

МИНЕРАЛОГИЯ И МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.434.6

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРОСТРОЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗНЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЙ

© 2023 г. С. А. Юдин^а, * (ORCID: 0000-0003-2199-8474), О. О. Плотникова^а,
В. П. Белобров^а, М. П. Лебедева^а, К. Н. Абросимов^а, Н. Р. Ермолаев^а

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

*e-mail: yudin_sa@esoil.ru

Поступила в редакцию 08.11.2022 г.

После доработки 26.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Представлены методические возможности микроморфологического исследования почв, с применением программного обеспечения, позволяющего делать цифровую съемку шлифов с большим разрешением и на количественном уровне анализировать шлифы по характеру пористости, диаметру пор, форме и ориентации агрегатов, т.е. параметрам, характеризующим строение почв на микроуровне. Проведена апробация нового программного обеспечения Thixomet Pro для количественного микроморфологического изучения почвенных шлифов на примере типичных черноземов (Haplic Chernozem) научно-производственного опыта (Курская область) по оценке воздействия агротехнологий в зерновом севообороте: традиционной технологии и прямого посева — на фракционный состав агрегатов, их форму и ориентацию. Микроморфологический анализ шлифов с использованием программного обеспечения Thixomet Pro выявил вариабельность микростроения типичных черноземов в размерности фракций, форме и ориентации агрегатов, связанную с использованием в зерновом севообороте двух различных агротехнологий, применяющих обработку почв (вспашка с оборотом пласта) и не применяющих ее (прямой посев, no-till). В черноземе варианта прямого посева агрегаты в целом более крупные, что отмечается при сравнении с агрегатами чернозема варианта традиционной обработки на всех уровнях диаметра агрегатов: минимального, среднего и максимального. Тем не менее, при прямом посеве в агрегатном составе преобладают агрономически ценные фракции, характерные для устойчивой структуры целинных почв. Показано, что при прямом посеве формируются менее округлые и изометричные агрегаты, а доля субгоризонтально залегающих агрегатов по сравнению с традиционной обработкой повышена, что способствует сохранению влаги в поверхностном горизонте.

Ключевые слова: микроморфология, морфометрия почв, Haplic Chernozem, прямой посев, no-till

DOI: 10.31857/S0032180X22601438, **EDN:** FQBAOC

ВВЕДЕНИЕ

Отличительными чертами черноземов являются структура, аккумуляция органического вещества (**ОВ**) в агрегатах, их размерность и водостойчивость, сохранение которых обеспечивает плодородие данных почв. Это особенно важно на фоне меняющихся во времени климатических параметров и в условиях традиционной системы земледелия в России с применением обработки почв [3, 13]. Мировой и отечественный опыт применения прямого посева (без обработки почв) показал, что использование данной технологии в защите почв от эрозии (водной и ветровой), блокировании деградации структуры и дегумификации эффективно в разных климатических условиях от засушливых до влажно-тропических, а также для секвестрации углерода, как на поверхности поч-

вы, так и в подпочвенных слоях, что отвечает задаче сохранения экологического равновесия в почвах и поддержания их плодородия в меняющихся условиях климата [8, 14, 33, 41].

К настоящему времени в России накоплены опытные данные по характеристике макро- и микроструктуры разных подтипов черноземов на примере обработок почв (традиционная технология земледелия) и без обработки (прямой посев) [7, 22, 25]. Полученные результаты дают основание считать, что при прямом посеве отмечаются существенные изменения структурного состояния почв в виде трансформации размеров агрегатов, отражающие восстановительный тренд структуры черноземов. Доминирующее при традиционной технологии обработки почв разрушение агрегатов сопровождается формированием глыбистой (>10 мм)

и неустойчивой в водной среде структуры, не характерной для целинных почв [23]. При прямом посеве глыбистые агрегаты, в силу самоорганизации и низкой водоустойчивости, трансформируются в крупные агрегаты размером не более 10 мм, что связываю с процессом восстановления структуры почв [23]. Это создает условия для накопления и перемещения почвенной влаги и воздуха, жизнедеятельности корней, почвенных животных, микробных и грибных сообществ.

Микроморфологические исследования показали тенденцию к восстановлению структуры, уплотнению внутривредной массы и консервации большого количества мелких растительных остатков внутри агрегатов. Следы биогенной переработки диагностируются по наличию копролитов разного состава [1].

Геометрические показатели почвенной структуры обычно анализировались в шлифах через оценку морфометрических параметров пор [20, 32]. Современные методические возможности микроморфологического исследования почв постоянно расширяются за счет использования новых программных обеспечений (ПО), которые позволяют делать цифровую съемку шлифов с большим разрешением и на количественном уровне анализировать шлифы не только по характеру пористости (по диаметру пор), но и по форме и ориентации агрегатов, т.е. параметрам, характеризующим строение почв на микроуровне. Пионерные исследования в этом направлении затрагивают глубокий характер процессов восстановления структуры на микроуровне.

Цель исследования состоит в апробации нового ПО Thixomet Pro для количественного микроморфологического изучения почвенных шлифов на примере типичных черноземов научно-производственного опыта по оценке воздействия агротехнологий (традиционной и прямого посева) на фракционный состав агрегатов, их форму и ориентацию. Использование Thixomet Pro позволит проводить оценку эффективности воздействия при выращивании культур, количественное сравнение микростроения разных подтипов черноземов и идентифицировать процесс восстановления структуры почв на микроуровне.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования – старопашотные черноземы типичные (Haplic Chernozem) [40], сформированные на участке площадью 10 га водораздельной поверхности стационара “Курский ФАНЦ” с координатами 51°37'46" N; 36°15'40" E. Почвообразующими породами служат мощные (>3 м) однородные по составу лёссовидные отложения преимущественно тяжелосуглинистого гранулометрического состава [1]. На участке до-

минируют типичные черноземы (82% территории). Кроме того, встречаются карбонатные перерытые (12%) и глубоковскипающие (6%) типичные черноземы [17]. Такая неоднородность почвенного покрова характерна для подтипа типичных черноземов Курской области.

На территории участка в соответствии с методическими рекомендациями [15, 16] были заложены 4 опытных поля, каждое площадью 2,4 га, последовательно в 2013–2016 гг. На полях проводили опыт по минимизации обработок на делянках размером 60 × 100 м в следующих вариантах: вспашка с оборотом пласта на глубину 20 см, комбинированная обработка (чизель + дискование), минимальная обработка (дискование) и прямой посев (no-till). В течение 8 лет применяли севооборот: озимая пшеница–кукуруза (с 2018 г. соя)–ячмень–горох. После завершения второй ротации на поле 1 в 2020 г. отобрали образцы ненарушенного сложения пахотного горизонта чернозема типичного среднекарбонатного с глубины 10–15 см в вариантах: вспашка с оборотом пласта (далее традиционная технология) и прямой посев (no-till), характеризующих наиболее контрастные условия агротехнологий земледелия.

Из образцов ненарушенного сложения М.А. Лебедевым были изготовлены почвенные шлифы (оборудование Центра коллективного пользования ФГБНУ ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева). С помощью ПО Thixomet Lite проводили панорамную съемку шлифов на поляризационном микроскопе Zeiss AXIO Imager.A2m с камерой Canon EOS RP и моторизованным предметным столиком Märzhäuser Wetzlar. Условия съемки: проходящий поляризованный свет, увеличение 50×. На полученных панорамных снимках для дальнейшего анализа выбирали характеристические области (рис. 1) таким образом, чтобы изображение отвечало принципам репрезентативности, т.е. контрастности и стационарности, что является необходимым условием для достоверного распознавания объектов при компьютерном анализе цифровых изображений почвенных шлифов. Под этим подразумевается, что участки анализа должны располагаться в местах, где толщина шлифа равномерна, а также охватывать области шлифа с наиболее характерным микростроением. Например, верхняя половина изображения шлифа чернозема, обрабатываемого по традиционной технологии (вторая повторность, рис. 1б), не является характеристической областью, так как там расположена биогенная камера по бывшему корню, стенки которой уплотнены и микростроение вдоль стенок практически не дифференцировано на агрегаты. На рис. S1 исходные панорамные изображения шлифов подробно размечены с указанием тех или иных зон, подходящих или не подходящих для количественного анализа.

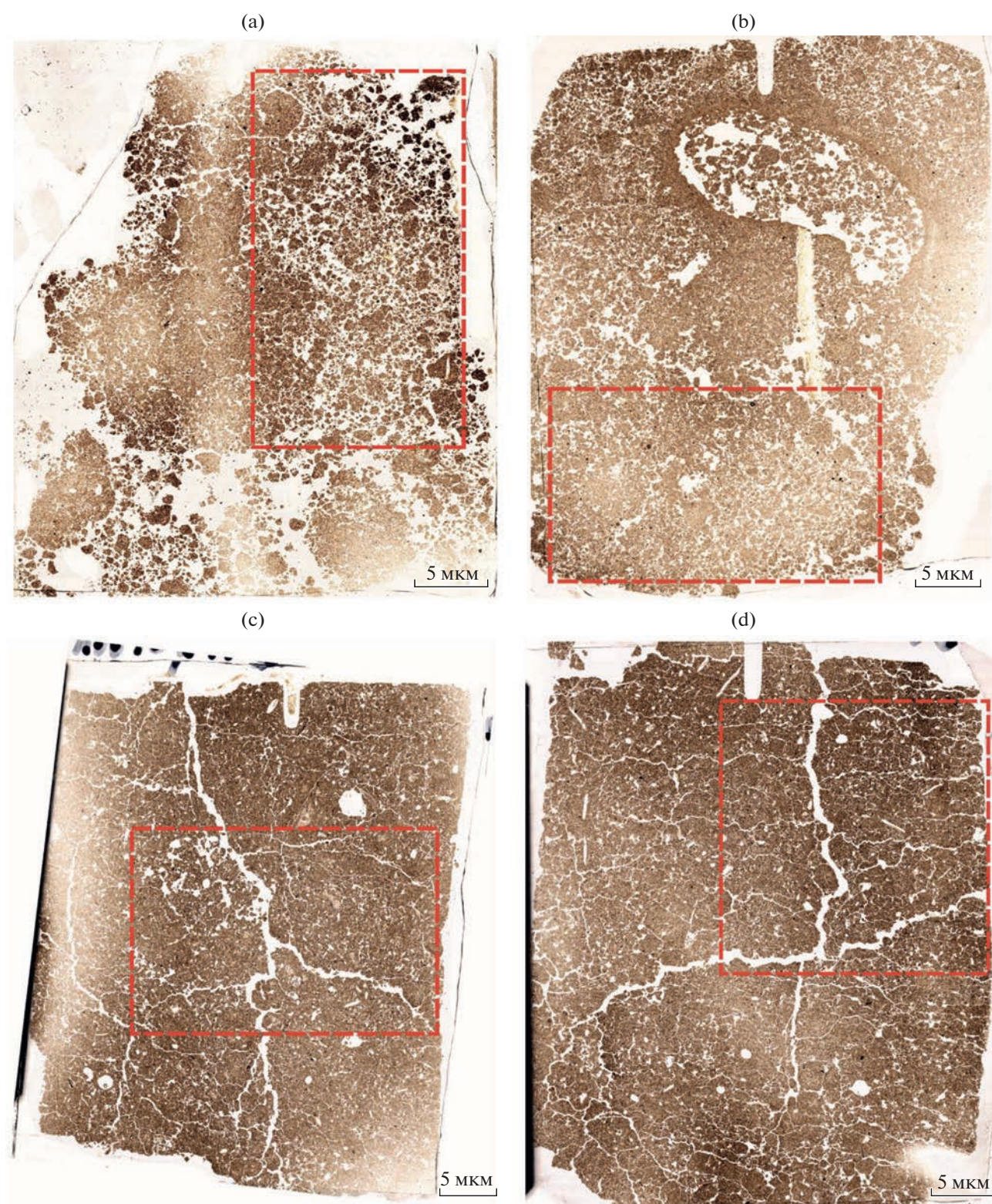


Рис. 1. Исходные панорамные изображения шлифов: а, б — традиционная технология, повторности 1 и 2 соответственно; с, д — прямой посев, повторности 1 и 2 соответственно. Красными контурами отмечены характеристические области, выбранные для анализа.

Площади участков для количественного анализа изображений шлифов составили для черноземов, обрабатываемых по традиционной технологии, 496 и 413 мм² (рис. 1a, 1b), а для черноземов, обрабатываемых по технологии прямого посева, 483 и 418 мм² (рис. 1c, 1d) для первой и второй повторности соответственно. Общая анализируемая площадь составила 901 и 909 мм² для черноземов, обрабатываемых по традиционной технологии и по технологии прямого посева соответственно. Можно отметить, что только на шлифе ПП-1 можно было выбрать площади для анализа несколько большую, чем была выбрана (рис. S1c). Однако было принято решение этого не делать, так как в этом случае общие площади анализа для обеих повторностей обоих вариантов опыта были бы несопоставимы.

Анализ изображений шлифов проводили в модуле “Агрегаты 2” ПО Thixomet Pro [36] с применением следующих настроек: разделение агрегатов – 55, минимальный диаметр поры – 30 мкм, удаление пограничных объектов (т.е. тех объектов, которые непосредственно граничат с границами анализируемого участка). Минимальный диаметр поры выбрали, исходя из традиционных представлений о минимальном размере объекта, достоверно определяемого в шлифе [34]. Пограничные объекты необходимо удалять при анализе, поскольку их форма не может быть определена достоверно в силу неполной их представленности на анализируемом участке. Параметр разделения агрегатов подбирали путем многократного выполнения анализа при различных значениях этой настройки и дальнейшей экспертной оценки качества выделения границ агрегатов (всего итераций анализа для подбора разделения агрегатов – 8). На рис. S2 представлено изображение шлифа пахотного горизонта чернозема типичного, вариант ТТ-2, подтверждающее: 1) уплотнение почвы вблизи корневой камеры с формированием более крупных агрегатов (рис. S2b), отмеченное визуально (рис. S2a); 2) непригодность “вытертых” зон шлифа для количественного микроморфологического анализа (рис. S2c).

Вычисляли следующие количественные параметры агрегатов: минимальный, средний и максимальный диаметр (по Фере), фактор формы (FF) по Скворцовой и Морозову [21] и ориентация. Полученные значения усредняли по двум повторностям каждого варианта опыта, что служило основой для построения гистограмм. Диаметр по Фере – это длина проекции объекта на некую ось. В ПО Thixomet Pro максимальный и минимальный диаметры выбираются из рассчитываемого набора диаметров по Фере по 64 осям. Средний диаметр рассчитывали как среднее значение между максимальным и минимальным. При анализе шлифов использовали классическое

разделение фракций агрегатов по размерам: <0.25, 0.25–0.5, 0.5–1, 1–2, 2–3, 3–5, 5–7, 7–10, >10 мм [2], позволяющее выделить среди агрегатов агрономически ценные [27]. Для фактора формы, характеризующего изометричность и округлость объектов, использовали градации, разработанные Скворцовой и Морозовым [21] для оценки порового пространства по почвенным шлифам. Ориентацию объекта рассчитывали как угол наклона максимального диаметра по Фере относительно горизонтали. Агрегаты разделяли на субгоризонтальные и субвертикальные. Под субгоризонтальными понимали агрегаты с ориентацией от 0° до 30° и от 150° до 180° [37], под субвертикальными – все остальные.

Для оценки удовлетворительности качества анализа провели анализ варьирования максимального диаметра, фактора формы и ориентации агрегатов, распознанных Thixomet Pro в пределах участков различной площади на изображении шлифа ТТ-2. Шлиф ТТ-2 выбран максимально равномерной его толщины из четырех шлифов. Площади анализа на шлифе выбрали таким образом, чтобы исключить попадание “вытертой” зоны в площадь анализа: 1125 мм² – максимально возможная площадь анализа для этого шлифа; 630 мм² – площадь анализа, в которую частично попадает зона уплотнения вокруг корневой камеры; 413 мм² – площадь анализа, выбранная для обобщения с ТТ-1 и сопоставления с ПП-1 и ПП-2 (рис. S3). Анализ варьирования морфометрических характеристик проводили путем однофакторного дисперсионного анализа с помощью программы Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описательные статистики морфометрических параметров агрегатов чернозема типичного по результатам анализа панорамного изображения шлифа ТТ-2 в Thixomet Pro и результаты их дисперсионного анализа приведены в табл. S1 и S2 соответственно. Выявлено, что площадь анализа для этого шлифа значимо влияет на все проанализированные морфометрические характеристики. Это указывает, прежде всего, что данный шлиф не на всей своей площади является характеристическим для горизонта, так как существенную долю его площади занимает корневая камера. В дальнейших количественных микроморфологических исследованиях рекомендуется избегать анализа подобных шлифов, либо увеличивать выборку шлифов из горизонта в целом, чтобы сгладить влияние нетипичных микрозон на отдельных шлифах. Поскольку в данном исследовании увеличить выборку было невозможно, ограничились подбором площади анализа на имеющемся шлифе таким образом, чтобы исключить зону уплотнения вблизи корневой камеры.

Таблица 1. Доля площади агрегатов с различными минимальным, средним и максимальным диаметрами (мм) от общей площади распознанных при анализе агрегатов, %; ТТ – традиционная технология возделывания, ПП – прямой посев

Вариант*	Фракция агрегатов, d , мм								
	0–0.25	0.25–0.5	0.5–1	1–2	2–3	3–5	5–7	7–10	>10
Минимальный диаметр									
ПП-1	3.6	14.0	38.7	36.3	7.4	0	0	0	0
ПП-2	1.0	2.2	12.2	47.3	33.9	3.5	0	0	0
ТТ-1	16.2	26.3	36.6	18.0	3.0	0	0	0	0
ТТ-2	34.8	41.2	21.1	2.8	0	0	0	0	0
ПП (среднее)	2.3	8.1	25.5	41.8	20.7	1.8	0	0	0
ТТ (среднее)	25.5	33.8	28.8	10.4	1.5	0	0	0	0
Средний диаметр									
ПП-1	1.9	7.1	27.0	45.2	14.2	4.6	0	0	0
ПП-2	0.5	1.3	4.1	22.2	31.6	33.4	6.9	0	0
ТТ-1	10.2	20.8	33.5	27.9	7.7	0	0	0	0
ТТ-2	21.9	37.5	33.7	6.9	0	0	0	0	0
ПП (среднее)	1.2	4.2	15.6	33.7	22.9	19.0	3.4	0	0
ТТ (среднее)	16.1	29.2	34.1	17.2	3.6	0	0	0	0
Максимальный диаметр									
ПП-1	1.3	4.8	20.1	45.6	19.4	8.7	0	0	0
ПП-2	0.4	0.9	2.8	14.9	24.0	34.5	15.5	6.9	0
ТТ-1	7.6	16.6	32.4	33.4	6.6	3.6	0	0	0
ТТ-2	16.0	33.0	37.9	11.8	1.3	0	0	0	0
ПП (среднее)	0.8	2.9	11.4	30.3	21.7	21.6	7.8	3.4	0
ТТ (среднее)	11.8	24.7	35.3	22.1	4.3	1.7	0	0	0

* Здесь и в табл. 2 и 3 цифры 1 и 2 означают повторности.

На рис. 2 и 3 представлены сегментированные в ПО Thixomet Pro панорамные изображения шлифов, изготовленных из образцов черноземов типичных ненарушенного сложения. На рис. 2а–2с и 3а–3с представлена визуализация разделения агрегатов по минимальному, среднему и максимальному диаметру соответственно; рис. 2d и 3d – визуализация разделения агрегатов по фактору формы, рис. 2е и 3е – по ориентации. Анализ изображений шлифов в Thixomet Pro показал, что при традиционной технологии обработки в микроструктуре типичных черноземов преобладают агрегаты с минимальным диаметром 0.25–0.5, 0.5–1 и <0.25 мм (88.1%), средним диаметром 0.5–1, 0.25–0.5, 1–2 и <0.25 мм (96.2%) и макси-

мальным диаметром 0.5–1, 0.25–0.5 и 1–2 мм (94.3%), тогда как при прямом посеве преобладают фракции агрегатов с большими диаметрами – минимальным 1–2, 0.5–1 и 2–3 мм (88.0%), средним 1–2, 2–3, 3–5 и 0.5–1 мм (91.2%) и максимальным 1–2, 2–3 и 3–5 мм (73.6%) (табл. 1, рис. 2а–2с, 3а–3с). Все фракции агрегатов указаны в порядке уменьшения доли их площади от общей площади всех распознанных программой агрегатов. Существенное отличие прямого посева от традиционной технологии заключается в появлении в первом агрегатов с минимальным диаметром 3–5 мм, средним 5–7 мм и максимальным 7–10 мм, что подтверждает визуально наблюдаемое формиро-

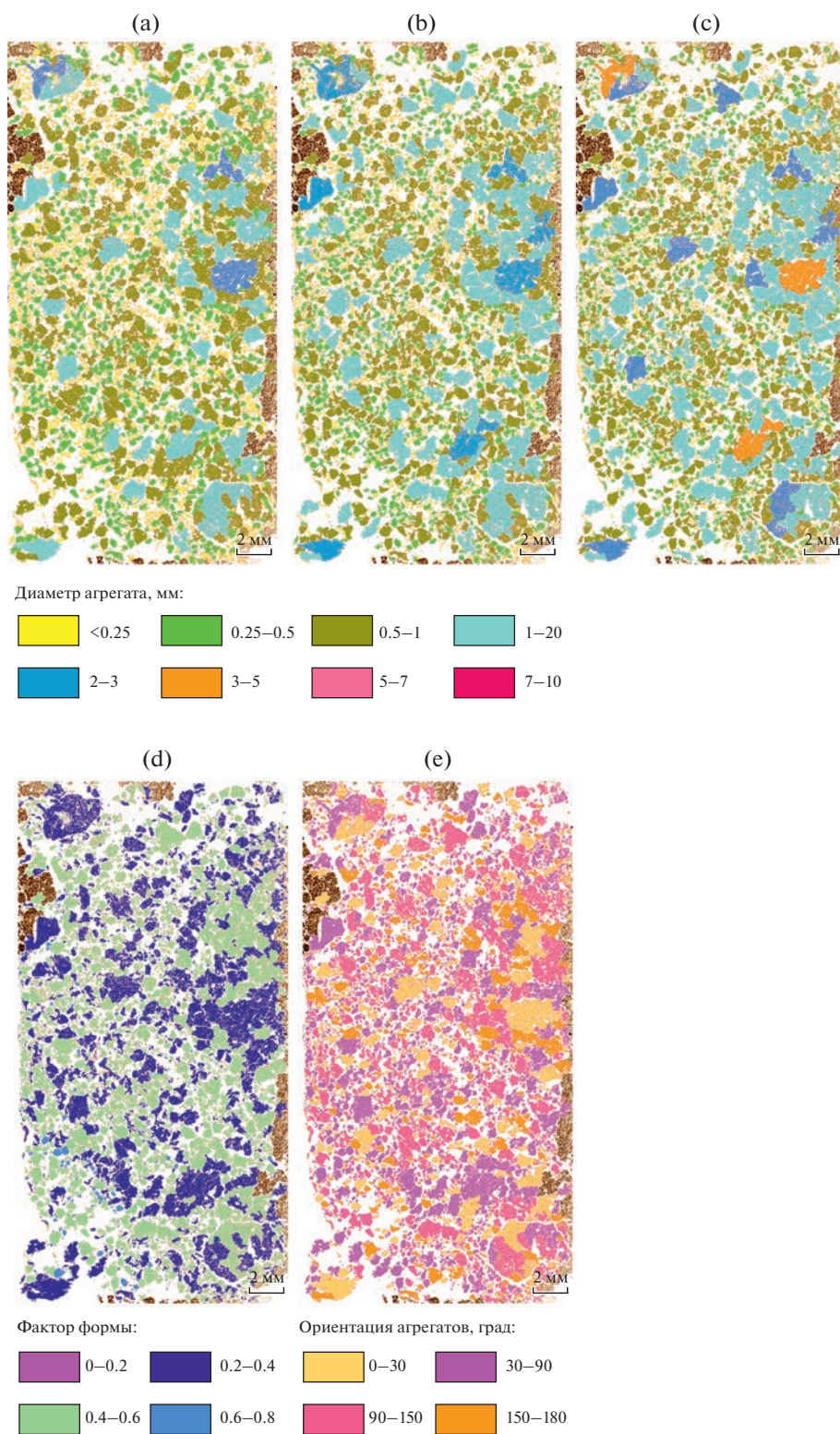


Рис. 2. Сегментированное в Thixomet Pro панорамное изображение шлифа пахотного горизонта из чернозема типичного (традиционная технология, повторность 1): а, b, с – минимальный, средний и максимальный диаметр агрегатов соответственно; d – фактор формы; e – ориентация агрегатов.

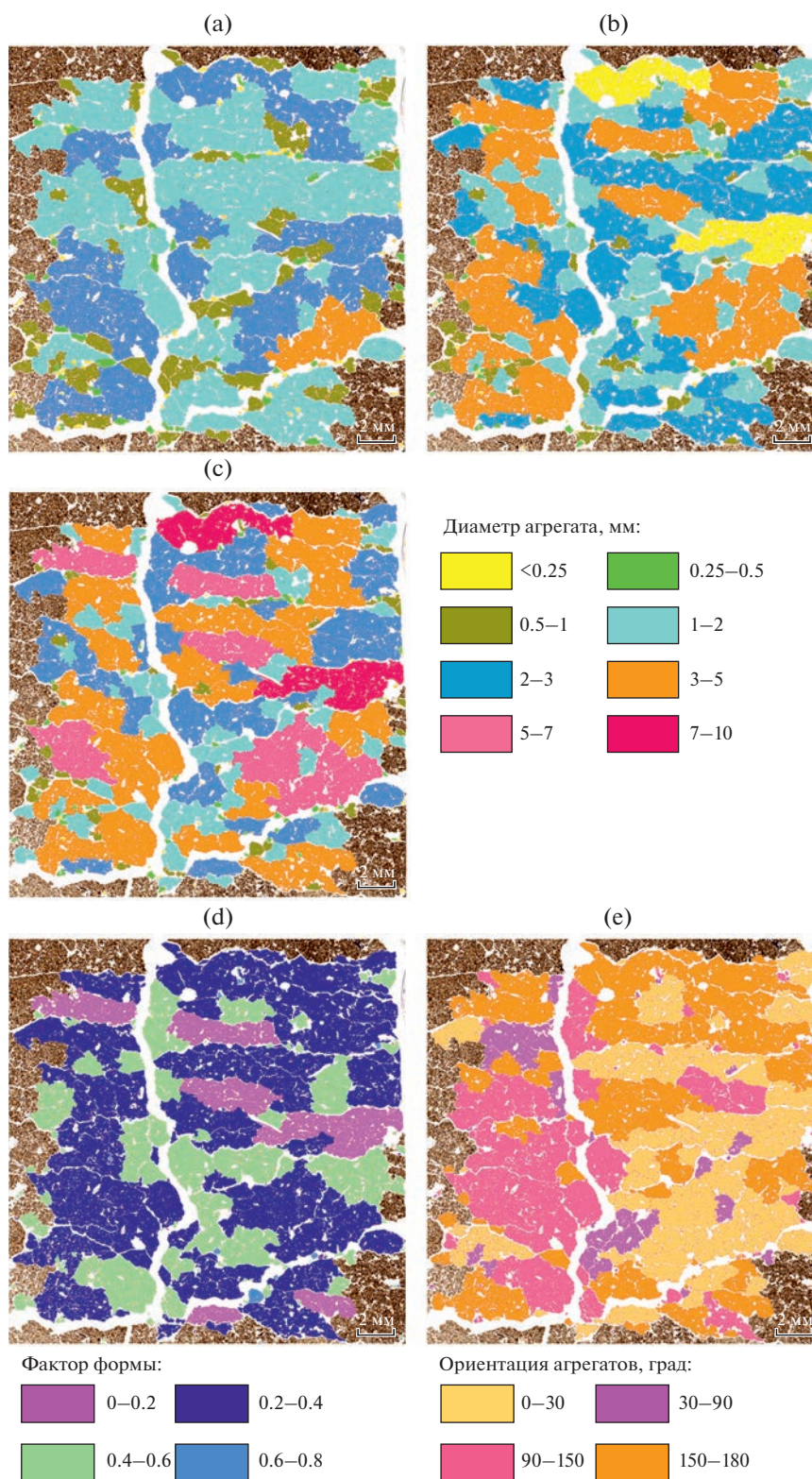


Рис. 3. Сегментированное в Thixomet Pro панорамное изображение шлифа из пахотного горизонта чернозема типичного (прямой посев, повторность 2): а, b, с – минимальный, средний и максимальный диаметр агрегатов соответственно; d – фактор формы; e – ориентация агрегатов.

Таблица 2. Доля площади агрегатов с различными значениями фактора формы от общей площади распознанных при анализе агрегатов, %; ТТ — традиционная технология возделывания, ПП — прямой посев

Вариант	Фактор формы				
	0–0.2	0.2–0.4	0.4–0.6	0.6–0.8	0.8–1.0
ПП-1	0.1	66.0	33.7	0.3	0
ПП-2	11.7	62.6	25.3	0.4	0
ТТ-1	0.04	46.50	51.00	2.40	0.09
ТТ-2	0.2	57.1	42.0	0.7	0
ПП (среднее)	5.9	64.3	29.5	0.3	0
ТТ (среднее)	0.1	51.8	46.5	1.6	0.0

вание (слипание) агрегатов в более крупные и водоустойчивые [25].

Эти результаты указывают на изменение структуры пахотного горизонта чернозема при возделывании зерновых культур в прямом посеве. Традиционная технология характеризуется меньшими по размерам агрегатами (<0.25, 0.25–0.5 и 0.5–1 мм), что можно связать с процессом разрушения более крупных агрегатов в процессе обработки. При прямом посеве в агрегатном составе, наоборот, преобладают агрономически ценные фракции, характерные для устойчивой структуры целинных почв.

Что касается фактора формы, то при обоих вариантах обработки почвы преобладают не округлые агрегаты (табл. 2, рис. 2d, 3d, 4d) — имеющие фактор формы в диапазонах 0.2–0.4 и 0.4–0.6. Однако на рис. 4d отчетливо видно, что при традиционной технологии распределение фактора формы агрегатов смещается в сторону увеличения его значений — появляются агрегаты с FF 0.6–0.8 (и 0.8–1). В то же время при прямом посеве явно преобладают вытянутые агрегаты с FF в диапазоне 0.2–0.4 и появляются агрегаты с FF в диапазоне 0–0.2 (рис. 4d).

При традиционной технологии агрегаты имеют форму, более близкую к окружности, что характерно для зернисто-порошистой (на макроуровне) структуры пахотных вариантов черноземов. При ТТ агрегаты имеют комковатую форму [1] в результате налипания на элементарные частицы и агрегаты почв округлой формы растительных остатков разной степени разложения, что характерно для гумусовых горизонтов черноземов. Уменьшение размера и округлые формы агрегатов в основном связаны с применяемыми в ТТ обработками почв, в процессе которых происходит механическое разрушение естественной структуры, что характеризуется как распыление структуры и/или ее деградация.

Фактор формы агрегатов находится в прямой связи с изменением традиционной агротехнологии на прямой посев, приводящий к: 1) изменению процесса формирования органического вещества на естественный с накоплением гумуса за счет разложения оставляемой на поверхности почв растительности [8] и уплотнению материала, 2) уменьшению доли сложных пор упаковки в поровом пространстве, 3) увеличению доли пор трещин и каналов и 4) формированию более водоустойчивой к разрушению структуры [25]. Также отмечено большое количество копролитов в результате деятельности дождевых червей [29], что наблюдается визуально при отборе образцов и описании морфологии почв.

Микрофометрический анализ показал, что ориентация агрегатов при прямом посеве связана с их формой, которая становится в отличие от варианта опыта с традиционной технологии менее округлой, вытянутой в одном направлении, т.е. форма агрегатов и их ориентация дополняют и обуславливают друг друга (табл. 3, рис. 2е, 3е). В среднем доля субгоризонтальных агрегатов составляет при прямом посеве 54%, против 34% при традиционной технологии. Различия, на наш взгляд, отражают тенденцию к формированию плитчатой структуры пахотного горизонта, которая может быть связана как с образованием ледяных шлиров [38] при промерзании почвы (как показано Романенко с соавт. [19] для целинного чернозема Центрально-черноземной зоны), так и с уплотнением почвы при проходе техники во время посева в отсутствие дальнейшего культивирования и рыхления. Вместе с тем полученные результаты отражают определенную тенденцию в формировании плитчатой структуры (табл. 4), которая сохраняется и при более длительном (28 лет) и интенсивном использовании почв в системе no-till, но при этом не сказывается негативно на уро-

Таблица 3. Доля площади агрегатов различной ориентации от общей площади распознанных при анализе агрегатов, %; ТТ – традиционная технология возделывания, ПП – прямой посев

Вариант	Ориентация, град				Субгоризонтальные	Субвертикальные
	0–30	30–90	90–150	150–180		
ПП-1	17.0	28.0	31.1	23.9	40.9	59.1
ПП-2	31.4	6.8	25.6	36.2	67.6	32.4
ТТ-1	17.3	36.0	31.5	15.2	32.5	67.5
ТТ-2	17.4	31.7	32.5	18.3	35.7	64.2
ПП (среднее)					54.3	45.8
ТТ (среднее)					34.1	65.9

жайности возделываемых культур (кукуруза, пшеница, соя) [28].

Таким образом, в прямом посеве с изменением размерности агрегатов и их формы отмечается преобладание в микростроении типичного чернозема агрегатов субгоризонтальной ориентации. Это является количественным подтверждением отмеченной при исследовании традиционным микроморфологическим методом тенденции к образованию плитчатой микроструктуры почв памп Аргентины [28], черноземов типичных [1], уплотнения чернозема обыкновенного [5] и других почв, на которых применялась технология прямого посева [31].

Формирование уплотнения при прямом посеве в черноземных почвах отмечалось в отечественном земледелии в качестве негативного фактора [15, 18, 26]. В определенной степени на этом было основано негативное отношение к прямому посеву как агротехнологии нового поколения. Однако исследования на опытных полях в разных зонально-провинциальных условиях формирования черноземов показали, что степень уплотнения не превышает оптимальные нормативы для данных почв [5, 12]. Равновесная плотность слабо варьирует в течение вегетационного периода [11] и при более длительном использовании прямого посева стабилизируется за счет разрыхляющего влияния корневых систем растений, применяемых в севообороте, а также покровных культур в периоды между уборкой и посевом, занимающие по времени до нескольких месяцев. В результате почва круглый год находится в естественном «рабочем режиме» с минимальным уплотнением техникой при посеве и уборке урожая.

Преобладание субгоризонтальных агрегатов неразрывно связано с формированием субгоризонтальных пор. Это можно рассматривать как положительный фактор, способствующий накоплению и удержанию влаги в поверхностном слое,

что особенно важно в засушливых условиях возделывания культур [6, 10, 35, 39]. Практические наблюдения и аналитические материалы показывают, что при правильном использовании прямого посева, когда севооборот включает растения с мочковатой и стержневой корневой системой, формирование субгоризонтальной пористости почв является своеобразной страховочной системой, препятствующей вертикальной фильтрации влаги вглубь профиля. Это является важным позитивным фактором накопления доступной для растений влаги в вегетационный период.

По данным предварительного томографического исследования, при возделывании сельскохозяйственных культур в черноземе типичном резко уменьшается доля открытых пор. Если в целинном варианте открытая пористость 34.95% [1], то в варианте с традиционной обработкой – 21.64%, а в варианте с прямым посевом – всего 2.53%. По этому показателю чернозем в варианте с прямым посевом приближается к горизонту А экранированного чернозема [4] или горизонту А2 дерново-подзолистой почвы [22]. Реконструкция структуры порового пространства по данным компьютерной томографии показывает его значительную фрагментацию на мезоуровне структурной организации в варианте с прямым посевом. Это подтверждается уменьшением показателей открытой пористости, резким увеличением закрытой, а также сильным уменьшением показателя связности порового пространства – до средних значений 30–35% по сравнению с 85% для традиционной обработки и 98% для целинных черноземов. В выбранных областях исследования объемом 500 мм³ в варианте прямого посева закрытой пористости значительно в 4–5 раз больше, чем в варианте традиционной технологии. В образцах из одной выборки наблюдается значительная вариабельность показателей при сохранении общей негативной тенденции для варианта прямого посева.

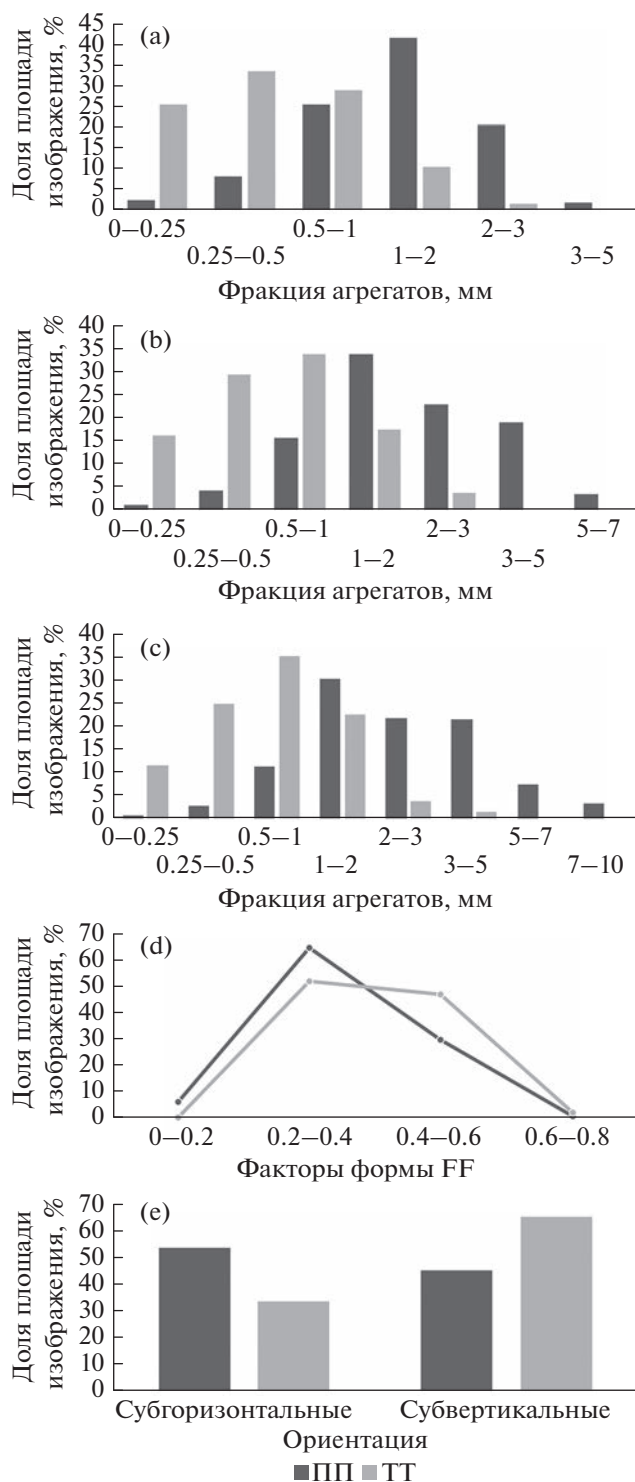


Рис. 4. Графики распределения минимального (а), среднего (б) и максимального (с) диаметра, фактора формы (д) и ориентации (е) агрегатов по фракциям на панорамных снимках шлифов пахотного горизонта чернозема типичного при различных технологиях обработки: традиционной (ТТ) и прямом посеве (ПП).

Совокупность этих факторов указывает как на значительное поверхностное уплотнение для варианта прямого посева, так и на сильную пространственную неоднородность структуры порового пространства. Однако, чтобы сделать более обоснованные выводы о причине выявленного состояния порового пространства и влиянии на него прямого посева, необходимы дальнейшие исследования характера формы отдельных пор и их взаимного расположения в почве, а также гидрологической функции почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Микроморфологический анализ шлифов с использованием ПО Thixomet Pro выявил различия микростроения типичных черноземов в размерности фракций, форме и ориентации агрегатов, связанные с использованием в зерновом севообороте двух различных агротехнологий, применяющих обработку почв — вспашку с оборотом пласта и не применяющих ее (прямой посев, no-till). В черноземе варианта прямой посев агрегаты в целом более крупные, что отмечается при сравнении с агрегатами чернозема варианта традиционной обработки на всех уровнях: как минимального, так и среднего, и максимального диаметров агрегатов. Показано, что при прямом посеве формируются менее округлые и изометричные агрегаты, а доля субгоризонтально залегающих агрегатов по сравнению с традиционной обработкой повышена, что приводит к восстановлению естественного режима увлажнения верхнего слоя почв. В этом случае межагрегатная пористость и поры внутри агрегатов работают в режиме страхования агроэкосистемы: при избытке увлажнения преобладает вертикальная фильтрация излишков, а при недостатке субгоризонтальные поры, формирующиеся наряду с субгоризонтальными агрегатами, способствуют накоплению и удержанию влаги в почве. Подспорьем в этом процессе может являться специфический минералогический состав чернозема, способствующий набуханию—усадке тонкодисперсного вещества при смене режима увлажнения.

Учет выявленных тенденций в изменении микростроения типичных черноземов при смене агротехнологии дает основу для планирования и регионального использования прямого посева в условиях меняющегося климата, резких колебаний метеоусловий во времени и пространстве, т.е. с ориентацией на текущее состояние территории. Однако важным аспектом дальнейших исследований в этой области является необходимость увеличения количества повторностей, что позволит избежать неверной интерпретации получаемых данных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X22601438>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Ермолаев Н.Р., Лебедева М.П., Абросимов К.Н., Борисочкина Т.И., Воронин А.Я., Плотникова О.О. Чернозем типичный. Прямой посев, Курская область. Опыт, ротация 1.1. М.: ГЕОС, 2021. 128 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.16.37873>
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство) / Под ред. Эдельгериева Р.С.-Х. Т. 2. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
4. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Абросимов К.Н., Скворцова Е.Б., Тагивердиев С.С., Морозов И.В. Физические свойства почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2016. № 8. С. 964–974. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16060034>
5. Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Матвеев А.Г. Влияние типа почвы и ее плотности на урожайность озимой пшеницы, возделываемой по технологии No-till в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 2. С. 19–22.
6. Дридигер В.К., Невечеря А.Ф., Токарев И.Д., Вайцеховская С.С. Экономическая эффективность технологии No-till в засушливой зоне Ставропольского края // Земледелие. 2017. № 3. С. 16–19.
7. Дридигер В.К. Особенности проведения научных исследований по минимизации обработки почвы и прямому посеву (методические рекомендации). Ставрополь: Северо-Кавказский ФНАЦ, 2020. 68 с.
8. Дридигер В.К., Белобров В.П., Антонов С.А., Юдин С.А., Гаджиумаров Р.Г., Лиходиевская С.А., Ермолаев Н.Р. Защита почв от водной эрозии и дефляции в технологии No-Till // Земледелие. 2020. № 6. С. 11–17.
9. Дридигер В.К., Иванов А.Л., Белобров В.П., Кутовая О.В. Восстановление свойств почв в технологии прямого посева // Почвоведение. 2020. № 9 С. 1111–1120. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20090038>
10. Дубовик Д.В., Лазарев В.И., Айдиев А.Я., Ильин Б.С. Эффективность различных способов основной обработки почвы и прямого посева при возделывании озимой пшеницы на черноземных почвах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 12. С. 26–29. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11206>
11. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В., Шумаков А.В. Влияние приемов основной обработки почвы на макроструктуру чернозема типичного // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1195–1206. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100051>
12. Ермолаев Н.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.И., Ильин Б.С. Вариабельность плотности типичных черноземов при использовании прямого посева // Сельскохозяйственный журн. 2021. № 1(14). С. 14–20. <https://doi.org/10.25930/2687-1254/002.1.14.2021>
13. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 107. С. 5–32. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32>
14. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н. Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 108. С. 175–218. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-108-175-218>
15. Кирюшин В.И. Проблема минимизации обработки почвы: перспективы развития и задачи исследования // Земледелие. 2013. № 7. С. 3–6.
16. Кирюшин В.И., Дридигер В.К., Власенко А.Н., Власенко Н.Г., Козлов Д.Н., Кирюшин С.В., Конищев А.А. Методические рекомендации по разработке минимальных систем обработки почвы и прямого посева. М.: Изд-во МБА, 2019. 136 с.
17. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
18. Реестр индикаторов качества почв сельскохозяйственных угодий Российской Федерации. Версия 1.0. Иваново: ПресСТО, 2021. 260 с. <https://doi.org/10.51961/9785604637401>
19. Романенко К.А., Абросимов К.Н., Курчатова А.Н., Рогов В.В. Опыт применения рентгеновской компьютерной томографии в исследовании микростроения мерзлых пород и почв // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 4. С. 75–81. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4\(75-81\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-4(75-81))
20. Скворцова Е.Б. Строение порового пространства естественных и антропогенно измененных почв. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 1999. 50 с.
21. Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р. Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49–56.
22. Хайдапова Д.Д., Ключева В.В., Скворцова Е.Б., Абросимов К.Н. Характеристики реологических свойств и томографически определенного порового пространства ненарушенных образцов черноземов типичных и дерново-подзолистых почв // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1195–1206. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100051>

- дение. 2018. № 10. С. 1234–1243.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18100064>
23. Холодов В.А. Механизмы восстановления структуры и органического вещества гумусовых горизонтов почв на разных уровнях иерархической организации. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 2020. 45 с.
 24. Холодов В.А., Ярославцева Н.В. Агрегаты и органическое вещество почв восстанавливающихся ценозов. М.: ГЕОС. 2021. 119 с.
 25. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Лазарев В.И., Фрид А.С. Интерпретация данных агрегатного состава типичных черноземов разного вида использования методами кластерного анализа и главных компонент // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1093–1100.
 26. Черкасов Г.Н., Пыхтин И.Г., Гостев А.В., Нитченко Л.Б., Плотников В.А., Ильина Г.П., Гапонова Л.П. Теоретические основы формирования агротехнологической политики применения нулевых и поверхностных обработок почвы под зерновые культуры для модернизации земледелия. Курск, 2012. 74 с.
 27. Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2005. 432 с.
 28. Behrends Kraemer F., Morrás H.J.M. Macroporosity of a Typic Argiudoll with different cropping intensity under no-tillage // Spanish J. Soil Sci. 2018. V. 8 P. 214–235.
<https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N2.06>
 29. Castellanos-Navarrete A., Rodriguez-Aragones C., De Goede R.G.M., Kooistra M.J., Sayre K.D., Brussaard L., Pulleman M.M. Earthworm activity and soil structural changes under conservation agriculture in central Mexico // Soil Till. Res. 2012. V. 123. P. 61–70.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.011>
 30. Derpsch R., Friedrich T., Kassam A., Li H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. // Int. J. Agricultural Biological Engineer. 2010. V. 3. № 1. P. 1–26.
<https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>
 31. Filipovic D., Husnjak S., Kosutic S., Gospodaric Z. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia // J. Terramechanics. 2006. V. 43. P. 177–189.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.04.002>
 32. Kubiena W.L. Die mikromorphometrische Bodenanalyse. Stuttgart: Enke, 1967. 188 p.
 33. Mangalassery S., Sjögersten S., Sparkes D.L., Mooney S.J. Examining the potential for climate change mitigation from zero tillage // J. Agr. Sci. 2015. V. 153. № 7. P. 1151–1173.
<https://doi.org/10.1017/S0021859614001002>
 34. Stoops G. Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections // Soil Sci. Soc. Am. Wisconsin, 2021. 240 p.
 35. Su Z., Zhang J., Wu W., Cai D., Lv J., Jiang G., Huang J., Gao J., Hartmann R., Gabriels D. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China // Agr. Water Manage. 2007. V. 87. P. 307–314.
 36. Thixome. (19.07.2021). Программное обеспечение для анализа изображений Тиксомет.
<https://thixomet.ru/products/#pro>
 37. Vanden Bygaart A.J., Protz R., Tomlin A.D. Changes in pore structure in a no-till chronosequence of silt loam soils, southern Ontario // Can. J. Soil Sci. 1999. V. 79. P. 149–160.
 38. Van Vliet-Lanoë B., Fox C.A. Chapter 20 – Frost Action // Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. 2018. P. 575–603.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00020-6>
 39. Verhulst N., Nelissen V., Jespers N., Haven H., Sayre K.D., Raes D., Deckers J., Govaerts B. Soil water content, maize yield and its stability as affected by tillage and crop residue management in rainfed semiarid highlands // Plant and Soil. 2011. V. 344. № 1. P. 73–85.
 40. World Reference Base for Soil Resources 2014. update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2015. No. 106.
 41. Zhang S., Li Q., Zhang X., Wei K., Chen L., Liang W. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China // Soil Till. Res. 2012. V. 124. P. 196–202.

Quantitative Characteristics of the Microstructure of Typical Chernozems Using Different Agricultural Technologies

S. A. Yudin¹*, O. O. Plotnikova¹, V. P. Belobrov¹, M. P. Lebedeva¹,
 K. N. Abrosimov¹, and N. R. Ermolaev¹

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: yudin_sa@esoil.ru

The methodological possibilities of micromorphological soil research making it possible to analyze digital images of soil thin sections at a quantitative level are presented in this study. A new software Thixomet Pro has been tested for quantitative micromorphological study of soil on the example of soil thin sections from the surface horizons of Haplic Chernozem. Soil samples for preparing thin sections were collected on the territory of scientific and industrial field test plot for assessing the impact of agro technologies in grain crop rotation on soil properties (Kursk region, Russia). In the field test plot, conventional agro technology (real tillage)

and no-till are compared. Soil sampling was carried out in two replications from depth of 10–15 cm. The analysis revealed the variability of microstructure of Haplic Chernozem in the size, shape and orientation of aggregates associated with the use of agricultural technologies with and without plowing in grain crop rotation. In the Chernozem with no-till, aggregates are generally larger compared to the aggregates of Chernozem with conventional agro technology. This is noted at all levels of comparison of direct seeding and conventional agricultural technology: in the minimum diameter, the fraction 1–2 mm prevails against 0.25–0.5 mm, respectively, in the average diameter, fractions 1–2, 2–3 and 3–5 mm prevail against 0.5–1 and 0.25–0.5 mm, respectively, in the maximum diameter, fractions 1–2, 2–3 and 3–5 mm prevail against 0.5–1, 0.25–0.5 and 1–2 mm, respectively. It is also shown that less rounded and isometric aggregates are formed during direct seeding. With direct seeding, the proportion of aggregates with a form factor of 0.2–0.4 is higher and the proportion of aggregates with a form factor of 0.4–0.6 is lower than with traditional technology. The proportion of subhorizontal aggregates in direct seeding is higher compared to traditional processing (54.3 and 34.1% respectively).

Keywords: micromorphology, soil morphometry, typical chernozem, direct seeding, no tillage