

УДК 631.51:631:434

## ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОВ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ НА МАКРОСТРУКТУРУ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО

© 2021 г. Е. В. Дубовик<sup>а</sup>, \*, Д. В. Дубовик<sup>а</sup>, А. В. Шумаков<sup>а</sup><sup>а</sup>Курский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70б, Курск, 305021 Россия

\*e-mail: dubovikdm@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Изучено изменение структурного состояния чернозема типичного (Haplic Chernozems) при различных приемах обработки почвы (вспашке, комбинированной обработке, поверхностной обработке, No-till) в Центральном-Черноземном районе (Курская область). Использован способ интерпретации данных макроструктурного (сухое и мокрое просеивание) состояния почвы. На основании одновременного применения двух сопряженных видов анализа дана характеристика изменения средневзвешенного диаметра сухих и водостойчивых агрегатов, энтропия их распределения, средневзвешенного диаметра агрегатов, разрушающихся при более жестком воздействии и частиц, на которые распадаются эти агрегаты, а также содержание стабильных агрегатов и их средневзвешенный диаметр. Установлен рост средневзвешенного диаметра агрегатов при сухом и мокром просеивании при минимизации основной обработки почвы. При этом вспашка на глубину 20–22 см способствовала уменьшению средневзвешенного диаметра агрегатов, разрушающихся при более жестком воздействии и частиц, на которые распадаются эти агрегаты. В то же время отмечено, что минимизация обработки почвы приводит к увеличению средневзвешенного диаметра стабильных агрегатов. Энтропия распределения агрегатов как после сухого, так и после мокрого просеивания определялась сроками изучения и глубиной обработки почвы. Проанализирована взаимосвязь суммы водостойчивых агрегатов по Саввинову и по показателю неустойчивости к разрушению при увлажнении. Установлено, что независимо от приема обработки и изучаемого слоя перед посевом культуры, а также в период ее уборки в вариантах с применением вспашки, поверхностной и комбинированной обработок чернозем типичный имел среднее качество структуры и относился к классу III. Прямое посевное приводит к увеличению способности перевода почвенной структуры в слое 0–10 см из среднего качества структуры (класс III) в почвенную структуру хорошего качества (класс IV). Полученные результаты исследований могут быть использованы при оценке применения ресурсосберегающих способов обработки почвы.

**Ключевые слова:** Haplic Chernozems, обработка почвы, структура почвы, средневзвешенный диаметр агрегатов, энтропия

**DOI:** 10.31857/S0032180X21100051

### ВВЕДЕНИЕ

В системе земледелия одним из важных агроприемов является основная обработка почвы. При механическом воздействии на почву изменяются ее агрофизические, агрохимические, физико-химические и биологические свойства [2, 12]. Почвообрабатывающие орудия при соприкосновении с почвой в первую очередь вызывают изменения почвенной структуры [4, 13], часто ее ухудшение [15]. При этом уменьшение интенсивности основной обработки почвы не оказывает положительного влияния на структурно-агрегатный состав по сравнению со вспашкой [15].

Для верхних гумусовых горизонтов структура почвы определяет ее важнейшее свойство — устой-

чивость к неблагоприятным факторам окружающей среды, в частности проявлению эрозионных процессов. На почвах, подверженных эрозии, предлагается минимизировать основную обработку [7, 9] вплоть до полного отказа от нее [22]. При минимизации обработки почвы по сравнению с приемами глубокой обработки на поверхности почвы сохраняются растительные остатки и стерня, способствующие сохранению влаги [23], улучшению почвенной структуры [20, 25], повышению водостойчивости и водопроницаемости [21]. Особое место в ряду минимизации обработок почвы принадлежит прямому посеву. Прямой посев возвращает почву в состояние, близкое естественному [10, 24]. При применении прямого посева на типичных черноземах отмечается улучшение

макроструктурного состояния как при распределении структурных отдельностей, так и по отношению к их водоустойчивости. В то же время на других подтипах чернозема, обыкновенных и южных, показатели, характеризующие структурное состояние, были больше при применении вспашки с оборотом пласта, чем при прямом посеве, а показатели водоустойчивости, наоборот [1].

Но при прямом посеве возникают определенные трудности: ухудшение фитосанитарной ситуации в посевах, уплотнение почвы, уменьшение запасов нитратного азота, риск сокращения урожайности [18]. Влияние структурно-агрегатного состава почвы на растения происходит опосредованно – через формирование благоприятного водного, воздушного, питательного, теплового режимов [19].

Изучение различных приемов обработки почвы на ее структурное состояние весьма актуально, ведь агрегация является одним из ключевых механизмов физической стабилизации почвы. Вместе с этим возникает вопрос объективной оценки показателей, которые отражают устойчивость или изменение структурного состояния при переходе из одних условий в другие (из воздушно-сухого состояния в водоустойчивое).

Традиционные методы оценки структурно-агрегатного состояния, как правило, характеризуют содержание агрегатов определенных размеров и отличающихся друг от друга граничными значениями диаметра агрегатов. При этом оценка проводится по одной или сумме нескольких фракций без учета содержания других фракций макроструктуры. Например, при оценке критерия водоустойчивости, предложенного АФИ, рассматривается соотношение количества агрегатов 1–0.25 мм при мокром и сухом просеивании, выраженное в процентах [5]. К агрономически ценным агрегатам Воронин относит частицы размером 5–0.25 мм [6], Шейн и Карпачевский [14], Кирюшин [11] – 10–0.25 мм. Холодов с соавт. [17] считают, что достаточно изучать 5 фракций (>10, 10–2, 2–1, 1–0.25 и <0.25 мм), при этом они объединяют агрегаты размером 7, 5, 3 мм в одну группу и не выделяют агрегаты 0.5 мм.

В настоящей статье представлена оценка макроструктурного состояния с одновременным использованием двух сопряженных видов структурного анализа (сухое и мокрое просеивание), которая характеризует один и тот же образец почвы в различных условиях: воздушно-сухое состояние и водоустойчивое [16]. При этом можно получить более полную информацию о распределении частиц по размеру и оценить устойчивость или изменчивость структурного состояния при определенном приеме обработки почвы. В данном методе для оценки структурного состояния используется энтропия ( $H_c$ ,  $H_m$ ,  $H^+$ ,  $H^-$ ), которая характеризует

дифференциацию распределения содержания агрегатов по разным фракциям двух видов структурного анализа (сухое и мокрое просеивание). Если все агрегаты будут одной фракции, то энтропия будет равна 0. По мере выравнивания содержания разных фракций энтропия будет возрастать и достигнет максимального значения при равномерном распределении. При сопоставлении показателей структурно-агрегатного состояния с энтропией получим характеристику отклонений в распределении частиц по размеру.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в полевом стационарном опыте ФГБНУ “Курский федеральный аграрный научный центр” (Курская область, Курский район, п. Черемушки, 51°37'46" N; 36°15'40" E) в четырехпольном севообороте. Севооборот развернут в пространстве четырьмя полями, со следующим чередованием культур: горох–озимая пшеница–soя–ячмень. Схема опыта включала следующие варианты: вспашка с оборотом пласта (20–22 см), комбинированная обработка (дискование 8–10 см + чизель 20–22 см), поверхностная обработка (дискование) до 8 см, прямой посев (No-till). Вариант No-till осуществляли без какой-либо обработки почвы, сеялкой прямого посева Дон 114. Приемы обработки почвы применяли систематически с 2015 г. для всех четырех полей. Варианты в полевом опыте размещали систематически в один ярус. Площадь посевной делянки 6000 м<sup>2</sup> (60 × 100), повторность вариантов обработки почвы трехкратная. В 2020 г. начата вторая ротация севооборота.

Технология возделывания гороха (сорт Кадет) общепринятая для региона и по вариантам не различалась, за исключением основной обработки почвы. Особое внимание уделяли технологии прямого посева. Учитывали, что она начинает действовать не ранее четвертого года систематического применения [8].

Объектом изучения являлся чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый (Haplic Chernozems). Среднее содержание в пахотном слое по четырем полям гумуса составило 5.1%, щелочно-гидролизующего азота – 15.4 мг/100 г почвы, подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – 20.1 и 13.1 мг/100 г почвы соответственно. Реакция почвенной среды слабокислая (рН<sub>KCl</sub> 5.4).

Отбор образцов проводили в 2019–2020 гг. весной (апрель) перед посевом культуры и в период ее уборки (июль). Для изучения структурно-агрегатного состава чернозема типичного на всех вариантах опыта из каждой повторности (трехкратная повторность варианта) отобрали образцы ненарушенного сложения почвы размером 25 × 25 × 10 см в трехкратной повторности из каждого слоя 0–10

и 10–20 см (72 образца), что обусловлено различной глубиной обработки почвы. По диагонали делянки выбрали 3 площадки радиусом 5 м, в пределах которого проводили отбор образцов. Для точного совпадения мест отбора перед посевом и в период уборки фиксировали реперные участки. Образцы высушивали до воздушно-сухого состояния. Структурно-агрегатный состав определяли методом Саввинова: сухое и мокрое просеивание [5].

Полученные результаты обрабатывали способом интерпретации данных макро- и микроструктурного состояния почвы по следующим показателям [16]:

Средневзвешенный диаметр частиц по результатам сухого ( $D_c$ ) и мокрого ( $D_m$ ) просеивания, мм:

$$D_c = \frac{\sum d_i a_i}{\sum a_i}, \quad (1)$$

$$D_m = \frac{\sum d_i b_i}{\sum b_i}, \quad (2)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  – содержание  $i$ -ой фракций агрегатов сухого ( $a$ ) и мокрого ( $b$ ) просеивания, которые имеют диаметр от  $d_{i,\min}$  до  $d_{i,\max}$ , %;  $d_i = (d_{i,\min} - d_{i,\max})/2$  – средний диаметр агрегатов  $i$ -ой фракций, мм.

Энтропия распределения содержания агрегатов при сухом ( $H_c$ ) и мокром ( $H_m$ ) просеивании:

$$H_c = -\left(\frac{1}{100 \ln 2}\right) \sum a_i \ln \left(\frac{a_i}{100}\right), \quad (3)$$

$$H_m = -\left(\frac{1}{100 \ln 2}\right) \sum a_i \ln \left(\frac{b_i}{100}\right). \quad (4)$$

Средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), при условии, когда  $Z_i = a_i - b_i > 0$ , где  $a_i$  и  $b_i$  – содержание частиц  $i$ -ой фракции двух сопряженных анализов, в нашем случае для сухого и мокрого просеивания, мм:

$$D^+ = \frac{\sum d_i Z_i}{\sum Z_i}. \quad (5)$$

Энтропия ( $H^+$ ) распределения содержания агрегатов со средневзвешенным диаметром  $D^+$ :

$$H^+ = -\left(\frac{1}{(\sum Z_i) \ln 2}\right) \sum Z_i \ln \left(\frac{Z_i}{\sum Z_i}\right). \quad (6)$$

Средневзвешенный диаметр частиц, на которые распадаются агрегаты, имеющие средневзвешенный диаметр  $D^+$ , при увлажнении ( $D^-$ ), при условии  $Z_i < 0$ , мм:

$$D^- = \frac{\sum d_i |Z_i|}{\sum |Z_i|}. \quad (7)$$

Энтропия ( $H^-$ ) распределения содержания агрегатов со средневзвешенным диаметром  $D^-$ :

$$H^- = -\left(\frac{1}{(\sum |Z_i|) \ln 2}\right) \sum |Z_i| \ln \left(\frac{|Z_i|}{\sum |Z_i|}\right). \quad (8)$$

Количество агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $S$ ), %;

$$S = \sum Z_i \text{ при } Z_i > 0. \quad (9)$$

Количество стабильных агрегатов ( $S_s$ ), %:

$$S_s = 100 - S. \quad (10)$$

Средневзвешенный диаметр стабильных агрегатов ( $D_s$ ), мм:

$$D_s = \frac{\sum d_i Y_i}{\sum Y_i}, \quad (11)$$

где  $Y_i$  – содержание стабильных агрегатов  $i$ -ой фракции (%), при условии;

$$Y_i = \begin{cases} c_i & \text{при } Z_i \geq 0 \\ b_i & \text{при } Z_i < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Неустойчивость почвенной структуры к разрушению при увлажнении ( $R_{ws}$ ):

$$R_{ws} = \sqrt{K^2 (D_i - D_j)^2 + (H_i - H_j)^2}, \quad (13)$$

где индексы  $i$  и  $j$  относятся к двум видам анализа (сухое и мокрое просеивание);  $K$  – масштабный коэффициент (размерность 1/мм), для сухого и мокрого просеивания по Саввинову  $K = 1$ .

Сумма водоустойчивых агрегатов по Саввинову ( $S_m$ ), %:

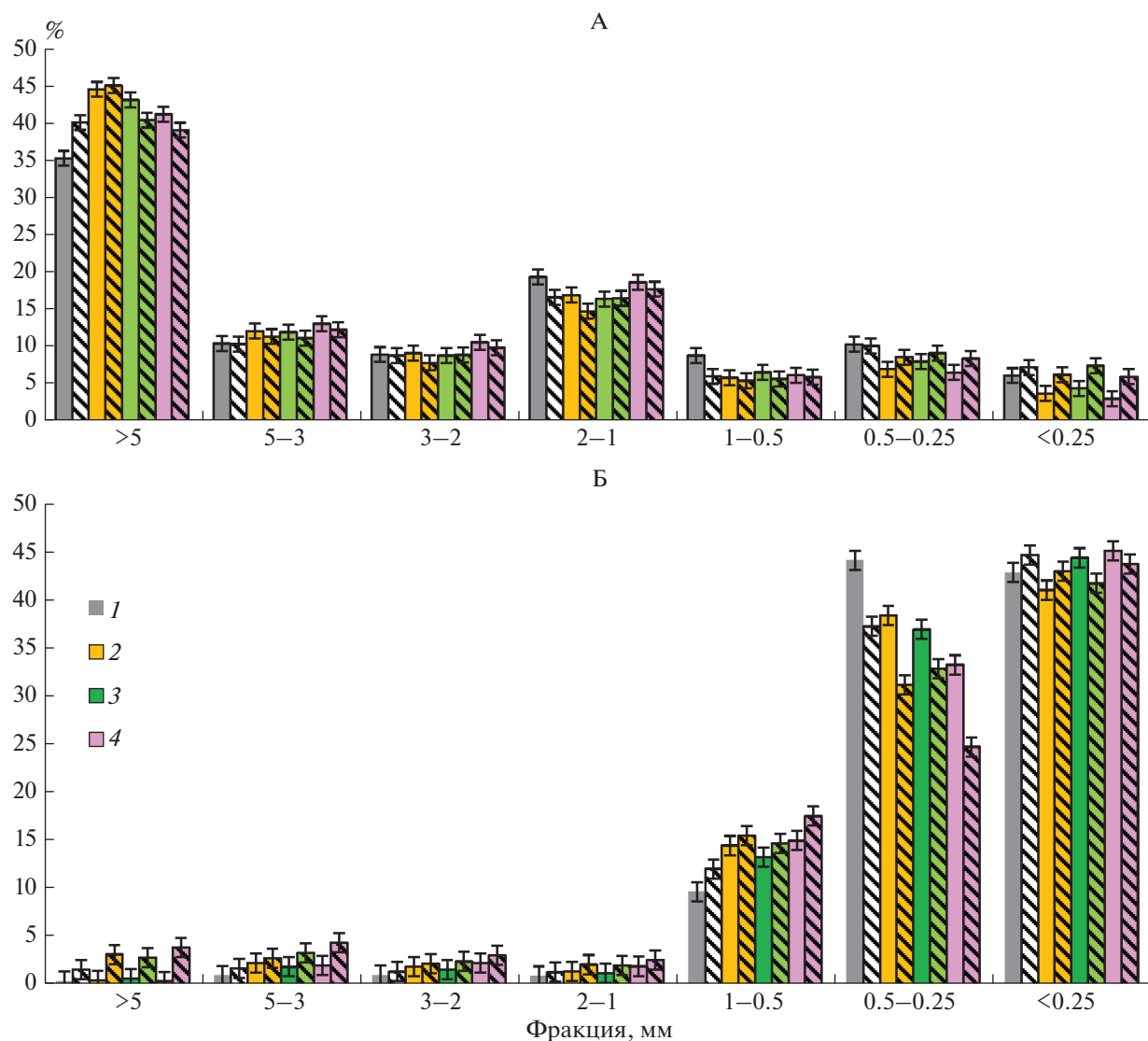
$$S_m = \sum b_i > 0.25 \text{ мм}. \quad (14)$$

Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Microsoft Excel, Statistica.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение по размерам структурных отдельных частей после сухого и мокрого просеивания при различных приемах обработки почвы в слое 0–20 см представлено на рис. 1. Общей закономерностью независимо от приема обработки почвы и срока отбора в черноземе типичном является наибольшее количество воздушно-сухих агрегатов >5 мм (35–45%) и фракций <0.5 мм (25–45%), полученных после мокрого просеивания.

Установлено, что перед посевом гороха в варианте со вспашкой средневзвешенный диаметр агрегатов при сухом ( $D_c$ ) и мокром ( $D_m$ ) просеивании был наименьшим и составлял в слое почвы 0–10 см 3.01 и 0.39 мм, а в слое 10–20 см – 3.34 и 0.40 мм соответственно (рис. 2). Минимизация обработки почвы способствовала увеличению



**Рис. 1.** Распределение структурных отдельностей чернозема типичного после сухого (А) и мокрого (Б) просеивания при различных приемах обработки почвы в слое 0–20 см: 1 – вспашка, 2 – комбинированная перед посевом, 3 – поверхностная перед посевом, 4 – нулевая (перед посевом – пустое поле, после уборки – штриховка).

показателей  $D_c$  и  $D_m$  в следующей последовательности в слое 0–10 см: комбинированная обработка (3.50 и 0.43 мм) → поверхностная обработка (3.54 и 0.43 мм) → прямой посев (No-till) (3.76 и 0.51 мм); в слое 10–20 см: прямой посев (No-till) (3.50 и 0.45 мм) → поверхностная обработка (3.72 и 0.51 мм) → комбинированная обработка (3.95 и 0.55 мм). В результате проведенного статистического анализа установлены существенные различия  $D_c$  и  $D_m$  при уровне вероятности  $P = 0.95$  перед посевом гороха. При сравнении приемов обработки почвы с прямым посевом  $НСР_{05} = 0.36$  и  $0.05$ , а по слоям почвы 0.25 и 0.04.

Таким образом, минимизация обработки почвы способствовала росту средневзвешенного диаметра агрегатов как при сухом, так и при мокром

просеивании. Это говорит о преобладающей роли агрегатов с большим диаметром в анализируемых фракциях, которые не разрушаются при переходе из одного состояния в другое (при проведении мокрого просеивания).

После уборки гороха в слое 0–10 см средневзвешенный диаметр агрегатов при сухом просеивании при вспашке и комбинированной обработке был больше на 34% по сравнению с поверхностной обработкой и прямым посевом. При этом средневзвешенный диаметр агрегатов ( $D_m$ ) при мокром просеивании в слое 0–10 см при прямом посеве (No-till) был преобладающим (0.80 мм) и уменьшался в ряду: комбинированная обработка (0.65 мм) → поверхностная обработка (0.58 мм) → вспашка (0.44 мм).

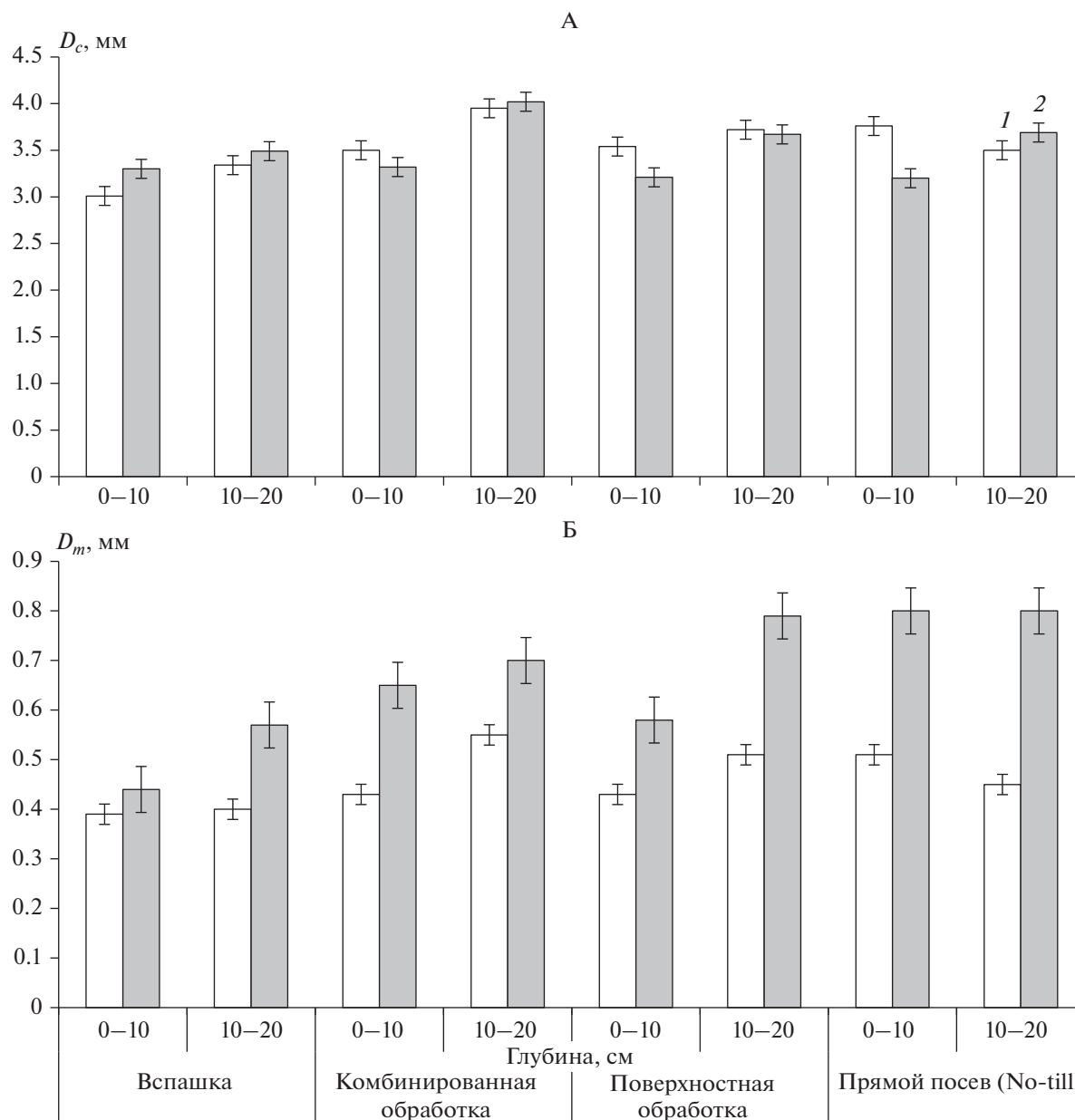


Рис. 2. Средневзвешенный диаметр сухих агрегатов ( $D_c$ ) (А) и агрегатов, сохраняющихся при увлажнении ( $D_m$ ), (Б) чернозема типичного при различных приемах обработки почвы: 1 – перед посевом гороха, 2 – после уборки, разбросом показано стандартное отклонение.

В слое 10–20 см при минимизации обработки почвы увеличивался средневзвешенный диаметр агрегатов как после сухого, так и после мокрого просеивания, а  $D_c$  и  $D_m$  составляли в среднем 4.02–3.69 и 0.80–0.70 мм соответственно. В варианте со вспашкой отмечалось формирование агрегатов с наименьшими средневзвешенными диаметрами  $D_c$  и  $D_m$  (3.49 и 0.57 мм).

Полученные закономерности подтверждаются статистической достоверностью  $D_c$  и  $D_m$  после уборки гороха в зависимости от слоя почвы ( $НСР_{05} = 0.25$  и 0.09), а для приема обработки до-

стоверные различия характерны только для  $D_m$  ( $НСР_{05} = 0.13$ ).

Средневзвешенный диаметр сухих и водостойчивых агрегатов является общеизвестным показателем, который используют для оценки структурного состояния, что позволяет сравнить показатели с результатами других исследователей. Полученные данные о преобладании агрегатов наибольшего диаметра как после сухого, так и после мокрого просеивания при применении минимизации обработки почвы согласуются с данными Трофимовой [15]. Она указывает на рез-

**Таблица 1.** Энтропия распределения содержания агрегатов при сухом и мокром просеивании по Саввинову при различных приемах обработки почвы

Обработка	Глубина, см	Перед посевом		После уборки	
		$H_c$	$H_m$	$H_c$	$H_m$
Вспашка	0–10	2.59	1.61	2.50	1.66
	10–20	2.49	1.58	2.45	1.88
Комбинированная	0–10	2.43	1.70	2.49	1.89
	10–20	2.22	1.91	2.20	2.07
Поверхностная	0–10	2.43	1.70	2.54	1.84
	10–20	2.34	1.82	2.36	2.14
Нулевая	0–10	2.45	1.86	2.56	2.11
	10–20	2.30	1.79	2.36	2.12

НСР<sub>05</sub>:для фактора “обработка” перед посевом  $H_c - 0.13$ ;  $H_m - 0.15$ , после уборки  $H_m - 0.11$ ;для фактора “глубина” перед посевом  $H_c - 0.09$ ; после уборки  $H_c - 0.11$ ;  $H_m - 0.08$ 

кое увеличение содержания глыбистой фракции в обыкновенном черноземе до 40–51%, что приводит к увеличению диаметра агрегатов. Белобров с соавт. [1] при сравнении вспашки и прямого посева приводят близкие данные по средневзвешенному диаметру сухих агрегатов (3.8 и 4.0 мм). При этом они приводят данный показатель водоустойчивых агрегатов не для среднего образца по Саввинову, а для отдельных фракций (>10, 10–7, 7–5 и 5–3 мм). Таким образом, эти и другие данные не в полной мере позволяют оценить распределение агрегатов, не ясен размер частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении, отсутствует такая важная информация, как количество стабильных агрегатов, их размер при проведении основных приемов обработки почвы. Дальнейшие расчеты позволяют это сделать.

Для оценки дифференциации или равномерности распределения содержания агрегатов по различным фракциям использовали показатель энтропии (табл. 1). Перед посевом гороха в слое 0–10 см энтропия распределения содержания агрегатов при сухом просеивании ( $H_c$ ) в варианте со вспашкой составляла 2.59, что в среднем на 6% больше по сравнению с комбинированной и поверхностной обработкой и прямым посевом. При этом энтропия распределения содержания агрегатов при мокром просеивании ( $H_m$ ) при прямом посеве была больше на 9–13%, чем при поверхностной, комбинированной обработках и вспашке. Уменьшение энтропии распределения содержания агрегатов при мокром просеивании свидетельствует об увеличении доли мелких фракций (<1 мм, особенно <0.25 мм).

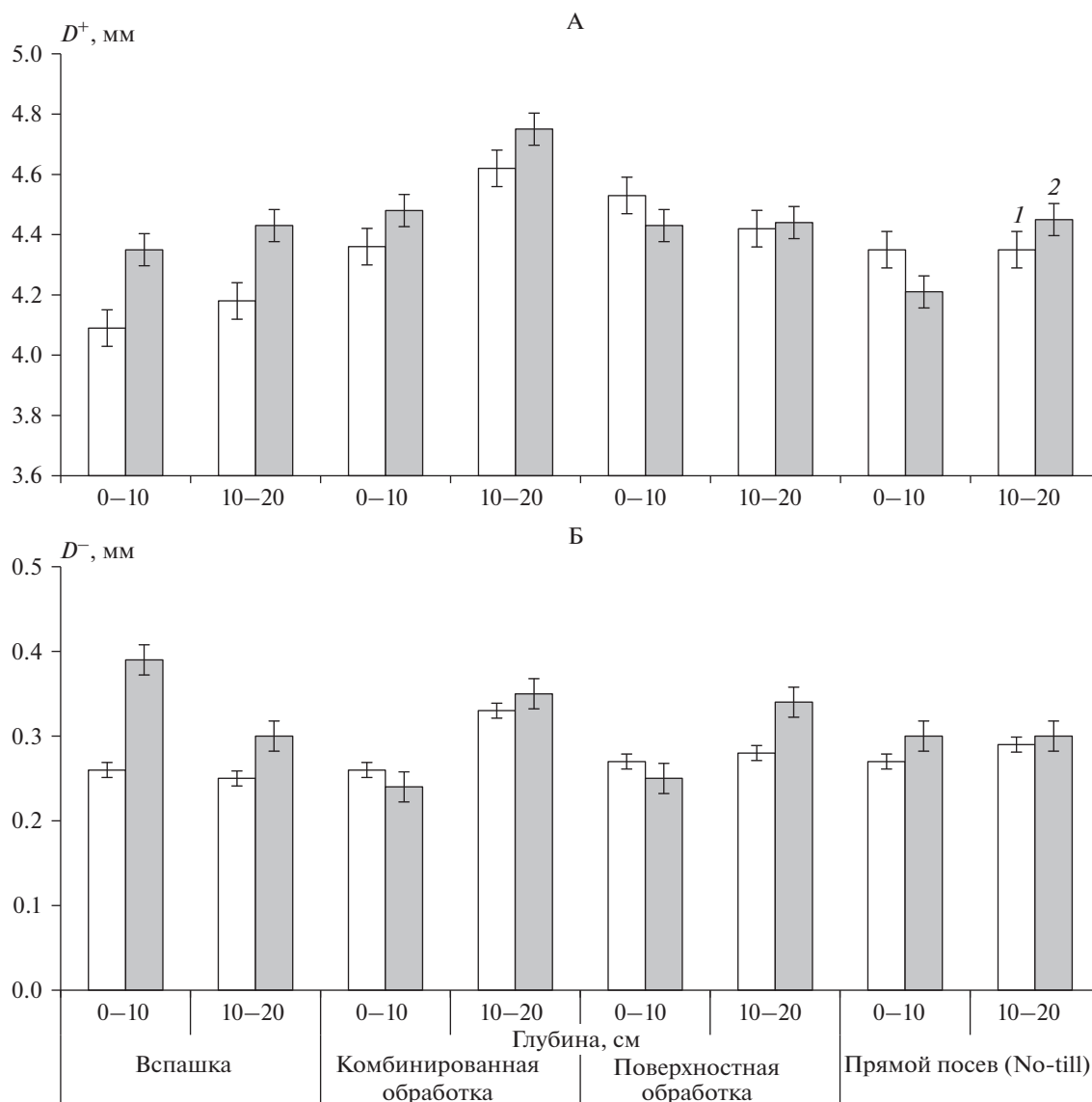
В слое 10–20 см перед посевом гороха в варианте со вспашкой отмечается более равномерное распределение содержания агрегатов после сухого просеивания, о чем свидетельствует наибольшая энтропия ( $H_c = 2.49$ ). В остальных вариантах  $H_c$  была меньше на 6–11%, чем на вспашке. Эн-

тропия распределения содержания агрегатов после мокрого просеивания при минимизации обработки почвы была больше, чем при вспашке на 12–17%, что говорит об увеличении содержания фракций <1 мм, и особенно <0.25 мм, и подтверждается представленным на рис. 1 распределением структурных отдельностей почвы.

После уборки гороха в слое 0–10 см энтропия распределения содержания агрегатов после сухого просеивания была высокой при прямом посеве и поверхностной обработке 2.56 и 2.54 соответственно, и несколько меньше при комбинированной обработке и вспашке ( $H_c = 2.49$ –2.50). В слое 10–20 см после уборки гороха энтропия распределения содержания агрегатов после сухого просеивания при вспашке была наибольшей ( $H_c = 2.45$ ). В зависимости от приема обработки она уменьшалась в ряду: поверхностная обработка, прямой посев ( $H_c = 2.36$ ) → комбинированная обработка ( $H_c = 2.20$ ).

При применении прямого посева, в период уборки гороха, в слое 0–20 см отмечался рост  $H_m$ , что обусловлено повышением водоустойчивости агрегатов 1–0.5 мм. При этом минимальная  $H_m$  была отмечена в варианте с применением вспашки, что определялось уменьшением водоустойчивости агрегатов >0.5 мм, и как следствие большей неравномерностью в распределении.

Исучен средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), и средневзвешенный диаметр частиц, на которые они распадаются ( $D^-$ ) (рис. 3). В слое 0–10 см перед посевом гороха установлен наибольший средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), в варианте с поверхностной обработкой – 4.53 мм. Несколько меньший показатель выявлен при прямом посеве и комбинированной обработке – 4.35 мм, а наименьший на вспашке – 4.09. При этом средневзвешенный



**Рис. 3.** Средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ) (А), и средневзвешенный диаметр частиц, на которые распадаются агрегаты, имеющие средневзвешенный диаметр  $D^+$  при увлажнении ( $D^-$ ) (Б) при различных приемах обработки почвы: 1 – перед посевом гороха, 2 – после уборки, разбросом показано стандартное отклонение.

диаметр частиц ( $D^-$ ), на которые распались агрегаты  $D^+$ , не зависел от приема обработки почвы и в среднем составлял 0.26–0.27 мм.

В слое 10–20 см средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), и средневзвешенный диаметр частиц, на которые они распадаются ( $D^-$ ), на вспашке был наименьшим 4.18 и 0.25 мм соответственно и возрастал в ряду прямой посев → поверхностная обработка → комбинированная обработка. При этом полученные тенденции изменения  $D^+$  перед посевом гороха были достоверными и обусловлены различными приемами обработки почвы  $НСР_{05} = 0.32$ .

После уборки гороха в слое 0–10 см при прямом посеве средневзвешенный диаметр агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), был наименьшим 4.21. При комбинированной и поверхностной обработках и на вспашке отмечается повышение  $D^+$  на 3–6%. При этом максимальный средневзвешенный диаметр частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении ( $D^-$ ), выявлен на вспашке 0.39 мм. Он снижался в ряду: прямой посев (0.30 мм) → поверхностная обработка (0.25 мм) → комбинированная обработка (0.24 мм). Следовательно, при комбинированной и поверхностной обработках при наибольшем диаметре ( $D^+$ ) разрушающихся агрегатов отмечается наименьший диаметр частиц, на который

**Таблица 2.** Влияние приемов обработки почвы на энтропию распределения содержания агрегатов со средневзвешенным диаметром  $D^+$  и  $D^-$ 

Обработка	Глубина, см	Перед посевом		После уборки	
		$H^+$	$H^-$	$H^+$	$H^-$
Вспашка	0–10	1.59	1.18	1.53	1.16
	10–20	1.66	1.06	1.54	1.36
Комбинированная	0–10	1.57	1.25	1.43	1.14
	10–20	1.52	1.43	1.45	1.46
Поверхностная	0–10	1.51	1.28	1.46	1.16
	10–20	1.58	1.33	1.51	1.43
Нулевая	0–10	1.58	1.27	1.48	1.23
	10–20	1.65	1.39	1.51	1.35

НСР<sub>05</sub>: для фактора “обработка” после уборки  $H^+ - 0.06$ ; для фактора “глубина” после уборки  $H^- - 0.07$

они разрушаются ( $D^-$ ). В то время как при применении вспашки диаметр агрегатов, возникающих после разрушения ( $D^-$ ) был наибольшим.

В слое 10–20 см после уборки гороха  $D^-$  при вспашке и прямом посеве составлял 0.30 мм, а при комбинированной и поверхностной обработках 0.35 и 0.34 мм соответственно. За период вегетации гороха изменения  $D^-$  были значимы как при различных приемах обработки почвы (НСР<sub>05</sub> = 0.03), так и в соответствии с изучаемой глубиной почвы (НСР<sub>05</sub> = 0.02).

Рассматривая изменения средневзвешенного диаметра агрегатов, разрушающихся при увлажнении  $D^+$  и  $D^-$ , интерес вызывает анализ их распределения с помощью энтропии ( $H^+$ ,  $H^-$ ) (табл. 2).

Энтропия распределения агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), перед посевом гороха в слое 0–10 см в зависимости от приема обработки составляла от 1.51 до 1.59. При этом наименьшее значение  $H^+$  в варианте при поверхностной обработке обусловлено разрушением при увлажнении, агрегатов ограниченного диапазона  $D^+$ . Энтропия распределения частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении ( $H^-$ ), при минимизации обработки почвы была 1.25–1.28 и уменьшалась при вспашке до 1.18.

В слое 10–20 см  $H^+$  при вспашке и прямом посеве составила 1.65–1.66, а при комбинированной и поверхностной обработке – 1.52–1.58. Энтропия распределения частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении ( $H^-$ ), на вспашке была наименьшей – 1.06, но при минимизации обработки почвы увеличивалась в ряду: поверхностная обработка (1.33) → прямой посев (1.39) → комбинированная обработка.

Таким образом, перед посевом гороха в варианте со вспашкой при наибольшей энтропии ( $H^+ = 1.59–1.66$ ) отмечается разрушение сухих агрегатов разного размера при увлажнении на относительно одинаковые частицы, преимущественно <0.5 мм, что подтверждается изменениями  $D^-$ .

После уборки гороха в слоях 0–10 и 10–20 см значения  $H^+$  при вспашке были наибольшие (1.53–1.54), а при комбинированной обработке наименьшие (1.43–1.45).  $H^+$  при прямом посеве и при поверхностной обработке имела промежуточные значения (1.46–1.51). Энтропия распределения частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении ( $H^-$ ), в слое 0–10 см при прямом посеве была максимальной и снижалась в ряду: поверхностная обработка, вспашка → комбинированная обработка. В слое 10–20 см  $H^-$  при комбинированной и поверхностной обработках была на 6–7% больше по сравнению с прямым посевом и вспашкой.

В совокупности со средневзвешенным диаметром агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), стоит рассматривать и количество стабильных агрегатов ( $S_s$ ). Перед посевом гороха количество стабильных агрегатов на вспашке в изучаемых слоях было больше по отношению к остальным обработкам почвы на 12–27% (рис. 4).

После уборки гороха в слое 0–10 см количество стабильных агрегатов возросло при минимизации обработки почвы по сравнению со вспашкой на 22–28%. При этом в слое 10–20 см содержание стабильных агрегатов при комбинированной обработке почвы было меньше, чем при остальных приемах обработки, на 18–24%. При статистическом анализе выявлено достоверное увеличение количества стабильных агрегатов при высоком уровне вероятности  $P = 0.95$  по глубине как перед посевом (НСР<sub>05</sub> = 2.66), так и после уборки (НСР<sub>05</sub> = 4.67).

На рис. 5 представлен средневзвешенный диаметр стабильных агрегатов и частиц ( $D_s$ ). Независимо от приема обработки почвы и глубины изучаемого слоя общей закономерностью является высокие значения  $D_s$  после уборки гороха, что говорит о влиянии изучаемой культуры на процессы структурообразования и сохранения агрегатов стабильными. При этом как перед посевом гороха, так и после его уборки в слоях 0–10 и 10–20 см минимальный средневзвешенный диаметр ста-



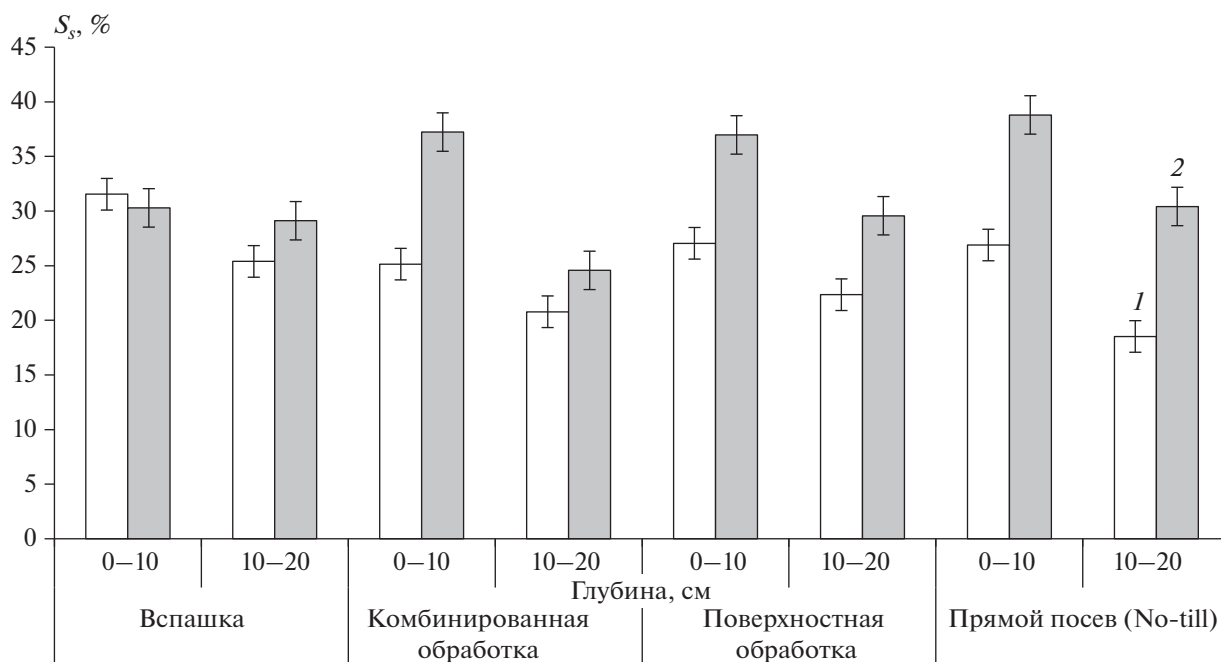


Рис. 4. Количество стабильных агрегатов в черноземе типичном при различном приеме обработке почвы: 1 – перед посевом гороха, 2 – после уборки разбросом показано стандартное отклонение.

бильных агрегатов и частиц был установлен при вспашке ( $D_s = 0.66–1.21$  мм). Это свидетельствует, что глубокая отвальная обработка ведет к разрушению структурных отдельностей. Минимизация обработки почвы способствовала росту средневзвешенного диаметра стабильных агрегатов и частиц в 1.3–1.8 раза. Достоверное увеличение  $D_s$  подтверждается при высоком уровне вероятности  $P = 0.95$  как перед посевом гороха, так и после его уборки при различных приемах обработки почвы (НСР<sub>05</sub> = 0.20–0.30) и глубины изучаемого слоя (НСР<sub>05</sub> = 0.14–0.21).

При анализе взаимосвязь суммы водоустойчивых агрегатов по Саввинову ( $S_m$ ) с показателем неустойчивости структуры к разрушению при увлажнении ( $R_{ws}$ ), согласно классификации, разработанной Хитровым и Чечуевой [16], были установлены классы, характеризующие качество почвенной структуры по агрегированности и водоустойчивости.

В слое 0–10 см перед посевом гороха независимо от приема обработки почвы качество структуры было класса IIIб ( $S_m = 54–58\%$ ;  $R_{ws} = 2.8–3.3$ ), то есть для этого слоя была характерна хорошая агрегированность почвы в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости. В слое 10–20 см перед посевом гороха при комбинированной обработке почвы структура соответствовала классу IIIв ( $S_m = 63\%$ ;  $R_{ws} = 3.4$ ), то есть отличная агрегированность почвы в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости, а при вспашке, по-

верхностной обработке и прямом посеве почва обладала хорошей агрегированностью в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости (класс IIIб качества структуры,  $S_m = 52–58\%$ ;  $R_{ws} = 3.1–3.2$ ).

В период уборки гороха в слое 0–10 см при вспашке, комбинированной и поверхностной обработке почвы структура отнесена к классу IIIб ( $S_m = 52–53\%$ ;  $R_{ws} = 2.7–3.0$ ), то есть для этого слоя была характерна хорошая агрегированность почвы в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости. В варианте с применением прямого посева структура чернозема типичного соответствовала классу IVа ( $S_m = 53\%$ ;  $R_{ws} = 2.4$ ), то есть при прямом посеве почва обладала хорошей агрегированностью при хорошей водоустойчивости. В слое 10–20 см после уборки гороха при комбинированной и поверхностной обработки наблюдалась отличная агрегированность почвы в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости (класс IIIв,  $S_m = 62–63\%$ ;  $R_{ws} = 3.3–2.9$ ), а в вариантах прямого посева и вспашки – хорошая агрегированность почвы в увлажненном состоянии при средней водоустойчивости (класс IIIб,  $S_m = 58–59\%$ ;  $R_{ws} = 2.9–3.0$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средневзвешенный диаметр воздушно-сухих агрегатов ( $D_c$ ), агрегатов, сохраняющихся при увлажнении ( $D_m$ ), и агрегатов, разрушающихся при

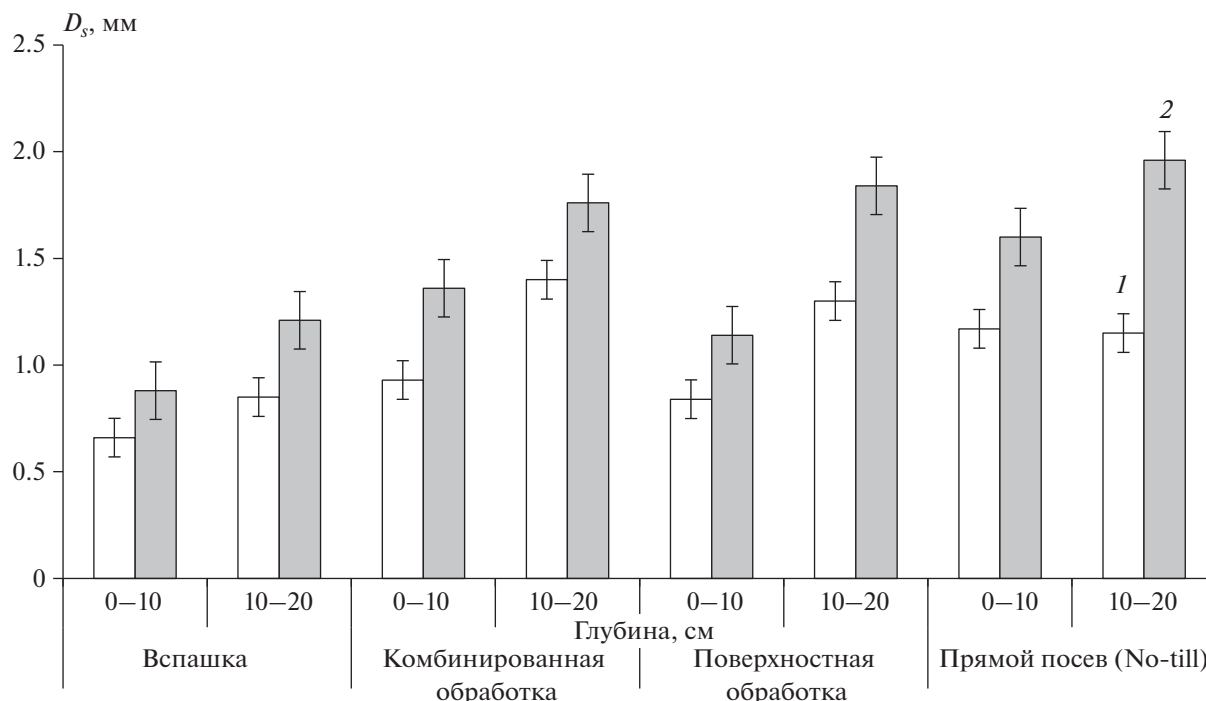


Рис. 5. Влияние приема обработки почвы на средневзвешенный диаметр стабильных агрегатов и частиц почвы: 1 – перед посевом гороха, 2 – после уборки разбросом показано стандартное отклонение.

увлажнении ( $D^+$ ), перед посевом культуры был достоверно ( $P = 0.95$ ) больше при комбинированной, поверхностной обработках и прямом посеве по сравнению со вспашкой. При этом средневзвешенный диаметр частиц, на который они распадаются при увлажнении ( $D^-$ ), существенно не изменился и составлял в среднем на вспашке – 0.25 мм, а при поверхностной, комбинированной обработках и при прямом посеве, 0.27, 0.29 и 0.28 мм соответственно.

Комбинированная, поверхностная обработки и прямой посев по сравнению со вспашкой способствовали достоверному ( $HCP_{05} = 0.20–0.30$ ) увеличению средневзвешенного диаметра стабильных агрегатов ( $D_s$ ) в 1.3–1.8 раза, достигая наибольших значений при прямом посеве, но вместе с этим количество стабильных агрегатов было больше на вспашке. Это говорит о сложных взаимосвязях при механическом разрушении агрегатов и требует дальнейшего изучения.

Наибольшая энтропия ( $H_c$ ) распределения агрегатов после сухого просеивания была характерна, при высоком уровне достоверности ( $P = 0.95$ ), для варианта со вспашкой – 2.54, тогда как в вариантах с применением поверхностной, комбинированной обработкой и прямым посевом дифференциация распределения структурных отдельностей по фракциям была несколько меньше, составляя в среднем 2.38–2.32 и 2.37 соответственно. Следовательно, воздушно-сухие агрегаты различного диа-

метра на пашне встречаются в приблизительно в равных количествах по сравнению с поверхностной, комбинированной обработками и прямым посевом.

Установленный рост средневзвешенного диаметра агрегатов, сохраняющихся при увлажнении ( $D_m$ ), и рост энтропии ( $H_m$ ) при применяемых агротехнических приемах минимизации обработки почвы, характеризует повышение равномерности распределения структурных отдельностей по фракциям. Уменьшение  $D_m$  и  $H_m$  при мокром просеивании на вспашке свидетельствует об увеличении доли мелких фракций (<1 мм, и особенно <0.25 мм).

Также на вспашке при наибольшей энтропии ( $H^+ = 1.59–1.66$ ) отмечается разрушение сухих агрегатов разного размера при увлажнении на относительно одинаковые частицы, преимущественно на частицы <0.5 мм, что подтверждается низкими значениями  $D^-$  и  $H^-$ .

За период вегетации гороха изменения  $D_c$  и  $D_m$  определялись глубиной обработки пахотного слоя, что подтверждается высокой степенью достоверности ( $HCP_{05} = 0.25–0.09$ ). Так, в слое 0–10 см  $D_c$  при вспашке и комбинированной обработке был выше на 34%, по сравнению с поверхностной обработкой и прямым посевом. При этом  $D_m$  при прямом посеве (No-till) был преобладающим (0.80 мм) и достоверно ( $HCP_{05} = 0.13$ ) снижался в ряду: комбинированная обработка (0.65 мм) → поверхностная обработка (0.58 мм) → вспаш-

ка  $\rightarrow$  (0.44 мм). В слое 10–20 см агротехнические приемы, применяемые при минимизации обработки почвы, способствовала наибольшему  $D_c$  и  $D_m$ .

После уборки гороха в слое 0–10 и 10–20 см энтропия распределения агрегатов, разрушающихся при увлажнении ( $D^+$ ), при вспашке была наибольшая ( $H^+ = 1.53–1.54$ ), а наименьшая – при комбинированной обработке ( $H^+ = 1.43–1.45$ ).  $H^+$  при прямом посеве и при поверхностной обработке занимала промежуточное положение 1.46–1.51. Уменьшение энтропии ( $H^+$ ) при комбинированной обработке говорит о том, что среди сухих агрегатов разрушению при увлажнении подвергаются структурные отдельности с ограниченным диапазоном диаметров. Анализ изменения  $D^+$  показал, что наибольшее разрушение было характерно для агрегатов  $>5$  и 2–1 мм. Влияние приемов основной обработки почвы на энтропию распределения агрегатов, разрушающихся при увлажнении, имеет достоверное подтверждение ( $P = 0.95$ ).

При рассмотрении изменения энтропии распределения агрегатов после сухого просеивания в период уборки гороха выявлено, что в слое 0–10 см распределение структурных отдельностей чернозема типичного было более равномерным и существенного изменения в зависимости от приема обработки почвы не имели. В слое 10–20 см после уборки гороха энтропия распределения содержания агрегатов после сухого просеивания при вспашке была наибольшей ( $H_c = 2.45$ ) и в зависимости от способа обработки уменьшалась в ряду: поверхностная обработка, прямой посев ( $H_c = 2.36$ )  $\rightarrow$  комбинированная обработка ( $H_c = 2.20$ ). На прямом посеве в период уборки гороха в слое 0–20 см отмечается рост  $H_m$ , что обусловлено увеличением водоустойчивости агрегатов 1–0.5 мм. Минимальная  $H_m$  была отмечена в варианте с применением вспашки, что определялось снижением водоустойчивости агрегатов  $>0.5$  мм, и как следствие большей неравномерностью в распределении.

Энтропия распределения частиц, на которые распадаются агрегаты при увлажнении ( $H^-$ ), в слое 0–10 см при прямом посеве была максимальной и уменьшалась в ряду поверхностная обработка, вспашка  $\rightarrow$  комбинированная обработка. В слое 10–20 см  $H^-$  при комбинированной и поверхностной обработках была на 6–7% больше по сравнению с прямым посевом и вспашкой, что подтверждается высокой достоверностью по глубине обработке ( $НСР_{05} = 0.07$ ).

Независимо от способа обработки и изучаемого слоя перед посевом культуры, а также в период уборки в вариантах с применением вспашки, поверхностной и комбинированной обработок чернозем типичный имел среднее качество структуры и относился к классу III. В весенний период при

прямом посеве структура почвы независимо от слоя почвы имела среднее качество структуры – класс III, а в период уборки гороха в слое почвы 0–10 см структура почвы характеризовалась как хорошая и имела класс IV, в то время как в слое 10–20 см – класс III. Следовательно, применение прямого посева в течение длительного времени способствует переводу качества почвенной структуры из среднего класса в хороший.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Влияние приемов основной обработки почвы на структурно-агрегатное состояние почвы рассмотрено в рамках государственного задания № 075-00581-21-00 по теме № 0463-2019-0002.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобров В.П., Юдин С.А., Ярославцева Н.В., Юдина А.В., Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Клюев Н.Н., Замотаев И.В., Ермолаев Н.Р., Иванов А.Л., Холодов В.А. Изменение физических свойств черноземов при прямом посеве // Почвоведение. 2020. № 7. С. 880–890. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20070023>
2. Бойцова Л.В. Динамика агрофизических свойств в профиле дерново-подзолистых почв различного сельскохозяйственного использования // Агрофизика. 2016. № 1. С. 1–8.
3. Борин А.А., Лощинина А.Э. Влияние обработки почвы в комплексе с применением удобрений и гербицидов на урожайность культур севооборота // Земледеление. 2015. № 7. С. 17–20.
4. Борин А.А., Лощинина А.Э. Влияние различных систем обработки почвы на ее агрофизические свойства и урожайность культур севооборота // Агрофизика. 2018. № 3. С. 1–7.
5. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
6. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
7. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Хабиров И.К., Комисаров М.А., Гарипов Т.Т., Сидорова Л.В., Асылбаев И.Г., Рафиков Б.В., Яубасаров Р.Б. Оценка состояния агрочерноземов Зауральской степи в условиях использования системы обработки почвы No-till // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2014. № 6. С. 32–36. <https://doi.org/10.3103/S1068367415010061>
8. Дридигер В.К. Особенности проведения научных исследований по минимизации обработки почвы и прямому посеву: методические рекомендации. Ставрополь: Сервисшкола, 2020. 69 с.
9. Завалин А.А., Дридигер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А. Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве (обзор) // Почвоведение

- ние. 2018. № 12. С. 1506–1516.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18120146>
10. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
  11. Кирюшин В.И., Кирюшин С.В. Агротехнологии. СПб.: Лань, 2015. 464 с.
  12. Оленченко Е.А., Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Балашов Е.В. Влияние степени окультуренности дерново-подзолистой супесчаной почвы на ее физические свойства и урожайность сельскохозяйственных культур в агрофизическом стационаре // Агрофизика. 2012. № 4. С. 8–18.
  13. Перфильев Н.В., Вьюшина О.А., Конищев А.А., Гарифуллин И.И. Исследование взаимосвязи оптимальной плотности почвы с урожайностью зерновых культур // Агрофизика. 2017. № 4. С. 16–24.
  14. Теории и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шейна и Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
  15. Трофимова Т.А., Коржов С.И., Гулевский В.А., Образцов В.Н. Оценка степени физической деградации и пригодности черноземов к минимизации основной обработки почвы // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1125–1131.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18090125>
  16. Хитров Н.Б., Чечуева О.А. Способ интерпретации данных макро- и микроструктурного состояния почв // Почвоведение. 1994. № 2. С. 84–92.
  17. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060>
  18. Черкасов Г.Н., Пыхтин И.Г., Гостев А.В. Возможность применения нулевых и поверхностных способов основной обработки почвы в различных регионах // Земледелие. 2014. № 5. С. 13–16.
  19. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.
  20. Jordan A., Zavala L.M., Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain // Catena. 2010. V. 81. P. 77–85.
  21. Kahlon M.S., Lal R., Varughese M.A. Twenty-two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 151–158  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2012.08.001>
  22. Lenka N.K., Lal R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system // Soil Tillage Res. 2013. V. 126. P. 78–89.
  23. Liebelt P., Fruhauf M., Suleymanov R., Komissarov M., Yumaguzhina D., Galimova R. Causes, consequences and opportunities of the post-Soviet land use changes in the forest-steppe zone of Bashkortostan // GEOÖKO. Goettingen, 2015. V. XXXVI. P. 77–111.
  24. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007. V. 104(33). P. 13268–13272.
  25. Mulumba L.N., Lal R. Mulching effects on selected soil physical properties // Soil Tillage Res. 2008. V. 98. P. 106–111.

## Influence of Primary Tillage Practices on Typical Chernozem Macrostructure

E. V. Dubovik<sup>1, \*</sup>, D. V. Dubovik<sup>1</sup>, and A. V. Shumakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, 305021 Russia

\*e-mail: dubovikdm@yandex.ru

The changes in the structural state of typical chernozem (Haplic Chernozems) under various tillage methods (plowing, combined tillage, surface tillage, No-till) in the Central Chernozem Region (Kursk Region) were studied. The method of the data interpretation of macrostructural (dry and wet sieving) state of the soil was used. On the basis of the simultaneous application of two complementary types of analysis the characteristic of the changed weighted average diameter of dry and water resistant aggregates, their distribution entropy, the weighted average diameter of the aggregates which were destroyed by the harder impact and the particles to which the aggregates were broken up, as well as the content of “stable” aggregates and their weighted average diameter was given. Based on the results of such an assessment, an increase in the weighted average diameter of the aggregates during dry and wet sieving, after minimized primary tillage was determined. With this, plowing to the depth of 20–22 cm contributed to a decrease in the weighted average diameter of aggregates that were destroyed by the harder impact and the particles to which the aggregates were broken up. At the same time, it was determined that tillage minimizing led to an increase in the weighted average diameter of stable aggregates. The entropy of the aggregate distribution after both dry and wet sieving was determined by the study time and the depth of tillage. The relationship between the total water-proof aggregates according to Savvinov and the index of instability to the destruction during humidification was analyzed. It is established that regardless of the treatment method and the layer under study before sowing the crop and during the harvesting period on the variants using plowing, surface and combined treatment, the typical chernozem had an average quality of the structure and belonged to Class III. Using of dired sowing during vegetation period contributes to the transfer of the soil structure in the layer 0–10 cm from the average quality of the chop Class III, to the good quality of soil structure – Class IV. Results of research can be used to evaluating the use of resource-saving methods of tillage.

**Keywords:** Haplic Chernozems, tillage, soil structure, weighted average diameter of aggregates, entropy