

УДК 631.417.2

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ВОЗДУШНО-СУХИХ И ВОДОУСТОЙЧИВЫХ МАКРОАГРЕГАТОВ ТИПИЧНОГО ЧЕРНОЗЕМА В УСЛОВИЯХ КОНТРАСТНОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

© 2019 г. Б. М. Когут^{1, *}, З. С. Артемьева¹, Н. П. Кириллова^{1, 2}, М. А. Яшин¹, Е. И. Сошникова¹

¹Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Россия, 119107, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

*e-mail: kogutb@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2018 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Исучено содержание и состав структурных отдельностей различного иерархического уровня типичного чернозема (Haplic Chernozem (Loamic, Pachic)) Курской области в условиях контрастных видов использования: целина и полувековой бессменный чистый пар. Приведена подробная методическая схема анализа содержания и компонентного состава органического вещества гранулоденсиметрических фракций структурных отдельностей разного размера и степени водоустойчивости. Основное внимание направлено на исследование продуктов органо-минерального взаимодействия макро- и микроагрегатов, выделяемых при мокром просеивании из воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм, как наиболее представительных агрономически ценных. Показано, что содержание воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм остается одинаковым при различных видах использования. В то же время водоустойчивость этих воздушно-сухих агрегатов существенно отличается между вариантами степь и бессменный пар. Установлено, что длительное бессменное парование типичного чернозема приводит к значительным потерям органического вещества как в почве в целом, так и в структурных отдельностях. При этом наименьшие величины сокращения содержания $C_{орг}$ отмечены практически для всех компонентов органического вещества легких фракций и ила оставшихся неразрушенными водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм.

Ключевые слова: целина, бессменный чистый пар, структурные отдельности, агрегаты, гранулоденсиметрическое фракционирование

DOI: 10.1134/S0032180X19020084

ВВЕДЕНИЕ

Содержание органического углерода в почве является одним из основных факторов, контролирующих агрегатную устойчивость почв [2, 24, 28]. Структура почвы защищает органическое вещество (ОВ) и влияет на скорость его оборачиваемости и плодородие почв [13, 28]. Оптимальная для развития растений структура почвы должна быть устойчивой к различным условиям увлажнения и обеспечивающей непрерывность пор в почвенной матрице, что создает благоприятный воздухо- и влагообмен между корнями и почвенной средой.

Агрегаты почвы являются вторичными структурными единицами, образованными комбинацией минеральных частиц с органическими и/или неорганическими связующими веществами [16, 23]. Компоненты ОВ почвы физически и химически связывают первичные минеральные частицы в агрегаты, что в свою очередь повышает стабиль-

ность агрегатов и ограничивает их разрушение при смачивании [30].

Большинство концептуальных моделей агрегации почв предполагают, что почва состоит из постоянно меняющихся агрегатов разных размеров, связанных органическими и неорганическими соединениями. Одна из них утверждает, что образование макроагрегатов является следствием систематической связи микроагрегатов, которые служат продуктом склеивания ультрамикроструктур <2 мкм, состоящих из органо-минеральных комплексов [27, 40]. Другие постулируют, что распад макроагрегатов (>250 мкм) на микроагрегаты (от 20 до 250 мкм) является предварительной стадией формирования микроагрегатов. В соответствии с логикой этих моделей, микроагрегаты в основном формируются в макроагрегатах [33, 38, 41]. Согласно современному состоянию знаний о существующих моделях агрегации почв, за-

щищенный пул ОВ почвы стабилизирует микроагрегаты, а они, в свою очередь, защищают ОВ от микробиологических атак. Инкрустация ОВ в центре микроагрегатов является основным путем секвестрации органического углерода [33, 40]. Защита ОВ пропорциональна специфической внешней удельной поверхности глинистых частиц и взаимодействиям между поверхностями монослоев частиц глины и песка [29].

Изучение водоустойчивой структуры почв является методом оценки степени их агрегированности. Насыщение агрегатов водой способно быть разрушительным, поскольку при быстром смачивании воздух, выходящий из пор агрегата, создает высокое давление, которое разрывает агрегат. Именно таким образом, агрегаты распадаются на фрагменты и первичные частицы [30]. Поэтому качество и стабильность структурного состояния почв, прежде всего, зависят от устойчивости агрегатов в воде. Водоустойчивая агрегатная структура обычно формируется макро (>250 мкм) и микроагрегатами (<250 мкм) [24]. Стабильность агрегатов, вызванная адгезией, в большой степени зависит от размера агрегатов [4]. С увеличением размера агрегата сила адгезии уменьшается, и, следовательно, стабильность агрегатов снижается [40]. Соответственно эффекты, стабилизирующие агрегаты, более выражены и лучше развиты во фракциях меньших размеров. Чем меньше размер агрегатной фракции, тем выше ее способность противостоять этим разрушительным силам. Наличие таких постоянных связующих агентов, как гуминовые вещества, ассоциированные с аморфным железом и соединениями алюминия, обеспечивают высокую степень стабильности микроагрегатов.

Устойчивость макроагрегатов меньше, чем микроагрегатов в силу того, что они стабилизированы, наряду с другими факторами, кратковременно существующими связующими агентами, такими как корни растений, гифы грибов и полисахариды, продуцируемые микроорганизмами и растениями. Агрегирование на макроуровне по сравнению с микроуровнем намного более чувствительно к смене ценоза [8, 18, 24, 41].

Водостойкость агрегатов определяется содержанием органического углерода в агрегатах и напрямую влияет на структурное состояние почвы и ее физические свойства. Органические соединения обуславливают стабильность агрегатов почвы, снижая их смачиваемость и влияя на их механическую прочность [35, 44]. В частности, ОВ, связанное с глинистыми минералами, повышает степень их гидрофобности, и именно этим можно объяснить устойчивость агрегатов к увлажнению [25].

Состав компонентов ОВ и факторы устойчивости микроагрегатов с различной механической прочностью изучались в нескольких исследова-

тельских проектах [14, 17, 27, 32, 34, 36, 37, 40, 42]. Однако количественной информации о трансформации органического вещества микро- и макроагрегатов, комплексно и селективно выделяемых физическими методами фракционирования из черноземов при разных видах их использования, пока явно недостаточно.

Основные задачи исследования: 1 – выделить из образцов типичного чернозема макроагрегаты, устойчивые к разрушающему действию воды; 2 – выделить микроагрегаты с различной устойчивостью к ультразвуковой обработке из агрегатов размером 2–1 мм и структурных отдельностей <0.25 мм, полученных при мокром просеивании воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм; 3 – охарактеризовать содержание и состав органического вещества макро- и микроагрегатов типичного чернозема.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – типичный чернозем в условиях контрастных видов использования: степь (Центрально-Черноземный государственный биосферный заповедник “Стрелецкая степь”, Курская область) и длительный (52 года) чистый бессменный пар без удобрений (Курский НИИ агропромышленного производства) (51°34' N, 36°06' E). Участок опыта с бессменным парованием типичного чернозема (15 × 200 м) заложен в 1964 г., а в 1998 г. видоизменен: 2/3 площади опыта оставлено под бессменное парование почвы, а 1/3 – отведено под залежь [5].

Территория исследованных участков типична для Центрально-Черноземного региона. Климат умеренно-холодный. Среднегодовая температура составляет 4.8–5.3°C. Среднегодовое количество осадков равно 540 мм. Почва – среднесуглинистый типичный чернозем [6], согласно международной классификации – *Luvisol Chernozem* (Loamic, Pachic) [45 WRB, 2014] на лёссовидных отложениях с содержанием ила 18.4–22.9%, $C_{орг}$ 2.6–4.8%, pH_{H_2O} 6.8–6.9.

С каждого варианта опыта отбирали по 3 ненарушенных монолитных образца почвы (размером 25 × 25 × 15 см). Отобранные почвенные образцы подвергали предварительной подготовке к физическому фракционированию, сбрасывая монолиты с высоты 1.5 м на пленку для их разрушения на структурные отдельности. Затем в лабораторных условиях почвенные образцы раскладывали на ровной поверхности, из почвенной массы отбирали крупные растительные остатки и корни, далее пробы высушивали до воздушно-сухого состояния, избегая прямого попадания солнечных лучей. После сухого просеивания всего почвенного образца получили следующие фракции: >10, 10–7, 7–5, 5–3, 3–2, 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25, <0.25 мм.

Далее, согласно модификации Хана [13] метода Саввинова, мокрому просеиванию подвергли воздушно-сухие агрегаты диаметром 2–1 мм. Выбор агрегатов диаметром 2–1 мм обусловлен наибольшей долей вклада органического вещества агрегатов этого размера в общее ОВ почвы [8, 11]. Собранные с сита 1 мм агрегаты предварительно насыщали водой с помощью разбрызгивающего устройства для предотвращения разрыва почвенных капилляров скопившимся воздухом и их разрушения, а затем подвергали мокрому просеиванию на ситах в стоячей воде. Таким способом были выделены водоустойчивые агрегаты размером 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25 и структурные отдельности или фракция <0.25 мм, включающие в состав и водоустойчивые микроагрегаты. Далее водоустойчивые агрегаты и структурные отдельности <0.25 мм высушили и пропустили через сито ($d = 1$ мм). Весь просеянный материал собрали, растерли пестиком с резиновым наконечником и гомогенизировали. Резиновый наконечник использовали в целях предотвращения излишнего разрушения агрегатов и крошения первичных минералов.

Для исследования компонентного состава ОВ водоустойчивые агрегаты 2–1 мм и структурные отдельности <0.25 мм подвергли гранулоденсиметрическому фракционированию.

В настоящее время для изучения распределения углерода по фракциям агрегатов разного размера применяются различные методы [21]. Получаемые результаты зависят от выбора метода [19]. В данной работе использовали модифицированный метод гранулоденсиметрического фракционирования почв [2, 12]. Этот метод позволяет разделить микроагрегаты на две группы: дифференцируемые по устойчивости к диспергирующему воздействию ультразвука и существенно различающиеся по свойствам органических и органо-минеральных компонентов. В соответствии с концепцией устойчивости микроагрегатов [14, 27] компоненты почвы, выделяемые с помощью непродолжительной (5–15 мин) ультразвуковой обработки, являются составляющими крупных (неустойчивых) микроагрегатов размером 50–250 мкм. Компоненты остатка почвы после выделения крупных микроагрегатов входят в состав мелких (устойчивых) микроагрегатов размером 1–50 мкм.

Согласно методической схеме [2], с помощью бромформ-этанольной смеси выделяется свободное ОВ (неагрегированное ОВ (ЛФ_{СВ})), локализуемое в межагрегатном пространстве водоустойчивых агрегатов – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³). Далее разрушают агрегаты с помощью ультразвукового озвучивания. Для физического диспергирования использовали ультразвуковой диспергатор зондового типа ЛУЗД-0.5К-02-00000 ПС (Криамид, Россия).

Озвучивание (71 Дж/мл) образца почвы (10 г + 50 мл деионизированной воды) осуществляли в течение 1 мин с последующим центрифугированием в соответствии с законом Стокса и повторяли 15 раз. Водную суспензию глинистых частиц (<1 мкм) собирали и высушивали ($t = 80^\circ\text{C}$) [15, 39]. Повторяющаяся процедура последовательного озвучивания и выделения илстых частиц с применением озвучивания ультразвуком низкой интенсивности водной суспензии почвы позволяет, во-первых, разрушать микроагрегаты постепенно по мере повышения интенсивности озвучивания, во-вторых, удаление каждой свежей порции илстых частиц из исходного образца почвенной суспензии не подвергает уже выделившиеся илстые частицы чрезмерному воздействию кавитации. Выбор размерности 1 мкм обусловлен большей степенью гомогенности ОВ илистой фракции данного размера по сравнению с таковым размерности 2 мкм [20, 26].

После удаления илстых частиц (ил) из образца с помощью тяжелой бромформ-этанольной смеси выделяли агрегированное ОВ (локализованное внутри микроагрегатов (ЛФ_{АГР})) – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³). Все выделенные легкие фракции с помощью сита делили на две подфракции: крупнее и мельче 50 мкм. Исследования, проведенные с помощью модифицированного метода Гольчина с соавт. [31] на ряде образцов почв различного генезиса [3], показали, что в первой фракции преобладают крупные (>50 мкм) неразложившиеся и частично разложившиеся фрагменты растительных тканей, во второй – более мелкие (<50 мкм) органические остатки и большей степени разложенности, вплоть до полностью гумифицированных. Все процедуры выделения выполняли в трехкратной повторности.

Таким образом, примененный метод позволяет выделить четыре пула ОВ: неагрегированное (свободное) ОВ (ЛФ_{СВ}), агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}), ОВ ила (С_{ил}) и остатка (С_{ост}). С помощью гранулоденсиметрического фракционирования пробы почв и структурных отдельностей можно разделить на две группы микроагрегатов, которые различаются по степени устойчивости к диспергирующему действию ультразвука. Крупные (50–250 мкм) микроагрегаты, неустойчивые в ультразвуковом поле, которые состоят из органических остатков разной степени минерализации–гумификации (ЛФ_{АГР}) и глинистых частиц (ил). Связь между компонентами слабая, поэтому они легко высвобождаются под влиянием кавитации. Мелкие (1–50 мкм) микроагрегаты, устойчивые в ультразвуковом поле, представлены во фракции остатка.

Содержание углерода и азота в пробах почв, структурных отдельностей и гранулоденсиметрических фракций определяли методом каталитиче-

Таблица 1. Распределение воздушно-сухих структурных отдельностей и содержание в них органического углерода в типичном черноземе при разных типах землепользования

Угодье	Воздушно-сухие структурные отдельности, мм																	
	>10		10–7		7–5		5–3		3–2		2–1		1–0.5		0.5–0.25		<0.25	
	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>	$M \pm SE$	<i>t</i>
Содержание фракции, % от массы почвы																		
Степь	1.8 ± 0.2	5.44	1.4 ± 0.3	5.17	6.7 ± 0.6	0.15	19.6 ± 1.6	9.48	18.5 ± 0.7	14.20	26.8 ± 2.4	0.20	5.0 ± 0.3	5.30	5.9 ± 0.5	5.23	14.2 ± 1.8	0.00
Пар	9.6 ± 2.8		6.5 ± 1.9		6.8 ± 0.8		9.6 ± 1.4		7.9 ± 1.3		26.1 ± 7.0		8.7 ± 1.3		10.8 ± 1.8		14.2 ± 5.4	
$S_{орг}$, % от массы структурных отдельностей																		
Степь	4.67 ± 0.91	4.5	5.05 ± 0.75	6.4	5.07 ± 0.18	25.2	4.83 ± 0.38	11.1	4.96 ± 0.44	10.2	4.58 ± 0.29	12.3	5.06 ± 0.28	16.4	5.07 ± 0.36	12.2	4.77 ± 0.21	21.0
Пар	2.61 ± 0.02		2.61 ± 0.08		2.64 ± 0.05		2.65 ± 0.04		2.63 ± 0.07		2.62 ± 0.09		2.67 ± 0.05		2.73 ± 0.11		2.42 ± 0.07	

Примечание. Здесь и далее в табл. 2, 3, 5: M – среднее арифметическое, SE – стандартная ошибка. Критерий Стьюдента (t -критерий) приведен для $P = 0.95$, жирный шрифт характеризует статистически значимые различия между значениями показателей сопоставляемых пар целина/пар ($t_{теор} = 2.78$).

ского сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Japan). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Статистическую обработку результатов выполняли с использованием статистического пакета Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) и Origin Pro 8 (Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA). Выбранный уровень значимости $P < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ данных по структурно-агрегатному составу почвы при сухом просивании показал, что степень ее агрегированности зависит от типа угодий. Это положение согласуется с ранее полученными результатами Кузнецовой [9]. Содержание воздушно-сухих агрегатов (10–1 мм) максимально ($73.0 \pm 2.3\%$) для типичного чернозема степного ценоза (табл. 1). В черноземе, функционирующем в течение 52 лет в режиме чистого пара, их доля уменьшается до $57.1 \pm 8.0\%$. В целинном черноземе содержание воздушно-сухих структурных отдельностей снижалось по мере изменения их размерности в следующей последовательности: (2–1) > (5–3) > (3–2) > (<0.25) > (7–5) > (0.5–0.25) > (1–0.5) > (>10) > (10–7) мм. После длительного функционирования чернозема в режиме чистого пара распределение в нем структурных отдельностей в зависимости от размерности изменилось: (2–1) > (<0.25) > (0.5–0.25) > (5–3) = (>10) > (1–0.5) > (3–2) > (7–5) > (10–7) мм.

Анализ данных табл. 1 показал, что независимо от типа угодья наибольший по массе выход структурных отдельностей наблюдается во фрак-

ции размером 2–1 мм. Однако в варианте пар отмечается резкое увеличение количества комков (фракция >10 мм) – более чем в 5 раз и фракции размером 10–7 мм (более чем в 4 раза), а также количества фракций менее 1 мм (1–0.25 и 0.5–0.25 мм) по сравнению с таковыми варианта степь. Количество агрономически ценных агрегатов размером крупнее 2 мм (5–3 и 3–2 мм) в пахотном черноземе по сравнению с целинным снижается более чем в 2 раза. Это положение согласуется с данными [22].

Таким образом, можно констатировать, что в результате 52-летнего функционирования чернозема в режиме бессменного чистого пара произошло увеличение степени глыбистости структурных отдельностей. Данный процесс сопровождается уменьшением количества в почве большинства наиболее агрономически ценных агрегатов. Установлено, что воздушно-сухие агрегаты 2–1 мм – одни из самых консервативных компонентов макроструктуры почвы: вне зависимости от вида использования чернозема их количество составляет 26–27% от общей массы структурных отдельностей.

Величина концентрации углерода в воздушно-сухих структурных отдельностях целинного чернозема, как и в почве в целом, весьма высока и колеблется в узких пределах от 4.6 до 5.1% от массы структурных отдельностей/почвы. После 52 лет использования чернозема в режиме чистого пара она резко и достоверно ($P = 0.95$) уменьшается до 2.4–2.7% от массы структурных отдельностей/почвы, что обусловлено крайне низким поступлением в пахотный чернозем свежего орга-

Таблица 2. Распределение водоустойчивых структурных отдельностей, выделенных из воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм, и концентрация органического углерода в структурных отдельностях, выделенных при мокром просеивании воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм

Угодье	Водоустойчивые структурные отдельности, мм							
	2–1		1–0.5		0.5–0.25		<0.25	
	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t
Содержание фракции, %								
Степь	80.0 ± 6.8	22.9	10.8 ± 4.7	6.7	1.2 ± 0.3	25.2	1.5 ± 0.2	10.6
Пар	0.3 ± 0.1		34.3 ± 4.9		57.5 ± 4.4		6.9 ± 1.0	
С, % от массы фракции								
Степь	4.9 ± 0.2	17.4	5.2 ± 0.3	12.3	4.9 ± 0.4	9.8	3.5 ± 0.2	99.0
Пар	4.5 ± 0.1		2.8 ± 0.2		2.7 ± 0.1		2.5 ± 0.1	

нического вещества микроорганизмов и минерализацией имеющегося в почве ОВ.

Учитывая максимальное количество в почве структурных отдельностей размером 2–1 мм, а также более высокое содержание $C_{орг}$ в них, очевидно, что и долевое участие $C_{орг}$ агрегатов размером 2–1 мм в общем уровне накопления органического вещества в почве, как в целинном, так и в варианте пар – максимально (26.6% от $C_{общ}$). В связи с этим, далее исследовали воздушно-сухие агрегаты данной размерности, как наиболее представительные в типичных черноземах [8, 11], и именно они были подвергнуты мокрому просеиванию.

Выявлено, что воздушно-сухие структурные отдельности размером 2–1 мм в целинном черноземе на 80% представлены водоустойчивыми макроагрегатами той же размерности (2–1 мм) (табл. 2). Для целинного чернозема содержание водоустойчивых структурных отдельностей по мере изменения их размерности уменьшалось в следующей последовательности: (2–1) > (1–0.5) > (<0.25) > (0.5–0.25) мм. После 52 лет функционирования чернозема в режиме чистого пара характер распределения количества структурных отдельностей, устойчивых к разрушающему действию воды, радикально изменился: (0.5–0.25) > (1–0.5) > (<0.25) > (2–1) мм. При этом показано, что все отмечаемые различия между содержанием структурных отдельностей в вариантах степь и пар статистически значимы. Таким образом, установлено, что длительное бесземное парование чернозема способствовало резкому снижению водоустойчивости структуры, о чем свидетельствует практически полное исчезновение в этом варианте водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм в результате экстремального агротехнического воздействия.

Содержание $C_{орг}$ в разноразмерных водоустойчивых агрегатах целинного чернозема примерно одинаково, исключая структурные отдельности

(<0.25 мм), в которых оно существенно меньше. В результате полувеккового функционирования чернозема в режиме чистого пара величина концентрации углерода в его структурных отдельностях резко и достоверно ($P = 0.95$) снижается. Исключение – водоустойчивые макроагрегаты размером 2–1 мм варианта пар, в которых содержание углерода сопоставимо с таковым целинного чернозема, однако количественный выход данной фракции в условиях парования чернозема крайне низок.

Аналитические данные свидетельствуют о высокой микроагрегированности как исследованных почв в целом, так и структурных отдельностей разного размера, выделенных способом мокрого просеивания из воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм. В среднем, доля неустойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов в разных компонентах вариантов чернозема колеблется в узких пределах.

Доля свободного ОВ в составе изученных структурных отдельностей чернозема весьма невелика и снижается по мере уменьшения их размера. Длительное парование чернозема приводит к резкому уменьшению доли свободного органического вещества, как в почве в целом – более чем в 12 раз, так и во фракции <0.25 мм – в 2 раза. Напротив, в водоустойчивых макроагрегатах (2–1 мм) пахотного чернозема долевое участие свободного ОВ увеличивается более, чем в 5 раз по сравнению с таковым целинного чернозема (табл. 3).

Основываясь на материалах более ранних исследований [1, 3], следует предполагать, что состав ОВ ЛФ_{СВ} как почвы в целом, так и структурных отдельностей в вариантах степь и пар принципиально различный. Наиболее вероятно, что в составе свободного ОВ варианта степь доминируют растительные остатки различной степени гумификации, а в составе такового варианта пар – высококонденсированные металлогуматы.

Таблица 3. Долевое участие компонентов в целинном и пахотном черноземе и структурных отдельностях разного размера, выделенных при мокром просеивании воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм

Вариант	Угодье	ЛФ _{СВ}		Неустойчивые (крупные) микроагрегаты (50–250 мкм)		Устойчивые (мелкие) микроагрегаты (1–50 мкм)		Микроагрегаты (общие)	
		% от массы почвы/агрегатов	<i>t</i>	% от массы почвы/агрегатов	<i>t</i>	% от массы почвы/агрегатов	<i>t</i>	% от массы почвы/агрегатов	<i>t</i>
Почва в целом	Степь	0.49 ± 0.05	10.2	23.75 ± 1.03	0.05	75.76 ± 1.08	0.6	99.51 ± 0.05	15.8
	Пар	0.04 ± 0.02		23.78 ± 0.97		76.18 ± 0.98		99.96 ± 0.02	
2–1 мм	Степь	1.14 ± 0.25	9.1	23.44 ± 0.74	3.34	75.41 ± 0.98	12.4	98.86 ± 0.25	9.1
	Пар	6.11 ± 0.07		24.70 ± 0.10		69.19 ± 0.06		93.89 ± 0.10	
<0.25 мм	Степь	0.20 ± 0.18	0.6	22.18 ± 1.17	1.63	77.61 ± 1.29	1.4	99.80 ± 0.18	1.0
	Пар	0.10 ± 0.09		23.22 ± 0.46		76.68 ± 0.38		99.90 ± 0.09	

Аналитические данные табл. 4 свидетельствуют, что максимальными величинами концентрации углерода и азота характеризуется агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}) (23–34% С и 1.5–2.2% N на массу фракции), локализованное внутри неустойчивых микроагрегатов. Это положение согласуется с результатами исследований Гольчина с соавт. [31]. В среднем, величины концентрации углерода и азота имеют тенденцию к снижению в ряду: ЛФ_{АГР} > ЛФ_{СВ} > ил > остаток.

В целинном черноземе величины концентрации углерода и азота в илистой фракции колеблются в узких пределах 7.4–8.5 и 0.8–0.9% от массы фракции соответственно. Для пахотного чернозема наблюдаются более широкие пределы колебания величины концентрации С и N (4.7–6.5 и 0.5–0.7% от массы фракции соответственно). Наиболее низкие величины концентрации углерода и азота отмечены для фракции остатка.

Выявлены существенные различия между почвами разных угодий по общему уровню накопления углерода в почве/водоустойчивых структурных отдельностях разного размера. В целинном черноземе уровень накопления углерода составляет 4.8% от массы почвы. В результате функционирования чернозема в режиме чистого пара в течение 52 лет наблюдается резкое уменьшение содержания углерода, более чем в 1.8 раза по отношению к таковому целинного участка (табл. 5). Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическим положением о предельном (максимальном и минимальном) уровне накопления органического вещества в типичном черноземе в условиях соответственно целины и длительного бессменного пара [7, 10].

Величина потерь углерода в структурных отдельностях разного размера, выделенных при мокром просеивании из воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм, существенно меньше по сравнению с

почвой в целом: во фракции <0.25 мм пахотного чернозема величина потерь достигает 29% относительно исходной величины (то есть целины). В оставшихся неразрушенными водоустойчивых макроагрегатах размером 2–1 мм уровень накопления углерода в составе агрегатов такого рода уменьшается лишь на 9% относительно исходной величины. Таким образом, можно говорить о большей водоустойчивости макроагрегатов размером 2–1 мм по сравнению со структурными отдельностями <0.25 мм и с почвой в целом.

При длительном паровании чернозема произошло резкое уменьшение содержания свободного ОВ в почве в целом (в 11 раз), а в составе фракции <0.25 мм проявилась тенденция к его уменьшению. В первую очередь это обусловлено существенной разницей в количестве свежих растительных остатков, поступающих в чернозем различных угодий: в условиях длительного чистого пара их поступление практически отсутствует. В водоустойчивых макроагрегатах размером 2–1 мм пахотного чернозема, напротив, отмечено увеличение такового в 5 раз, что, вероятно, связано с природой легких фракций. В условиях парования в составе органического вещества легких фракций чернозема могут доминировать высококонденсированные металлогуматы и гумусовые угли.

Для агрегированного ОВ пахотного чернозема отмечено уменьшение уровня накопления углерода, как в почве в целом, так и во всех его структурных отдельностях по отношению к таковым целины. В среднем, уменьшение величины накопления углерода ЛФ_{АГР} образует ряд: почва в целом (в 2.8 раза) > структурные отдельности <0.25 мм (в 2.1 раза) > водоустойчивые макроагрегаты 2–1 мм (в 1.4 раза).

В целинном черноземе уровень накопления углерода в составе органо-глинистых комплексов составляет 1.5% от массы почвы. В результате бес-

Таблица 4. Концентрация C, N и отношение C/N в органических и органо-минеральных фракциях в разных компонентах типичного чернозема и его структурных отдельностях, выделенных при мокром просеивании воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм

Вариант	Уголье	ЛФ _{СВ}			Неустойчивые (крупные) микроагрегаты (50–250 мкм)			Устойчивые (мелкие) микроагрегаты (1–50 мкм)					
		C	N	C/N	ЛФ _{АГР}		Ил		C	N	C/N		
					C	N	C	N				% от массы фракции	% от массы фракции
Почва в целом	Степь	21.18 ± 1.04	1.32 ± 0.08	16.1 ± 1.1	27.48 ± 0.25	1.94 ± 0.01	14.1 ± 0.1	8.16 ± 0.40	0.87 ± 0.04	9.35 ± 0.14	2.57 ± 0.09	0.26 ± 0.01	9.9 ± 0.1
	Пар	21.61 ± 1.45	1.02 ± 0.10	21.3 ± 1.3	33.58 ± 0.52	1.65 ± 0.05	20.4 ± 0.4	4.68 ± 0.10	0.49 ± 0.02	9.60 ± 0.16	1.48 ± 0.20	0.12 ± 0.02	12.7 ± 0.1
	Степь	19.65 ± 1.36	1.24 ± 0.08	15.8 ± 0.3	27.39 ± 0.60	2.00 ± 0.14	13.8 ± 1.2	8.46 ± 0.36	0.92 ± 0.05	9.23 ± 0.10	2.38 ± 0.03	0.24 ± 0.01	9.9 ± 0.3
	Пар	17.98 ± 0.04	0.73 ± 0.03	24.6 ± 0.4	22.82 ± 0.07	2.21 ± 0.03	10.3 ± 0.5	6.50 ± 0.15	0.71 ± 0.02	9.20 ± 0.09	1.54 ± 0.06	0.13 ± 0.05	11.8 ± 0.06
	Степь	18.08 ± 5.80	0.86 ± 0.23	21.0 ± 3.0	26.11 ± 3.11	1.83 ± 0.16	14.2 ± 0.5	7.44 ± 0.36	0.78 ± 0.05	9.54 ± 0.19	1.40 ± 0.09	0.13 ± 0.01	10.5 ± 0.1
	Пар	18.96 ± 5.23	0.73 ± 0.09	23.2 ± 5.3	30.28 ± 2.99	1.48 ± 0.12	20.5 ± 0.7	4.71 ± 0.08	0.49 ± 0.01	9.54 ± 0.06	1.25 ± 0.18	0.10 ± 0.02	13.1 ± 1.6
<0.25 мм													

Таблица 5. Содержание $C_{орг}$ в типичном черноземе и его структурных отдельностях, % от массы почвы/агрегатов

Вариант	Угодье	Легкие фракции						$C_{ил}$		Остаток		$C_{общ}$	
		$ЛФ_{СВ}$		$ЛФ_{АГР}$		$\Sigma_{ЛФ}$							
		$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t	$M \pm SE$	t
Почва в целом	Степь	0.11 ± 0.02	11.5	1.20 ± 0.20	7.3	1.31 ± 0.20	6.7	1.49 ± 0.08	9.5	2.00 ± 0.06	14.0	4.80 ± 0.27	13.9
	Пар	0.01 ± 0.01		0.43 ± 0.03		0.33 ± 0.21		1.04 ± 0.05		1.14 ± 0.10		2.61 ± 0.14	
2–1 мм	Степь	0.22 ± 0.06	27.5	1.36 ± 0.18	3.7	1.58 ± 0.23	5.1	1.52 ± 0.02	16.3	1.81 ± 0.04	28.7	4.90 ± 0.22	5.0
	Пар	1.10 ± 0.07		0.95 ± 0.10		2.05 ± 0.10		1.33 ± 0.01		1.07 ± 0.06		4.45 ± 0.10	
<0.25 мм	Степь	0.03 ± 0.03	1.3	1.07 ± 0.11	9.6	1.10 ± 0.12	9.6	1.31 ± 0.07	10.2	1.10 ± 0.05	2.48	3.51 ± 0.20	12.3
	Пар	0.01 ± 0.01		0.51 ± 0.09		0.53 ± 0.08		1.01 ± 0.02		0.96 ± 0.12		2.49 ± 0.03	

сменного парования этого чернозема за счет минерализации относительно более инертного ОВ органо-глинистых комплексов наблюдается меньшее (в 1.4 раза) снижение содержания углерода в иле по сравнению с таковым ОВ почвы в целом. Для ОВ фракции <0.25 мм эта величина несколько меньше (в 1.3 раза), а для водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм пахотного чернозема величина потерь минимальна (в 1.1 раза). ОВ органо-глинистых комплексов, локализованных в составе водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм, более стабильно по сравнению с таковым структурных отдельностей <0.25 мм, выделенных при мокром просеивании, и почвой в целом.

Для ОВ фракции остатка пахотного чернозема, как и для почвы в целом, отмечено резкое снижение уровня накопления углерода (в 1.8 раза) по отношению к таковому целины. Это обусловлено минерализацией углерода устойчивых в ультразвуковом поле микроагрегатов (инертное ОВ) в условиях полного отсутствия поступления свежего ОВ в чернозем при его длительном бесменном паровании. Для водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм величина потерь углерода также очень велика (в 1.7 раз), в то время как во фракции <0.25 мм пахотного чернозема величина потерь существенно меньше – уровень накопления углерода меньше лишь в 1.1 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что агрегированность типичного чернозема в значительной степени зависит от системы его использования: содержание воздушно-сухих агрегатов (10–1 мм) максимально (более 70%) в условиях степного ценоза. В черноземе, функционирующем в течение 52 лет в режиме чистого пара, их доля уменьшается в 1.3 раза. При бесменном паровании чернозема происходит увеличение степени глыбистости структурных отдельностей с одновременным возрастанием степени пылеватости почвенной структуры. Наблюдаемое явление сопровождается уменьшением

количества большинства наиболее агрономически ценных агрегатов в почве, исключая таковые размером 2–1 мм.

Установлено, что содержание воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм практически не меняется даже при резко контрастных системах использования.

В то же время водоустойчивость воздушно-сухих агрегатов этой размерности резко различается между вариантами степь и пар. Воздушно-сухие структурные отдельности размером 2–1 мм в целинном черноземе характеризуются высокой водоустойчивостью: они на 80% представлены водоустойчивыми агрегатами той же размерности (2–1 мм). Полувековое бесменное парование чернозема резко сократило степень стабильности водоустойчивой структуры – отмечено практически полное исчезновение водоустойчивых агрегатов размером 2–1 мм в составе воздушно-сухих структурных отдельностей того же размера.

В среднем, доля свободного ОВ в составе структурных отдельностей разного размера, выделенных мокрым просеиванием из воздушно-сухих агрегатов 2–1 мм, в результате 52-летнего функционирования в режиме чистого пара резко снижается: от 2 (<0.25 мм) до более чем 12 раз (почва в целом). В водоустойчивых структурных отдельностях размером 2–1 мм пахотного чернозема, напротив, доленое участие свободного ОВ возрастает более чем в 5 раз.

Аналитические данные свидетельствуют о высокой степени микроагрегированности структурных отдельностей разного размера, выделенных при мокром просеивании из воздушно-сухих агрегатов диаметром 2–1 мм. В результате длительного использования типичного чернозема в режиме чистого пара отмечены значительные потери углерода во всех пулах ОВ. При этом наименьшие величины потерь содержания $C_{орг}$ отмечены практически для всех компонентов ОВ ($ЛФ_{СВ}$, $ЛФ_{АГР}$, ил) оставшихся неразрушенными водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм. Это свидетельствует об их большей степени стабильности по сравнению с отдельностями фракции <0.25 мм и

почвой в целом, а также о большей степени защищенности ОВ, локализованного в структурных отдельностях данного размера. Оставшаяся часть водоустойчивых макроагрегатов пара сходна по изученным свойствам таковой целины.

Благодарность. Исследования проведены при частичной поддержке гранта Президиума РАН “Теоретические и экспериментальные исследования для эффективного научно-технологического развития агропромышленного комплекса РФ” (2018–2020 гг.) с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемяева З.С.* Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2008. 48 с.
2. *Артемяева З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
3. *Артемяева З.С., Федотов Г.Н.* Состав функциональных пулов легкоразлагаемого органического вещества автоморфных зонального ряда почв Центра Русской равнины // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2013. № 4. С. 3–10.
4. *Воронин А.Д., Середа Н.А.* Состав и строение фракций микроагрегатов некоторых типов почв // Вестник Моск. ун-та. Сер. 16, биология, почвоведение. 1976. № 1. С. 100–106.
5. Длительные полевые опыты на черноземах Курской области России (путеводитель). Курск: Всерос. НИИ земледелия и защиты почв от эрозии РАСХН, 2010. 35 с.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
7. *Козут Б.М.* Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании. Автореф. дис. ... докт. с.-х. наук. М., 1996. 48 с.
8. *Козут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
9. *Кузнецова И.В.* Содержание и состав органического вещества черноземов и его роль в образовании водопропрочной структуры // Почвоведение. 1998. № 1. С. 41–50.
10. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
11. *Сысуев С.А.* Содержание и состав органического вещества агрегатов черноземов. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2005. 24 с.
12. *Травникова Л.С., Артемяева З.С.* Физическое фракционирование органического вещества почв с целью изучения его устойчивости к биодegradации // Экология и почвоведение. Избр. лекции 10-й Всерос. школы. Т. IV. Пушкино, 2001. С. 337–346.
13. *Хан Д.В.* Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.
14. *Шаймухаметов М.Ш.* Опыт использования ультразвука при изучении механизма закрепления органического вещества в почве // Почвоведение. 1974. № 5. С. 154–161.
15. *Шаймухаметов М.Ш., Воронина К.А.* Методика фракционирования органо-глинистых комплексов почв с помощью лабораторных центрифуг // Почвоведение. 1972. № 8. С. 134–138.
16. *Шеин Е.В.* Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 432 с.
17. *Amato M., Ladd J.N.* Decomposition of ^{14}C -labelled glucose and legume material in soils. P. properties influencing the accumulation of organic residue C and microbial biomass C // Soil Biol. Biochem. 1992. V. 24. P. 455–464.
18. *Angers D.A.* Changes in soil aggregation and organic carbon under corn and alfalfa // Soil Sci. Soc. Am. J. 1992. V. 56. P. 1244–1249.
19. *Asham M.R., Hallett P.D., Brookes P.C.* Are the links between soil aggregate size class, soil organic matter and respiration rate artifacts of the fractionation procedure? // Soil Biol. Biochem. 2003. V. 35. P. 435–444.
20. *Balesdent J., Mariotti A., Guillet B.* Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics // Soil Biol. Biochem. 1987. V. 19. P. 25–30.
21. *Blanco-Canqui H., Lal R.* Mechanisms of Carbon Sequestration in Soil Aggregates // Critical Reviews in Plant Sciences. 2004. V. 23(6). P. 481–504.
22. *Bouajila A., Gallali T.* Land use effect on soil and particulate organic carbon, and aggregate stability in some soils in Tunisia // African J. Agricul. Res. 2010. V. 5(8). P. 764–774.
23. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management. P. A review // Geoderma. 2005. V. 124. P. 3–22.
24. *Chaney K., Swift R.S.* The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils // J. Soil Sci. 1984. V. 35. P. 223–230.
25. *Chenu C., Le Bissonnais Y., Arrouays D.* Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. P. 1479–1486.
26. *Chenu C., Plante A.F.* Clay-sized organo-mineral complexes in a cultivation chronosequence. P. revisiting the concept of the “organo-mineral complex” // European J. Soil Sci. 2006. V. 57. P. 596–607.
27. *Edwards A.P., Bremner J.M.* Microaggregates in soils // J. Soil Sci. 1967. V. 18(1). P. 64–73.
28. *Elliott E.T.* Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1986. V. 50. P. 627–633.
29. *Emerson W.W.* The structure of soil crumbs // J. Soil Sci. 1959. V. 10. P. 235–244.
30. *Emerson W.W.* Physical properties and structure // Soil factors in crop production in a semi-arid environment / Eds. J.S. Russell, E.L. Greacen. University of Queensland Press, St. Lucia, QLD, Australia. 1977. P. 78–104.
31. *Golchin A., Oades J.M., Skjemstad J.O., Clarke P.* Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy // Austr. J. Soil Res. 1994. V. 32. P. 285–309.

32. *Golchin A., Clarke P., Oades J.M., Skjemstad J.O.* The effect of cultivation on the composition of organic matter and structural stability of soils // *Austr. J. Soil Res.* 1995. V. 33. P. 975–993.
33. *Golchin A., Baldock J.A., Oades J.M.* A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics // *P. Soil Processes and the Carbon Cycle.* 1998. P. 245–266.
34. *Hamblin A.P.* Structural Features of Aggregates in Some East England Silt // *J. Soil Sci.* 1977. V. 28(3). P. 23–28.
35. *Krol A., Lipiec J., Turski M., Kus J.* Effects of organic and conventional management on physical properties of soil aggregates // *Int. Agrophys.* 2013. V. 27. P. 15–21.
36. *Post W.M., Kwon K.C.* Soil carbon sequestration and land use change. P. processes and potential // *Glob. Change Biol.* 2000. V. 6. P. 317–327.
37. *Schmidt M.W., Rumpel C., Kögel-Knabner I.* Evaluation of an ultrasonic dispersion procedure to isolate primary organomineral complexes from soils // *Eur. J. Soil Sci.* 1999. V. 50. P. 87–94.
38. *Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K.* Stabilization mechanisms of soil organic matter. P. implications for c-saturation of soils // *Plant Soil.* 2002. V. 241. P. 155–176.
39. *Tang Z., Wu L., Luo Y., Christie P.* Size fractionation and characterization of nanocolloidal particles in soils // *Environ. Geochem. Health.* 2009. V. 31. P. 1–10.
40. *Tisdall J.M., Oades J.M.* Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils // *J. Soil Sci.* 1982. V. 33. P. 141–163.
41. *Oades J.M.* Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management // *Plant Soil.* 1984. V. 76. P. 319–337.
42. *Oades J.M.* The retention of organic matter in soils // *Biogeochemistry.* 1988. V. 5. P. 35–70.
43. *Oades J.M., Waters A.C.* Aggregate Hierarchy in Soils // *Aust. J. Soil Res.* 1991. V. 29. P. 815–828.
44. *Onweremadu E.U., Onyia V.N., Anikwe M.A.N.* Carbon and nitrogen distribution in water-stable aggregates under two tillage techniques in Fluvisols of Owerri area, southeastern Nigeria // *Soil Tillage Res.* 2007. V. 97(2). P. 195–206.
45. *World reference base for soil resources 2014. A framework for international classification, correlation and communication, Word Soil Resource Report 106.* FAO. Rome. 2014. 181 p.

Organic Matter of the Air-Dried and Water-Stable Macroaggregates of Haplic Chernozem in Contrasting Variants of Land Use

B. M. Kogut^{a,*}, Z. S. Artemyeva^a, N. P. Kirillova^{a,b}, M. A. Yashin^a, and E. I. Soshnikova^a

^a*Dokuchaev Soil Science Institute, per. Pyzhevskii 7, Moscow, 119017 Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: kogutb@mail.ru*

The content and the composition of soil structural units of different hierarchical levels were studied for Haplic Chernozems (Loamic, Pachic) of Kursk region under contrasting variants of land use (steppe and bare fallow). A detailed scheme of the method used to analyze the content and composition of organic matter in granulodensimetric fractions from the soil aggregates of different sizes and different water stability was developed. The major attention was paid to the study of aggregates isolated by the wet sifting method from the air-dried aggregates of 2–1 mm in size, as the most representative agronomically valuable aggregate fraction. Regardless of the land use, the content of air-dried aggregates of 2–1 mm was approximately the same in the soils under steppe and bare fallow. However, their water stability differed considerably between the steppe and the bare fallow. The long-term (52 yrs) fallowing of the soil led to considerable losses of organic matter from the entire soil and from separate aggregate fractions. Minimum losses were revealed for virtually all components of organic matter in the light-weight fractions and for the clay fraction of the undisturbed water-stable macroaggregates of 2–1 mm.

Keywords: land use, virgin land, continuous bare fallow, aggregates, granulodensimetric fractionation