig. 1. Location of the "Bondarev" and "Privetny" sites and photographs of the soils studied

Полевое опробование почв проведено на пашне, расположенной к западу и востоку от лесополосы на удалении 10 м (разрезы 3 (к западу от лесополосы) и 4 (к востоку от лесополосы)), 30 м (разрезы 2 и 5) и 60 м (разрезы 1 и 6) от ее краев. Почвы участков «Бондарев» и «Приветный» (см. рис. 1) представлены черноземами пахотными типичными среднемощными. Средняя мощность гумусового горизонта черноземов участка «Бондарев» составляет 68 см при коэффициенте вариации 36,6%, для черноземов участка «Приветный» – 70,7 см при коэффициенте вариации 24,8%. Глубина обнаружения вторичных карбонатов – 56 см на участке «Бондарев» (коэффициент вариации 18,2%), 49 см на участке «Приветный» (коэффициент вариации 16,6%). Особенностью почв является их сильная перерытость почвенными животными (слепышами), диагностируемая по большому количеству кротовин в профиле как прямых, так и обратных. Максимальное количество кротовин приурочено к глубинам 80–140 см на участке «Бондарев» и 60–120 см на участке «Приветный».

В сертифицированной лаборатории ФГБУ ЦАС «Белгородский» были выполнены следующие виды анализов: определение содержания органического углерода почв по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), определение значений актуальной кислотности потенциометрическим методом (ГОСТ 26423-85), гранулометрического состава методом пипетки с предварительной диспергацией пробы пирофосфатом натрия (ГОСТ 12536-2014); количество эквивалентов кальция (в ммоль/100 г) определялось согласно ГОСТ 26487-85, эквивалентов магния – согласно ГОСТ 26487-85. Углерод карбонатов определялся хроматографически через час после начала реакции почвенной навески с 10% раствором HCl, прилитой в избытке в сосуды, плотно закрытые резиновыми пробками. Плотность почвы, количество эквивалентов кальция и магния были определены для образцов, отобранных каждые 20 см с глубин 0–200 см, гранулометрический состав – с глубин 0–220 см, содержание органического углерода, pH и углекислоты карбонатов – для образцов с глубин 0–300 см. Таким образом, в основу расчетов для каждого участка положены данные о содержании органического углерода, pH почв и углекислоты карбонатов для 90 образцов (т. е. всего проанализировано 180 образцов на двух участках), количества эквивалентов кальция, магния, плотности – для 60 образцов, содержания различных гранулометрических фракций – для 66 образцов.

Статистическая обработка данных проведена с использованием программы Statistica. Проверены гипотезы о нормальности распределения данных по свойствам почв (на основании критериев Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова), выполнен корреляционный анализ (p = 0,01) между различными свойствами почв, определенных для образцов, отобранных с глубин 0–200 см. Для оценки значимости различий средних использовался критерий Краскела–Уоллиса. Методом главных компонент определено положение исследованных почв участков в многомерном пространстве почвенных свойств (каждый разрез охарактеризован 69 показателями – данными о содержании различных гранулометрических фракций, органического углерода, pH и др. для разных глубин). Проведены расчеты значений таксономических расстояний между исследованными почвами на основании их физических, химических и физико-химических свойств с предварительно выполненным их линейным нормированием (от 0 до 1), согласно стандартной методике [Minasny et al., 2009].

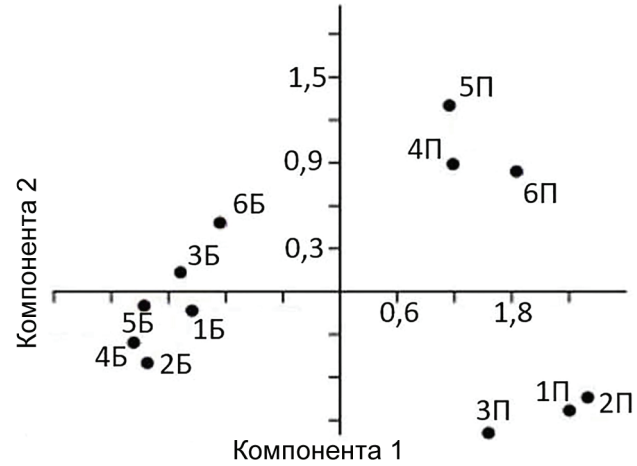
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ сравнения средних, главных компонент и таксономических расстояний между почвами ключевых участков «Бондарев» и «Приветный». Проверка частот распределения значений почвенных свойств на нормальность показывает, что нормальному закону подчиняются только данные о содержании крупной, мелкой пыли, илистой фракции, физической глины для почв участка «Приветный», содержания средней и мелкой пыли, кальция в почвах участка «Бондарев». Поэтому для оценки достоверности различия свойств почв исследованных участков использовался критерий Краскела–Уоллиса.

Согласно результатам анализа сравнения средних, почвы участков «Бондарев» и «Приветный» достоверно отличаются друг от друга по всем свойствам, за исключением щелочно-кислотных характеристик, содержания крупного песка и средней пыли – несмотря на близость морфологического строения почв участков и их одинаковое таксономическое положение. Следовательно, оценка вариабельности свойств почв, выявление особенностей корреляции различных почвенных свойств между собой должно быть основано на расчетах по каждому отдельному участку, без объединения данных в одну выборку (объединение в одну выборку возможно только для значений pH, содержания крупного песка и средней пыли). Положение почв ключевых участков в пространстве главных компонент (рис. 2) также свидетельствует о необходимости проведения анализа для разных групп отдельно.

Почвы участков «Бондарев» и «Приветный» расположены по разные стороны от оси ординат в пространстве главных компонент; первая ось объясняет 62,3% дисперсии, вторая – 9,3%. Наибольшие

коэффициенты корреляции ($p = 0{,}01$) с первой осью имеют значения содержания физической глины и илистой фракции. Значимая корреляция ($p = 0{,}01$) отмечена для всех глубин, значения коэффициентов варьируют от 0,89 до 0,96%. Со второй осью значимая корреляция ($p = 0{,}01$) наблюдается с содержанием органического углерода в почвах на глубинах 60, 80 и 160 см, значениях pH на глубине 120 см и физической глины на глубине 160 см. Таким образом, основные отличия между почвами участков заключаются в гранулометрическом составе почв. Почвы участка «Приветный» расположены на большем удалении друг от друга в пространстве главных компонент, следовательно, они более контрастны.



	1Б	2Б	3Б	4Б	5Б	6Б	1П	2П	3П	4П	5П	6П
1Б		2,27	1,54	2,08	1,99	1,95	4,42	4,57	3,87	3,48	3,76	3,92
2Б	2,27		2,30	1,30	1,49	2,41	4,78	5,01	4,05	4,01	3,81	4,41
3Б	1,54	2,30		1,91	1,69	1,65	4,48	4,59	4,05	3,50	3,63	4,02
4Б	2,08	1,30	1,91		1,62	2,06	4,81	5,02	4,26	3,98	3,86	4,56
5Б	1,99	1,49	1,69	1,62		2,00	4,82	5,04	4,01	3,81	3,82	4,24
6Б	1,95	2,41	1,65	2,06	2,00		4,19	4,32	3,86	3,23	3,26	3,58
1П	4,42	4,78	4,48	4,81	4,82	4,19		1,96	2,60	2,86	2,97	2,65
2П	4,57	5,01	4,59	5,02	5,04	4,32	1,96		2,81	3,08	3,09	2,62
3П	3,87	4,05	4,05	4,26	4,01	3,86	2,60	2,81		2,67	3,07	2,53
4П	3,48	4,01	3,50	3,98	3,81	3,23	2,86	3,08	2,67		2,27	2,43
5П	3,76	3,81	3,63	3,86	3,82	3,26	2,97	3,09	3,07	2,27		2,15
6П	3,92	4,41	4,02	4,56	4,24	3,58	2,65	2,62	2,53	2,43	2,15	

Рис. 2. Положение исследованных почв в пространстве первых двух главных компонент и таблица таксономических расстояний между почвами (номера разрезов с литерой Б соответствуют почвам участка «Бондарев», П – участка «Приветный»)

Fig. 2. Location of the studied soils within the first two principal components and a table of taxonomic distances between soils (Б – lettered soil pits correspond to the soils of the “Bondarev” site, П – lettered – of the “Privetny” site)

Построение таблицы таксономических расстояний между почвами подтверждает большую контрастность почв участка «Приветный» по отношению друг к другу, чем участка «Бондарев» (см. рис. 2). Средние значения таксономических расстояний для последних составляют – 1,9, для почв участка «Приветный» – 2,7. Анализ таблицы таксономических расстояний показывает, что значения между парами почв, как правило, обусловлены пространственной близостью положения почв относительно друг друга: чем ближе друг к другу расположены почвенные разрезы, тем меньше значение таксономического расстояния между ними.

Вертикальное варьирование почвенных свойств. Для оценки особенностей вертикального варьирования почвенных свойств были построены графики (рис. 3), отражающие минимальные, максимальные и медианные значения содержания компонентов.

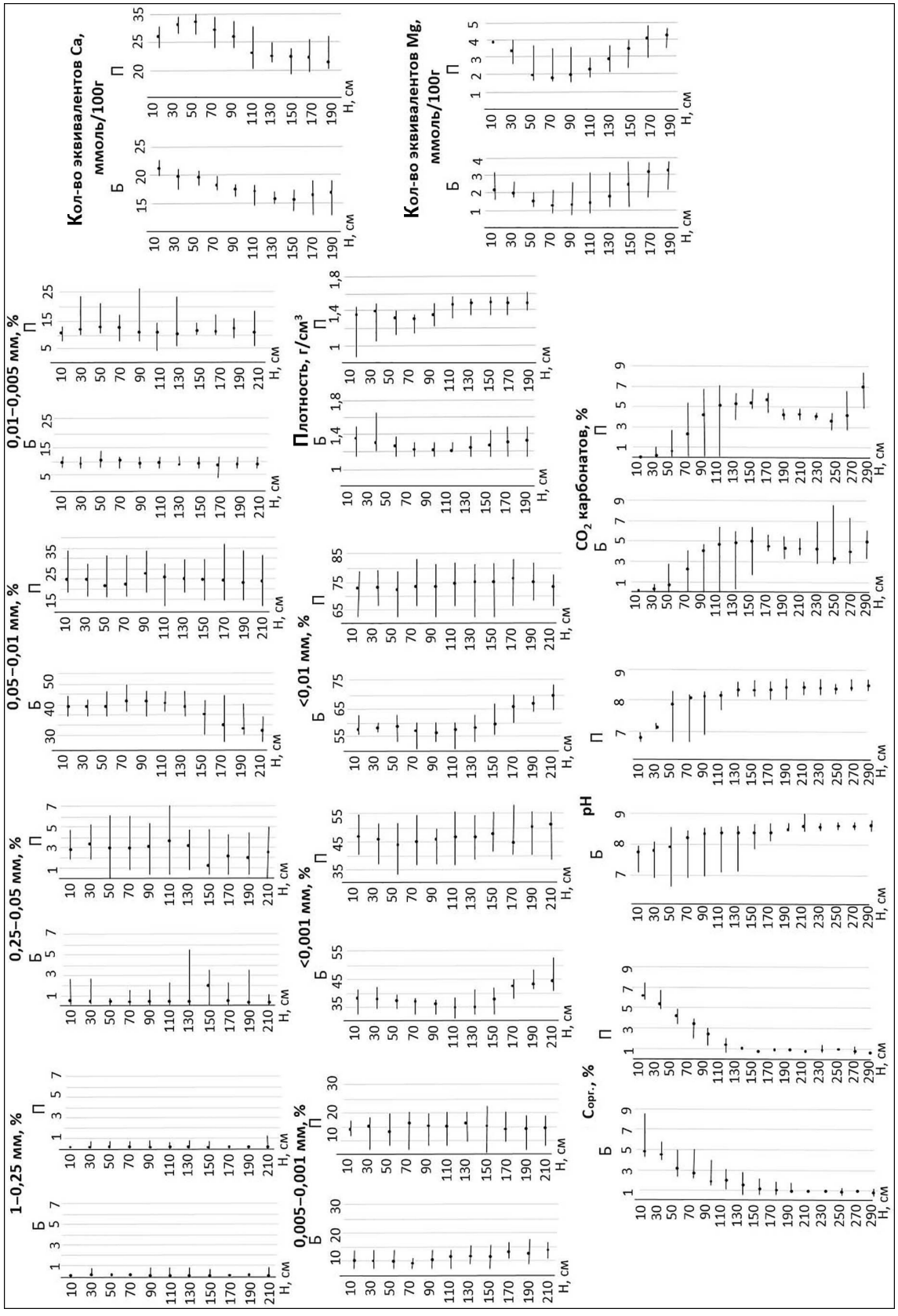


Рис. 3. Особенности вертикального варьирования свойств почв на участках «Бондарев» (Б) и «Приветный» (П). Точки на графиках соответствуют медианному значению, линии – разбросу значений (от минимального к максимальному) на данной глубине. Для каждого графика использовалась информация по всем разрезам соответствующего участка

Fig. 3. Vertical variation of soil properties within the Bondarev (B) and Privetny (P) sites. Points on the graphs correspond to the median values, the lines correspond to the range of values (from minimum to maximum) at a given depth. For each graph, information for all soil pits of the corresponding site was used

Анализ графиков позволяет, во-первых, выделить несколько типов распределения профильного варьирования свойств, во-вторых, проследить насколько одинаково происходит изменение свойств с глубиной на разных участках.

Содержание различных гранулометрических фракций в почвах слабо дифференцировано по глубине на участке «Приветный». Наблюдается увеличение содержания илистой фракции и физической глины в почвах участка «Бондарев» на глубине более 150 см, по-видимому, за счет неоднородности почвообразующих пород. Разброс значений содержания различных гранулометрических фракций выше на участке «Приветный», чем на участке «Бондарев», что и обусловливает большие значения таксономических расстояний для этих почв, их менее компактное расположение в пространстве главных компонент в сравнении с почвами участка «Бондарев». В обоих случаях при низком содержании песчаной фракции наблюдается максимальное варьирование ее содержания в пределах почв.

Как на участке «Бондарев», так и на участке «Приветный», наименьшие медианные значения плотности приходятся на среднюю часть профиля – приблизительно с 50 до 100 см, на которую не оказывает воздействие сельскохозяйственная техника (в отличие от верхнего горизонта 0–50 см) и где содержание карбонатов довольно низкое; повышенные значения плотности в нижней части почвенного профиля могут быть обусловлены более высоким содержанием здесь тонких почвенных фракций и наличием карбонатов, заполняющих поры [Alexander, 1980].

Характер изменения химических и физико-химических свойств почв с глубиной для участков «Бондарев» и «Приветный» сходен (см. рис. 3). Особенностью вертикального варьирования содержания органического углерода является сочетание высоких медианных значений с большим разбросом значений – тенденция отмечается в верхней части профиля; и, наоборот, малым разбросом значений при низком содержании органического углерода – в нижней части профиля. При этом наибольшие коэффициенты вариабельности (более 20%) приходятся на глубины 80–120 см на участке «Приветный» и 120–160 см на участке «Бондарев»; эти глубины соответствуют максимальному скоплению в профиле кротовин. Вероятно, зоогенный фактор способствует увеличению неоднородности свойств почв [Wilkinson et al., 2009].

При очень небольшом варьировании значений pH (коэффициент вариации меньше 5,5%) для них наблюдается обратная, чем для органического углерода, картина – чем выше значения pH, тем меньше разброс значений (характерно для нижней части профиля почв), и наоборот. Для содержания углекислоты карбонатов минимальный разброс значений наблюдается для глубин 160–220 см; таким образом глубины, на которых наблюдается минимальный разброс значений pH и карбонатов, совпадают. Количество эквивалентов кальция и магния в верхней части профиля (до 50 см) характеризуется меньшим разбросом значений, чем на больших глубинах; для магния характерна большая вариабельность, чем для кальция. Согласно коэффициентам вариации, рассчитанным для каждого почвенного свойства в выборках, соответствующих почвам ключевых участков, выделяется следующий ряд свойств (от наименьших коэффициентов к наибольшим): pH – содержание илистой фракции – кальция – физической глины – фракции 0,05–0,01 мм (для участка «Бондарев») и магния (для участка «Приветный») – углерода – содержания пылеватых фракций (за исключением фракции 0,05–0,01 мм участка «Бондарев»), магния (участок «Бондарев») – и песка (1–0,05 мм).

В таблицах 1 и 2 приведены значения коэффициентов вариации почвенных свойств, рассчитанные для каждого исследуемого разреза по отдельности. Несмотря на очень низкие содержания фракции 1,0–0,25 мм в почвах, коэффициенты вариации этого свойства достаточно высоки; и наоборот, при высоком разбросе значений илистой фракции и высоких абсолютных значениях их содержания коэффициенты вариации наименьшие. Наиболее стабильными в пределах почв являются значения плотности, pH, содержание физической глины и илистой фракции. Ожидаемо наиболее высокая вариация в пределах профиля наблюдается для содержания органического углерода и углекислоты карбонатов. Данные тенденции характерны для обоих участков.

Сравнение коэффициентов вариации одних и тех же свойств, но рассчитанных для одного и того же разреза (т. е. вариация внутри профиля) и для одних и тех же глубин, но из разных разрезов (т. е. латеральная вариация), показало, что большая внутрипрофильная вариация, чем латеральная, наблюдается для содержания органического углерода, кальция и магния на обоих участках. На участке «Бондарев», большей внутрипрофильной вариацией характеризуются, кроме того, содержание фракций 1–0,25, 0,05–0,01, 0,01–0,005, 0,005–0,001, <0,001, <0,01 мм, pH; для участка «Приветный» – углекислоты карбонатов, pH и содержания гранулометрических фракций 1–0,25, 0,05–0,01, 0,01–0,005, 0,005–0,001, <0,001, <0,01 мм. Таким образом, в целом наблюдается большая схожесть свойств почв, отобранных с одинаковых глубин, но из разных почвенных разрезов (расстояния между разрезами от 20 до 160 м), чем из одного и того же разреза, но отобранных с разных глубин. Этот вывод не является универсальным и справедливым для всех физико-географических условий. Возможна и обратная ситуация, и приблизительное равенство. Результаты такого типа сопоставления могут быть специфической характеристикой строения почвенного покрова в разных природных условиях.

Корреляция между свойствами почв для разных глубин. На рисунках 4 и 5 отмечены статистически значимые корреляционные связи между различными почвенными свойствами на определенных глубинах (0–20, 20–40 см и т. д.), цифрами над скобками указаны значения коэффициентов корреляции (КК). Наибольшее количество корреляций между разными почвенными свойствами (11–15 из возможных 78) наблюдаются для глубин 20–40, 40–60, 60–80 и 100–120 см для участка «Бондарев» и 0–20, 20–40, 40–60 см для участка «Приветный»; таким образом, свойства подпахотной части гумусового горизонта и верхней части переходного к аккумулятивно-карбонатному в обоих случаях оказались наиболее скоррелированы друг с другом. Вероятно, выше и ниже этих глубин корреляции подавляются автономно-функционирующими антропогенным и литогенным факторами [Тишкина, Иванова, 2010; Жидкин и др., 2016], что подтверждается в том числе наименьшим количеством корреляций между почвенными свойствами на глубинах 80–100 и 160–180 см участка «Бондарев» и 120–200 см для участка «Приветный».

Таблица 1

Значения коэффициентов вариации, рассчитанные для каждого разреза участка «Бондарев», %

Свойство		Разрезы						Минимум	Максимум
		1	2	3	4	5	6		
Содержание фракции	1–0,25	67,1	39,3	40,2	3,8	51,4	34,8	3,8	67,1
	0,25–0,05	114,2	148,1	166,1	109,1	118,5	91,8	91,8	166,1
	0,05–0,01	14,8	16,0	12,4	12,8	11,9	9,1	9,1	16,0
	0,01–0,005	11,8	23,2	10,4	16,6	11,3	12,8	10,4	23,2
	0,005–0,001	20,7	16,6	19,9	23,3	21,7	15,1	15,1	23,3
	<0,001	9,7	8,7	8,5	12,7	8,8	6,5	6,5	12,7
	<0,01	8,9	9,0	7,6	10,0	8,1	5,9	5,9	10,0
Содержание $C_{орг}$		70,7	88,6	72,0	76,8	69,6	70,5	69,6	88,6
Значения pH		2,8	3,8	3,3	3,4	2,8	3,3	2,8	3,8
Кол-во эквивалентов Ca		14,8	12,0	13,1	10,6	9,3	11,6	9,3	14,8
Кол-во эквивалентов Mg		38,3	25,7	48,3	48,9	38,6	35,5	25,7	48,9
Содержание CO_2 карбонатов		49,9	65,6	41,9	57,1	53,9	48,7	41,9	65,6
Плотность почвы		5,3	7,5	6,7	9,8	5,1	6,2	5,1	9,8

Таблица 2

Значения коэффициентов вариации, рассчитанные для каждого разреза участка «Приветный», %

Свойство		Разрез						Минимум	Максимум
		1	2	3	4	6	8		
Содержание фракции	1–0,25	48,4	38,8	282,0	70,8	57,4	114,7	38,8	282
	0,25–0,05	54,8	48,2	56,8	61,5	57,1	94,9	48,2	94,9
	0,05–0,01	22,8	28,9	11,5	22,8	15,0	21,7	11,5	28,9
	0,01–0,005	19,3	16,8	30,2	50,5	26,2	37,0	16,8	50,5
	0,005–0,001	21,8	27,5	26,2	36,9	13,7	18,0	13,7	36,9
	<0,001	6,9	4,6	11,9	12,6	7,5	8,6	4,6	12,6
	<0,01	5,0	6,5	4,5	8,8	4,9	6,8	4,5	8,8
Содержание $C_{орг}$		92,1	92,6	90,8	85,6	85,0	79,4	79,4	92,6
Значения pH		8,6	7,4	6,8	8,4	6,8	6,5	6,5	8,6
Кол-во эквивалентов Ca		20,3	26,1	18,0	22,1	20,5	18,0	18	26,1
Кол-во эквивалентов Mg		35,6	41,9	38,8	43,1	40,6	37,4	35,6	43,1
Содержание CO_2 карбонатов		68,1	60,4	70,4	63,8	75,1	77,2	60,4	77,2
Плотность почвы		6,0	6,2	8,0	6,4	5,7	6,4	5,7	8,0

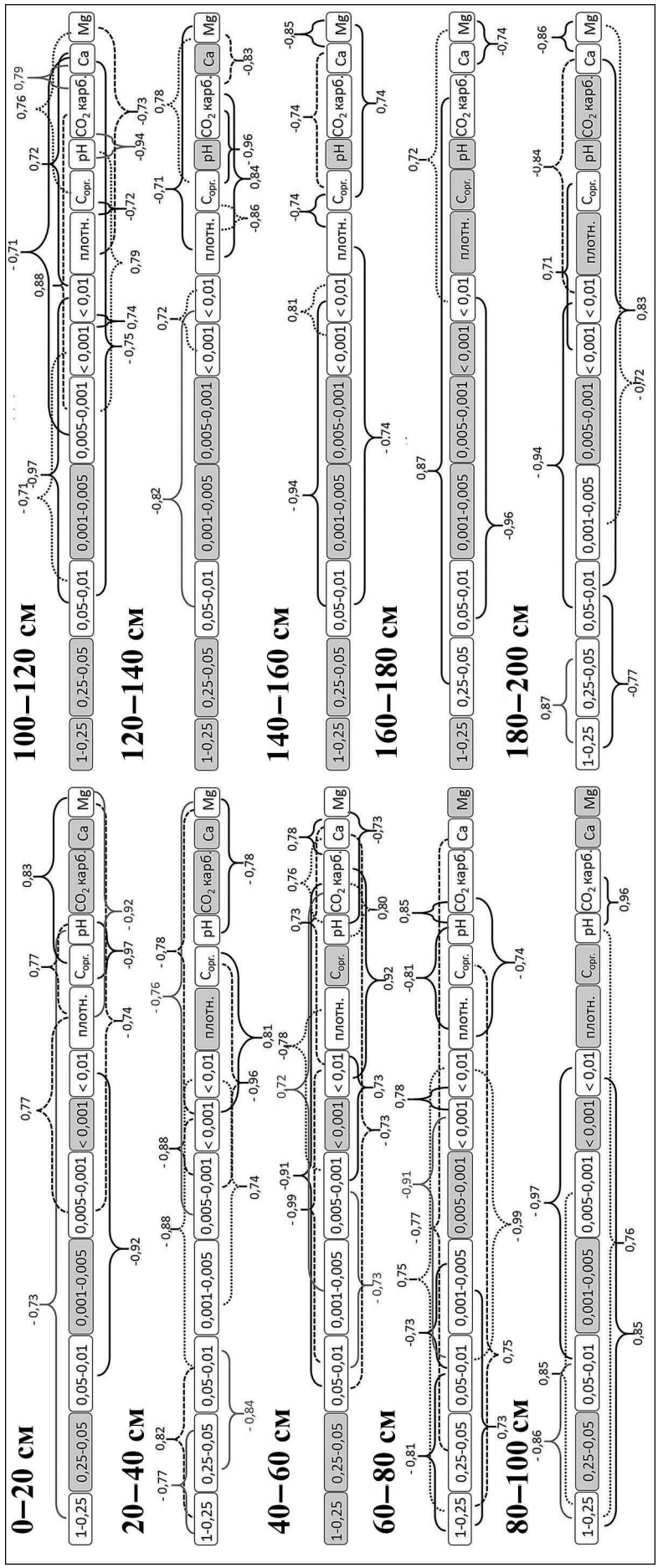


Рис. 4. Корреляции между почвенными свойствами на разных глубинах почв участка «Бондарев».

Скобками показано наличие корреляций, числом отмечены значения коэффициентов корреляций. Серым цветом выделены свойства, для которых отсутствует корреляция с другими свойствами на данной глубине

Fig. 4. Correlations between soil properties at different soil depths within the "Bondarev" site.

The parentheses show the presence of significant correlations, the numbers are for the values of the correlation coefficients. Gray color indicates properties for which there is no correlation with other properties at a given depth

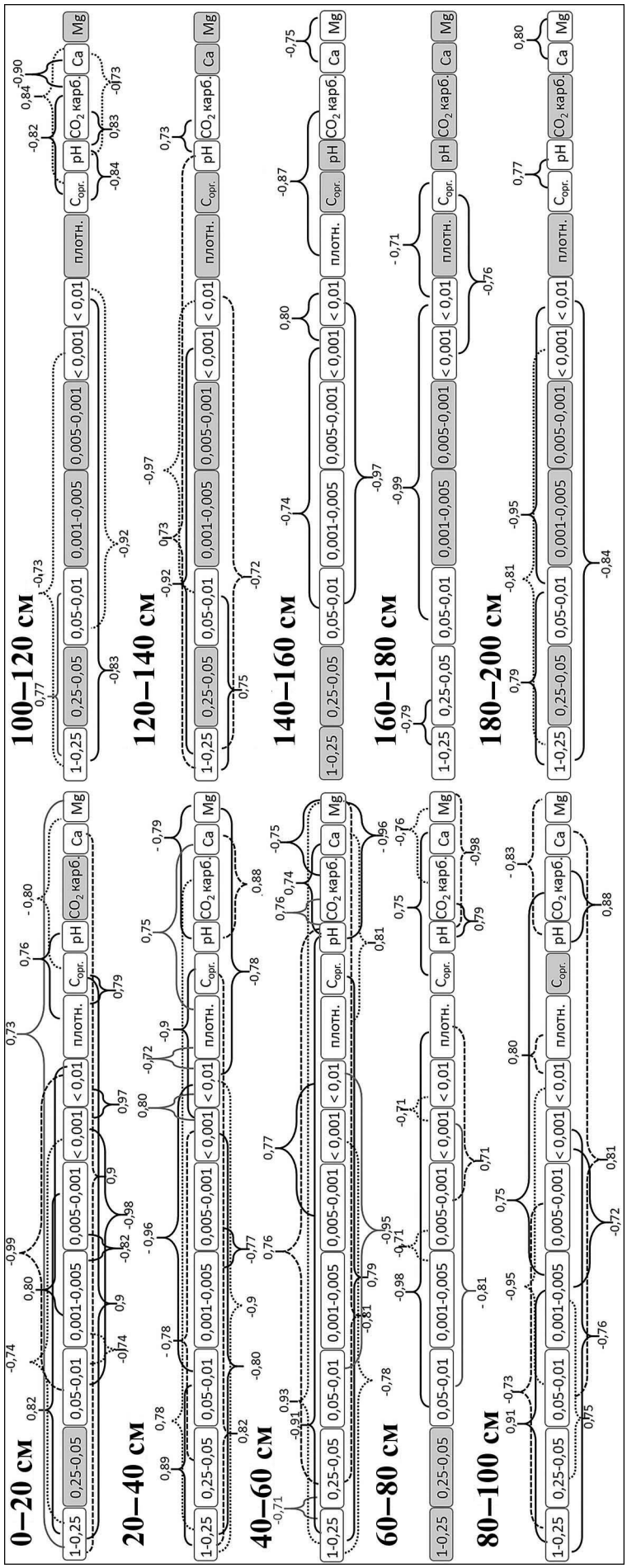


Рис. 5. Корреляции между почвенными свойствами на разных глубинах почв участка «Приветный».

Скобками показано наличие корреляций, числом отмечены значения коэффициентов корреляций. Серым цветом выделены свойства, для которых отсутствует корреляция с другими свойствами на данной глубине

Fig. 5. Correlations between soil properties at different soil depths within the "Privetny" site.

The parentheses show the presence of significant correlations, the numbers are for the values of the correlation coefficients. Gray color indicates properties for which there is no correlation with other properties at a given depth

В таблицах 3 и 4 приведены значения частоты корреляций между различными почвенными свойствами для обоих ключевых участков. Например, значение 20 показывает, что корреляция между рассматриваемыми свойствами наблюдается только на одной из 10 исследованных глубин. В целом мы видим слабую степень скоррелированности почвенных свойств; исключение составляет лишь содержание фракции 0,05–0,01 и <0,01 мм для обоих участков (КК от –0,82 до –0,98), <0,001 и 1–0,25 мм (КК от –0,81 до –0,95), 0,05–0,01 (КК от –0,72 до –0,99) для участка «Приветный» – корреляция наблюдается практически на всех исследованных глубинах. Выявленная корреляция обусловлена тем, что сумма фракций <0,01 и 0,05–0,01 мм близка к 100% для исследованных пахотных черноземов за счет низкого содержания фракции размером более 0,05 мм. В целом для почв обоих участков наименее скоррелированными с другими почвенными свойствами являются плотность почв, содержание органического углерода, содержание гранулометрических фракций 0,25–0,05, 0,01–0,005 мм.

Таблица 3

Частота наличия значимых корреляций между свойствами почв участка «Бондарев»

	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01	Плотность	$C_{орг}$	pH	CO_2 карб.	Ca	Mg
1–0,25		20	20	20	10	0	20	0	10	20	0	0	0
0,25–0,05	20		10	0	0	0	0	0	0	0	10	10	0
0,05–0,01	20	10		0	20	30	100	10	0	0	10	30	0
0,01–0,005	20	0	0		0	0	20	0	0	0	10	10	10
0,005–0,001	10	0	20	0		0	10	0	0	0	10	0	10
<0,001	0	0	30	0	0		10	0	20	0	0	0	0
<0,01	20	0	100	20	10	10		0	0	0	10	10	10
Плотность	0	0	10	0	0	0	0		10	20	20	0	20
$C_{орг}$	10	0	0	0	0	20	0	10		10	10	10	30
pH	20	0	0	0	0	0	0	20	10		40	10	20
CO_2 карб.	0	10	10	10	10	0	10	20	10	40		10	0
Ca	0	10	30	10	0	0	10	0	10	10	10		30
Mg	0	0	0	10	10	0	10	20	30	20	0	30	

Таблица 4

Частота наличия значимых корреляций между свойствами почв участка «Приветный»

	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	<0,01	Плотность	$C_{орг}$	pH	CO_2 карб.	Ca	Mg
1–0,25		20	30	20	30	70	40	0	30	20	0	10	20
0,25–0,05	20		0	10	10	10	0	0	0	10	0	0	0
0,05–0,01	30	0		0	0	60	70	0	0	0	0	0	0
0,01–0,005	20	10	0		30	20	10	0	0	0	10	0	0
0,005–0,001	30	10	0	30		0	10	10	0	0	0	0	0
<0,001	70	10	60	20	0		40	0	10	0	0	0	0
<0,01	40	0	70	10	10	40		0	0	10	10	20	0
Плотность	0	0	0	0	10	0	0		0	0	0	0	0
$C_{орг}$	30	0	0	0	0	10	0	0		10	10	30	0
pH	20	10	0	0	0	0	10	0	10		50	30	40
CO_2 карб.	0	0	0	10	0	0	10	0	10	50		20	10
Ca	10	0	0	0	0	0	20	0	30	30	20		20
Mg	20	0	0	0	0	0	0	0	0	40	10	20	

Несмотря на частое указание в литературе на наличие корреляций между значениями pH и содержанием углекислоты карбонатов [Kunhikrishnan et al., 2011; He et al., 2021], такая корреляция (КК от 0,73 до 0,96) наблюдается только для четырех глубин из 10 для участка «Бондарев» (для глубин 40–100 см) и пяти для участка «Приветный» (40–120 см), т. е. только для переходного к аккумулятивно-карбонатному и аккумулятивно-карбонатного горизонтов, что логично и объясняется прямой генетической зависимостью параметров данных свойств от состояния данных горизонтов. Содержание органического углерода обладает значимой корреляцией с содержанием илистой фракции только на глубине 20–40 и 180–200 см для участка «Бондарев» и ни для одной из глубин для участка «Приветный». Для почв участка «Приветный» выявлено больше корреляционных связей между различными почвенными свойствами, чем для участка «Бондарев». Для этих же почв характерна большая вариабельность значений свойств почв и большая контрастность почв по отношению друг к другу – как по результатам расчета таксономических расстояний, так и по положению почв в пространстве главных компонент (см. рис. 2).

ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования свойств агрочерноземов юга Среднерусской возвышенности была выявлена слабая степень скоррелированности содержания различных гранулометрических фракций, органического углерода, обменных кальция, магния, углекислоты карбонатов, плотности и значений pH между собой.

Наименее скоррелированными с другими почвенными свойствами являются плотность, содержание органического углерода, содержание гранулометрических фракций 0,25–0,05, 0,01–0,005 мм. Можно предположить, что такая минимальная корреляционная связь обусловлена пространственно-временной несогласованностью изменений между свойствами почв с относительно большими (плотность, гранулометрические фракции и др.) и относительно малыми (обменные катионы, pH и др.) характерными временами. Корреляция между содержанием углекислоты карбонатов и pH наблюдается только для переходного к аккумулятивно-карбонатному и аккумулятивно-карбонатного горизонтов, что логично и объясняется прямой генетической зависимостью параметров этих свойств от состояния данных горизонтов.

Наибольшим числом корреляций между различными почвенными свойствами характеризуются образцы, отобранные с глубин 40–60 см (подпахотная часть гумусового горизонта и переходный к аккумулятивно-карбонатному горизонту); вероятно выше и ниже этих глубин корреляции подавляются автономно функционирующими антропогенным и литогенным факторами, что подтверждается в том числе наименьшим количеством корреляций между почвенными свойствами на глубинах 80–100 и 160–180 см участка «Бондарев» и 120–200 см для участка «Приветный».

Ни для одной из глубин не была выявлена статистически значимая корреляция между: содержанием фракции 1–0,25 мм и углекислотой карбонатов; между содержанием фракции <0,001 мм и плотностью почвы, значениями pH, содержанием углекислоты карбонатов, обменных кальция и магния; между содержанием органического углерода и содержанием фракций от 0,025 до 0,001 и <0,01 мм; между значениями pH и содержанием всех фракций менее 0,05 мм (за исключением фракции <0,01 мм); между плотностью почвы и содержанием фракций от 1 до 0,05, 0,01–0,05, <0,01 и <0,001 мм; выявленные особенности объяснимы большой опосредованностью влияния названных свойств друг на друга.

Сравнение коэффициентов вариации одних и тех же свойств, рассчитанных для одного и того же разреза (т. е. вариация внутри профиля), и для одних и тех же глубин, но из разных разрезов (т. е. латеральная вариация), показало, что большая внутрипрофильная вариация по сравнению с латеральной наблюдается для содержания органического углерода, кальция и магния. На участке «Бондарев», большей внутрипрофильной вариацией характеризуются, кроме того, содержание фракций 1–0,25, 0,05–0,01, 0,01–0,005, 0,005–0,001, <0,001, <0,01 мм, pH; для участка «Приветный» – углекислоты карбонатов, pH и содержания гранулометрических фракций 1–0,25, 0,05–0,01, 0,01–0,005, 0,005–0,001, <0,001, <0,01 мм. Таким образом, наблюдается большее сходство свойств почв, отобранных с одинаковых глубин, но из разных почвенных разрезов (расстояния между разрезами от 20 до 160 м), чем из одного и того же разреза, но отобранных с разных глубин. Чем выше вариабельность свойств почв, тем почвы контрастнее по отношению друг к другу.

Следующей задачей исследования должна быть проверка универсальности сделанных выводов на основе использования других объектов.

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-17-00056-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безуглова О.С., Юдина Н.В. Взаимосвязь физических свойств и гумусированности в черноземах юга Европейской России // Почвоведение. 2006. № 2. С. 211–219.

Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И. Карты устойчивости почв к загрязнению нефтепродуктами и полициклическими ароматическими углеводородами: метод и опыт составления // Почвоведение. 2007. № 1. С. 80–92.

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Почва в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв). М.: Наука, 1990. 261 с.

Жидкин А.П., Геннадиев А.Н., Кошовский Т.С., Чендев Ю.Г. Пространственно-временные параметры латеральной миграции твердофазного вещества почв (Белгородская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2016. № 3. С. 9–17.

Княжнева Е.В., Надежкин С.М., Фрид А.С. Пространственная неоднородность уровня плодородия выщелоченного чернозема в пределах поля // Почвоведение. 2006. № 9. С. 1120–1129. DOI: 10.1134/S1064229306090110.

Красильников П.В., Таргульян В.О. На пути к «новой географии почв»: вызовы и решения (обзор) // Почвоведение. 2019. № 2. С. 131–139.

Сидорова В.А., Красильников П.В. Почвенно-географическая интерпретация пространственной вариабельности химических и физических свойств поверхностных горизонтов почв степной зоны // Почвоведение. 2007. № 10. С. 1168–1178. DOI: 10.1134/S106422930710002X.

Тишкина Э.В., Иванова Н.Н. Почвенный покров распаханных и целинных прибалочных склонов (Курская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2010. № 6. С. 73–79.

Чинилин А.В., Савин И.Ю. Крупномасштабное цифровое картографирование содержания органического углерода почв с помощью методов машинного обучения // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2018. № 91. С. 46–62.

Шеин Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309–317.

Alexander E.B. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties, *Soil Science Society of America Journal*, 1980, vol. 44, no. 4, p. 689–692.

Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W. et al. Soil and human security in the 21st century, *Science*, 2015, vol. 348, no. 6235, p. 1261071. DOI: 10.1126/science.1261071.

Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z. et al. Soil quality – A critical review, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 120, p. 105–125, DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Fukumasu J., Jarvis N., Koestel J. et al. Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil with large variations in soil properties, *European Journal of Soil Science*, 2022, vol. 73, no. 1, p. e13212, DOI: 10.1111/ejss.13212.

He L.L., Huang D.Y., Zhang Q. et al. Meta-analysis of the effects of liming on soil pH and cadmium accumulation in crops, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 223, p. 112621, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112621.

Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Bolan N.S. et al. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux, *Advances in agronomy*, 2016, vol. 139, p. 1–71, DOI: 10.1016/bs.agron.2016.05.001.

Ladoni M., Bahrami H.A., Alavipanah S.K., Norouzi A.A. Estimating soil organic carbon from soil reflectance: a review, *Precision Agriculture*, 2010, vol. 11, p. 82–99, DOI: 10.1007/s11119-009-9123-3.

Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base, *Geoderma*, 2010, vol. 155, p. 132–139, DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.04.024.

Murphy B.W. Impact of soil organic matter on soil properties – a review with emphasis on Australian soils, *Soil Research*, 2015, vol. 53, no. 6, p. 605–635, DOI: 10.1071/SR14246.

Rasmussen C., Heckman K., Wieder W.R. et al. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content, *Biogeochemistry*, 2018, vol. 137, p. 297–306, DOI: 10.1007/s10533-018-0424-3.

Schimel D.S., Braswell B.H., Holland E.A. et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils, *Global Biogeochemiacal Cycles*, 1994, vol. 8(3), p. 279–293, DOI: 10.1029/94GB00993.

Wagner S., Cattle S.R., Scholten T. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, vol. 170(1), p. 173–180, DOI: 10.1002/jpln.200521732.

Wilkinson M.T., Richards P.J., Humphreys G.S. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation, *Earth-Science Reviews*, 2009, vol. 97, p. 254–269, DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.09.005.

Zhang H., Wang C., Chen Z. et al. Performance Comparison of Different Particle Size Distribution Models in the Prediction of Soil Particle Size Characteristics, *Land*, 2022, vol. 11, no. 11, p. 2068, DOI: 10.3390/land11112068.

Поступила в редакцию 23.04.2023
После доработки 15.05.2023
Принята к публикации 24.05.2023

CORRELATION AND VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES OF ARABLE CHERNOZEMS IN THE SOUTH OF THE CENTRAL RUSSIAN UPLAND

M.A. Smirnova[1], A.N. Gennadiev[2], Yu.G. Chendev[3], M.V. Bocharnikov[4]

[1, 2, 4] *M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*
[3] *Belgorod State University, Institute of Earth Sciences, Department of nature management and land cadastre*

[1] *Department of landscape geochemistry and soil geography, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: summerija@yandex.ru*
[2] *Department of landscape geochemistry and soil geography, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: alexagenna@mail.ru*
[3] *Head of Department, D.Sc. in Geography; e-mail: chendev@bsu.edu.ru*
[4] *Department of biogeography, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: maxim-msu-bg@mail.ru*

Search for correlations between different soil properties and assessment of their variability is important for understanding soil functioning, allows more optimal planning of field and laboratory research and creates the basis for fertilizing management and precision agriculture. This work is based on the data on the content of organic carbon, pH, bulk density, texture (fractions 1–0,25 mm; 0,25–0,05 mm; 0,05–0,01 mm; 0,01–0,005 mm; 0,005–0,001 mm and <0,001 mm and <0,01 mm), exchange calcium and magnesium carbonates for twelve sites of plowed Chernozems studied in the southern part of the Central Russian Upland (Belgorod oblast). Soil samples were taken layer by layer every 20 cm to 3 m depth. Weak correlation was revealed among studied soil characteristics of the plowed Chernozems. The least correlation with other soil characteristics is characteristic of bulk density, organic carbon content, content of fraction 0,25–0,05 mm and 0,01–0,005 mm. Correlation between the content of bicarbonates and pH values is observed only for accumulative – carbonate horizon and transition horizons. The largest number of correlations between different soil characteristics is for the non-plowed part of humus horizon and the top of transition horizon. The least amount of correlations between soil characteristics was found at depths from 80 to 100 cm. Comparison of the coefficients of variations calculated for different soil layers of a single profile (i. e. intraprofile variability) and for the same soil layers but from different profiles (i. e. lateral variability) showed that the intraprofile variability exceeds the lateral one for the organic carbon, exchangeable potassium and calcium content.

Keywords: pedometrics, soil organic matter, agrochemical properties, Belgorod oblast

Acknowledgments. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-17-00056-П).

REFERENCES

Alexander E.B. Bulk densities of California soils in relation to other soil properties, *Soil Science Society of America Journal*, 1980, vol. 44, no. 4, p. 689–692.

Amundson R., Berhe A.A., Hopmans J.W. et al. Soil and human security in the 21st century, *Science*, 2015, vol. 348, no. 6235, p. 1261071, DOI: 10.1126/science.1261071.

Bezuglova O.S., Yudina N.V. Interrelationship between the physical properties and the humus content of chernozems in the south of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2006, no. 2, p. 211–219, DOI: 10.1134/S1064229306020098.

Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z. et al. Soil quality – A critical review, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 120, p. 105–125, DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Chinilin A.V., Savin I.Yu. Krupnomasshtabnoe cifrovoe kartografirovanie soderzhanija organicheskogo ugleroda pochv s pomoshh'ju metodov mashinnogo obuchenija [The large scale digital mapping of soil organic carbon using machine learning algorithms], *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2018, no. 91, p. 46–62. (In Russian)

Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Pochva v biosfere i jekosistemah (jekologicheskoe znachenie pochv)* [Soil in the biosphere and ecosystems (ecological significance of soils)], Moscow, Nauka, 1990, 261 p. (In Russian)

Fukumasu J., Jarvis N., Koestel J. et al. Relations between soil organic carbon content and the pore size distribution for an arable topsoil with large variations in soil properties, *European Journal of Soil Science*, 2022, vol. 73, no. 1, p. e13212, DOI: 10.1111/ejss.13212.

Gennadiev A.N., Pikovskii Yu.I. The maps of soil tolerance toward pollution with oil products and polycyclic aromatic hydrocarbons: Methodological aspects, *Eurasian Soil Science*, 2007, no. 1, p. 80–92, DOI: 10.1134/S1064229307010115.

He L.L., Huang D.Y., Zhang Q. et al. Meta-analysis of the effects of liming on soil pH and cadmium accumulation in crops, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 223, p. 112621, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112621.

Knyazhneva E.V., Nadezhkin S.M., Frid A.S. The spatial heterogeneity of the fertility in a leached chernozem within a field, *Eurasian Soil Science*, 2006, no. 9, p. 1120–1129, DOI: 10.1134/S1064229306090110.

Krasilnikov P.V., Targulian V.O. Towards "New Soil Geography" Challenges and Solutions. A Review, *Eurasian Soil Science*, 2019, no. 2, p. 131–139, DOI: 10.1134/S1064229319020091.

Kunhikrishnan A., Thangarajan R., Bolan N.S. et al. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux, *Advances in agronomy*, 2016, vol. 139, p. 1–71, DOI: 10.1016/bs.agron.2016.05.001.

Ladoni M., Bahrami H.A., Alavipanah S.K., Norouzi A.A. Estimating soil organic carbon from soil reflectance:

a review, *Precision Agriculture*, 2010, vol. 11, p. 82–99, DOI: 10.1007/s11119-009-9123-3.

Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base, *Geoderma*, 2010, vol. 155, p. 132–139, DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.04.024.

Murphy B.W. Impact of soil organic matter on soil properties – a review with emphasis on Australian soils, *Soil Research*, 2015, vol. 53, no. 6, p. 605–635, DOI: 10.1071/SR14246.

Rasmussen C., Heckman K., Wieder W.R. et al. Beyond clay: towards an improved set of variables for predicting soil organic matter content, *Biogeochemistry*, 2018, vol. 137, p. 297–306, DOI: 10.1007/s10533-018-0424-3.

Schimel D.S., Braswell B.H., Holland E.A. et al. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, vol. 8(3), p. 279–293, DOI: 10.1029/94GB00993.

Shein E.V. The particle-size distribution in soils: Problems of the methods of study, interpretation of the results, and classification, *Eurasian Soil Science*, 2009, no. 3, p. 309–317, DOI: 10.1134/S1064229309030053.

Sidorova V.A., Krasilnikov P.V. Soil-geographic interpretation of spatial variability in the chemical and physical properties of topsoil horizons in the steppe zone, *Eurasian Soil Science*, 2007, no. 10, p. 1168–1178, DOI: 10.1134/S106422930710002X.

Tishkina E.V., Ivanova N.N. Pochvennyj pokrov raspahannyh i celinnyh pribalochnyh sklonov (Kurskaya oblast') [Soil cover of cultivated and intact slopes of the balkas in the Kursk oblast], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2010, no. 6, p. 73–79. (In Russian)

Wagner S., Cattle S.R., Scholten T. Soil-aggregate formation as influenced by clay content and organic-matter amendment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, vol. 170(1), p. 173–180, DOI: 10.1002/jpln.200521732.

Wilkinson M.T., Richards P.J., Humphreys G.S. Breaking ground: Pedological, geological, and ecological implications of soil bioturbation, *Earth-Science Reviews*, 2009, vol. 97, p. 254–269. DOI: 10.1016/j.earscirev.2009.09.005.

Zhang H., Wang C., Chen Z., Kang Q., Xu X., Gao T. Performance Comparison of Different Particle Size Distribution Models in the Prediction of Soil Particle Size Characteristics, *Land*, 2022, vol. 11, no. 11, p. 2068, DOI: 10.3390/land11112068.

Zhidkin A.P., Gennadiev A.N., Koshovskij T.S., Chendev Yu.G. Prostranstvenno-vremennye parametry lateral'noj migracii tverdofaznogo veshchestva pochv (Belgorodskaya oblast') [Spatio-temporal parameters of the lateral migration of solid-phase soil matter (Belgorod region)], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2016, no. 3, p. 9–17. (In Russian)

Received 23.04.2023
Revised 15.05.2023
Accepted 24.05.2023