

УДК 631.4

ИЗМЕНЕНИЕ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА МАКРО- И МИКРОАГРЕГАТОВ ТИПИЧНОГО ЧЕРНОЗЕМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

© 2021 г. З. С. Артемьева^{а, *}, Н. Н. Данченко^а, Н. П. Кириллова^б, Н. П. Масютенко^с,
Е. В. Дубовик^с, А. В. Кузнецов^с, Б. М. Когут^а

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

^б Факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^с Курский федеральный аграрный научный центр, ул. Карла Маркса, 70б, Курск, 305021 Россия

*e-mail: artemyevazs@mail.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 13.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Дана количественная оценка содержания и состава органического вещества (ОВ) структурных отдельных агрочерноземов, расположенных в разных эрозионно-аккумулятивных зонах. Исследования проведены на типичном черноземе в условиях длительного многофакторного полевого опыта на водораздельном плато и склоне северной экспозиции. Показано, что эрозионные процессы приводят к существенным потерям ОВ водоустойчивых структурных отдельных, выделенных мокрым просеиванием из воздушно-сухих макроагрегатов размером 2–1 мм. Отмечены основные черты характера восстановления содержания углерода в агрегатной структуре агрочернозема аккумулятивной зоны. Проведено детальное сравнительное изучение количественного и качественного состава пулов ОВ разной локализации в водоустойчивых макро- (2–1 мм) и микро- (<0.25 мм) агрегатах, выделенных из воздушно-сухих макроагрегатов размером 2–1 мм. Выявлена общая тенденция уменьшения количества дискретного ОВ, вызванного как эрозионными процессами, так и распашкой агрочерноземов, приуроченных к разным зонам денудации–аккумуляции на склоне, на фоне включения в состав пахотного горизонта эродированных почв материала нижележащего слоя.

Ключевые слова: эрозия, водоустойчивая структура, грануло-денсиметрическое фракционирование, свободное органическое вещество, агрегированное органическое вещество, илистая фракция

DOI: 10.31857/S0032180X21110022

ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почв является наиболее распространенной формой их деградации [5, 17, 31, 34, 37, 39, 44]. Она представляет собой четырехэтапный процесс, включающий отрыв, разрушение, транспортировку/перераспределение и осаждение отложений, при этом органическое вещество (ОВ) почвы оказывает влияние на протекание всех четырех этапов.

Качество и стабильность структуры почвы зависят прежде всего от устойчивости агрегатов в воде. Многочисленные исследования описывают взаимосвязь между показателями агрегатной устойчивости и эрозией почв [16, 18, 19, 29, 36, 49]. Хорошая водоустойчивость агрегатов определяется высоким содержанием ОВ в агрегатах и непосредственно влияет на структуру почвы и ее физические свойства. Механизм воздействия ОВ на стабильность водоустойчивых агрегатов почвы связан с уменьшением их “смачиваемости” и увеличением механической прочности [38].

Во многих работах было исследовано соотношение между общим уровнем накопления ОВ в почве и количеством водоустойчивых агрегатов [12, 18, 30]. Однако лишь немногие авторы пытались выделить и охарактеризовать фракции ОВ в водоустойчивых структурных отдельностях [13, 21, 27]. К настоящему времени получены сведения по трансформации содержания ОВ и его компонентов в агрегатах разного размера в обрабатываемых верхних слоях пахотных почв [40, 43], однако пока еще мало информации об их перераспределении под влиянием эрозии [42, 47].

Эрозия способствует активному распаду агрегатов [25]. В свою очередь, в результате разрушения агрегатов под воздействием эрозионных процессов из них высвобождаются ранее физически защищенные компоненты ОВ плотностью <1.6–1.8 г/см³, которые в дальнейшем легче деградируют по сравнению с таковыми большей плотности [24, 35, 41]. В связи с этим сведения о пулах ОВ,

локализованных в водоустойчивых структурных отдельностях разного размера, имеют важное значение для понимания роли ОВ в изменении водоустойчивой структуры почвы под воздействием эрозионных процессов.

Цели исследования: 1 – охарактеризовать макроструктуру типичного чернозема разной локализации на склоне; 2 – выделить водоустойчивые структурные отдельности из воздушно-сухих макроагрегатов размером 2–1 мм; 3 – оценить количественный и качественный состав ОВ водоустойчивых структурных отдельностей разного размера (макро- (2–1 мм) и микро- (<0.25 мм) агрегаты), выделенных из воздушно-сухих макроагрегатов размером 2–1 мм, в агрочерноземах, расположенных в разных эрозионно-аккумулятивных зонах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на типичном черноземе в условиях многофакторного полевого опыта ВНИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курская область, Медвенский район, с. Панино) на водораздельном плато и склоне северной экспозиции крутизной до 3° в слое 0–25 см после уборки урожая сельскохозяйственных культур.

Эрозионно-аккумулятивные зоны склона классифицировали по Ермолаеву [6]. Согласно этой классификации, на склонах выделены следующие зоны: 1) отсутствия эрозии (51°31.744 N, 036°07.272 E); 2) эрозионная (эрозионно-активная) (51°32.000 N; 036°07.063 E); 3) преобладающей аккумуляции (51°31.807 N; 036°06.004 E). Ранее было установлено, что различные их сочетания приурочены к определенным формам рельефа, где формируются специфические элементарные почвенные структуры [1–3, 9]. Исследования проводили на следующих вариантах многолетнего полевого опыта, заложенного в 1984 г.: 1 – несмытый; 2 – смытый; 3 – намытый агрочернозема. Вариант 1 был заложен на водораздельном плато в условиях зернопаропропашного севооборота (чистый пар – озимая пшеница – кукуруза – ячмень), в год отбора образцов (2017 г.) участок был под чистым паром; вариант 2 – на склоне северной экспозиции в условиях зернотравяного севооборота (озимая пшеница – ячмень + травы – многолетние травы – многолетние травы), в год отбора образцов участок был под озимой пшеницей; вариант 3 – на склоне северной экспозиции в условиях такого же зернотравяного севооборота, а в год отбора образцов участок также был под озимой пшеницей.

С каждого варианта опыта отбирали по 3 ненарушенных монолитных образца почвы (25 × 25 × 15 см). Способ робоподготовки к воздушно-сухому просеиванию образцов почвы по Саввинову и далее мокрому просеиванию в модификации Хана выделенных воздушно-сухих агрегатов диаметром 2–1 мм описаны ранее [7]. Исследования

водоустойчивой структуры проводили способом мокрого просеивания воздушно-сухих макроагрегатов размером 2–1 мм как наиболее представительных в изучаемом типичном черноземе [7, 8]. Были получены водоустойчивые структурные отдельности размером 2–1, 1–0.5, 0.5–0.25 и <0.25 мм.

Для исследования состава компонентов ОВ водоустойчивые структурные отдельности размером 2–1 и <0.25 мм [7] были подвергнуты грануло-денсиметрическому фракционированию.

Для выделения разных пулов ОВ применяли модифицированный вариант грануло-денсиметрического фракционирования, полная схема которого представлена ранее [2]. Модификация заключается в исключении плотности 2.0 г/см³ из схемы фракционирования, поскольку сопряженное исследование фракции 1.8–2.0 г/см³ в режиме построения карты распределения элементов с электронной микроскопией выявило практически полное преобладание частиц кварца, покрытых глинистыми минералами с единичными фитолитами [10].

Свободное ОВ (ЛФ_{СВ}), локализованное в межагрегатном пространстве почвы – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³), выделяли с помощью бромформ-этанольной смеси. Далее агрегаты разрушали ультразвуком и выделяли илстую фракцию – ил (<1 мкм). 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. После удаления илстых частиц из образца с помощью бромформ-этанольной смеси выделяли агрегированное ОВ (ЛФ_{АГР}) – легкие фракции (плотность <1.8 г/см³). Все процедуры выделения выполняли в трехкратной повторности.

Схема позволяет выделить 4 пула ОВ: неагрегированное, свободное (ЛФ_{СВ}); агрегированное (ЛФ_{АГР}); ил (Ил) и остаток (Ост).

Содержание углерода (ТС) и азота (ТН) определяли методом каталитического сжигания на анализаторе TOC Analyzer (Shimadzu, Japan). Все измерения выполняли в трехкратной повторности.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием статистического пакета Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA). Выбранный уровень значимости $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Агрегатный состав исследованных почв. Содержание воздушно-сухих структурных отдель-

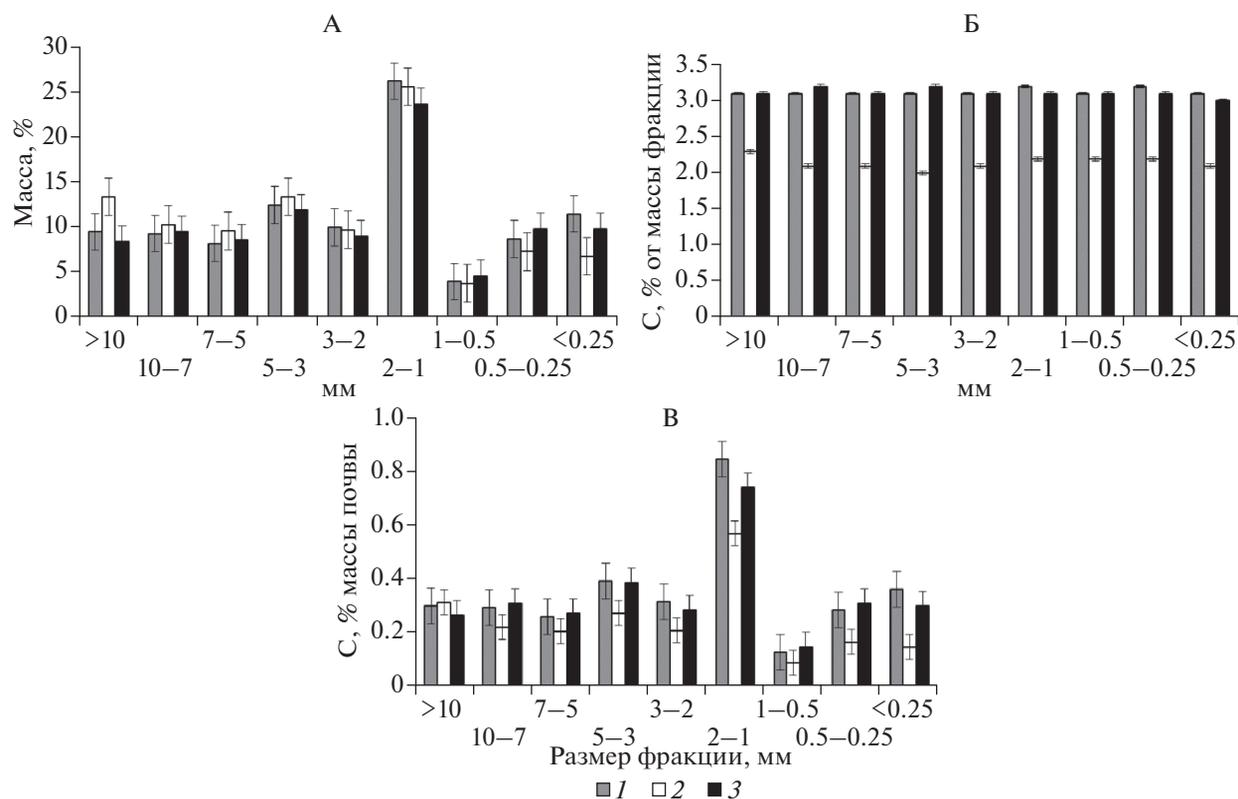


Рис. 1. Распределение структурных отдельностей в агрочерноземах разной локализации на склоне (А), концентрация (Б) и уровень накопления (В) в них углерода. Здесь и далее: 1 – несмытый, 2 – смытый, 3 – намытый варианты.

ностей изменялось в зависимости от размера в следующих последовательностях (рис. 1, А): в полнопрофильном агрочерноземе – $(1-0.5) < < (7-5) < (0.5-0.25) < (10-7) < (>10) < (3-2) < (<0.25) < (5-3) < (2-1)$ мм; в эродированном агрочерноземе – $(1-0.5) < (<0.25) < (0.5-0.25) < < (7-5) < (3-2) < (10-7) < (>10) = (5-3) < (2-1)$ мм; в агрочерноземе аккумулятивной зоны – $(1-0.5) < (>10) < (7-5) < (3-2) < (10-7) < (<0.25) = (0.5-0.25) < (5-3) < (2-1)$ мм. Следует отметить статистически значимое уменьшение количества в эродированном агрочерноземе наиболее агрономически ценных агрегатов (3–1 мм), что предполагает разрушение преимущественно воздушно-сухих структурных отдельностей диаметром < 3 мм, за счет чего эродированная почва оказывается относительно обогащенной агрегатами более крупного размера (> 3 мм). В то же время некоторые исследователи отмечают преимущественный вынос мелких фракций почвы (< 0.05 мм) по сравнению с более крупными (> 1 мм) [25]. Однако нельзя исключить возможность разрушения структурных отдельностей всех размеров и вынос их составляющих вниз по склону. В аккумулятивной зоне происходит седиментация вынесенных сверху отложений и их частичное переагрегирование. Увеличение содержания агрегатов разме-

ром 1–0.5 и 0.5–0.25 мм в намытом агрочерноземе по сравнению с таковыми неэродированного агрочернозема, видимо, можно расценивать в качестве подтверждения возможности такого рода процессов. Следует отметить, что воздушно-сухие макроагрегаты размером 3–2 и 2–1 мм представляют собой наименее подверженные изменениям фракции в составе агрегатной структуры агрочерноземов, приуроченных к разным эрозионно-аккумулятивным зонам.

Концентрация углерода (% от массы фракции) в воздушно-сухих структурных отдельностях смытого агрочернозема статистически значимо уменьшается (в 1.5 раза) относительно таковой полнопрофильного варианта во всех классах структурных отдельностей, исключая фракции размером > 10 и 5–3 мм, где это уменьшение составило 1.3 и 1.6 раза соответственно (рис. 1, Б). Это свидетельствует об интенсификации процессов разрушения воздушно-сухих структурных отдельностей под воздействием эрозионных процессов [25]. Это согласуется с данными о минерализации ОВ, локализованного в структурных отдельностях в результате их деградации, полученными при изучении ОВ эрозионных ландшафтов основных типов почв Центра Русской равнины [3, 4, 9]. Это сопровождается выносом

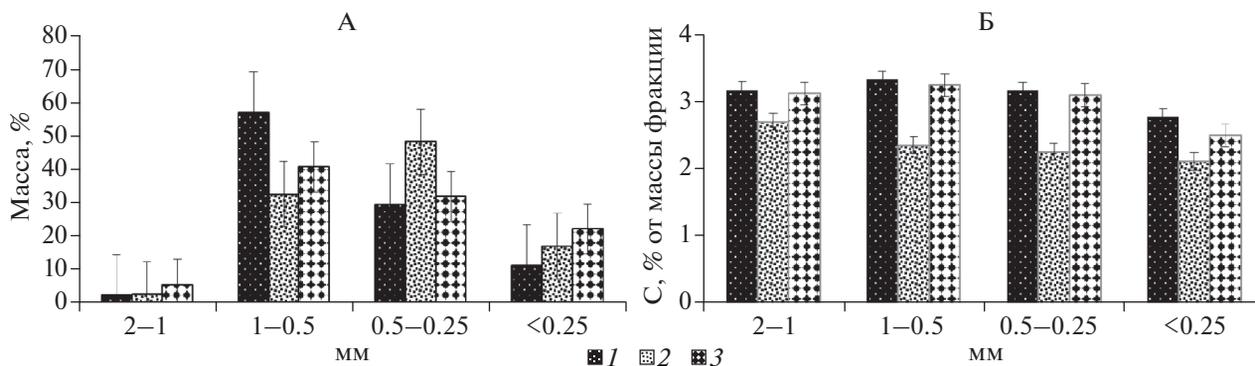


Рис. 2. Распределение водоустойчивых структурных отдельностей (А) в воздушно-сухих агрегатах (2–1 мм) и уровень накопления в них углерода (% от массы фракции) (Б).

обогащенных ОВ тонкодисперсных частиц вниз по склону с их последующим отложением в аккумулятивной зоне. Таким образом, структурные отдельности чернозема аккумулятивной зоны обогащаются отлагаемым высокогумусированным тонкодисперсным материалом.

В намытом агрочерноземе содержание углерода (% от массы фракции) восстанавливается до уровня полнопрофильной почвы, что свидетельствует об отложении смытого материала разрушенных структурных отдельностей в аккумулятивной зоне. При этом активное сельскохозяйственное использование исследованных почв, с одной стороны, усиливает разрушение агрегатов, а с другой, благоприятствует агрегированию почвенной массы на фоне поступления свежего ОВ растительных остатков культурных растений.

Воздушно-сухие структурные отдельности размером 2–1 мм – наиболее представительная по массе (рис. 1, А) и уровню накопления ОВ (% на массу почвы) (рис. 1, В) и одновременно одна из наименее подверженных изменениям фракция в составе агрегатной структуры агрочерноземов разных эрозионно-аккумулятивных зон.

Водоустойчивая структура воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм. Содержание водоустойчивых структурных отдельностей, выделенных из воздушно-сухих макроагрегатов (2–1 мм), в полнопрофильном и намытом агрочерноземах увеличивалось в зависимости от их размера в следующей последовательности: (2–1) < (<0.25) < (0.5–0.25) < (1–0.5) мм. В смытом агрочерноземе характер распределения водоустойчивых структурных отдельностей несколько отличался: (2–1) < (<0.25) < (1–0.5) < (0.5–0.25) мм (рис. 2, А).

Аналитические данные свидетельствуют, что под влиянием эрозионных процессов происходит преимущественное разрушение структурных отдельностей размером 1–0.5 мм (в 1.8 раза), сопровождающееся увеличением доли структурных отдельностей меньшего размера (<0.5 мм): в

1.5–1.6 раза. Это не исключает вероятность того, что относительное увеличение долевого участия структурных отдельностей размера <0.5 мм может быть следствием поступления материала разрушенных воздушно-сухих структурных отдельностей разной размерности с последующей его перепакровкой/агрегированием на фоне постоянного поступления свежего ОВ растительных остатков культурных растений, а также включения в состав пахотного горизонта эродированного агрочернозема материала нижележащего почвенного слоя с иным характером распределения водоустойчивых структурных отдельностей.

В намытом агрочерноземе наблюдается существенное увеличение количества водоустойчивых структурных отдельностей всех исследованных размерностей, за исключением 0.5–0.25 мм, количество которых уменьшилось в 1.5 раза относительно такового эродированной почвы. Особенно резкие изменения наблюдались для водоустойчивых макроагрегатов размером 2–1 мм: их количество в намытом агрочерноземе увеличилось в 2.2 раза (по сравнению с эродированным) и более чем в 2.4 раза (относительно полнопрофильного). Наблюдаемое перераспределение агрегатов по размерам, по-видимому, являются следствием седиментации эродированного материала и сложного характера процессов образования–распада структурных отдельностей в аккумулятивной зоне.

В эродированном агрочерноземе содержание углерода (% от массы фракции) водоустойчивых структурных отдельностей уменьшается во всех исследованных размерностях: 1–0.5 мм ≈ 0.5–0.25 мм (в 1.4 раза) > (<0.25 мм) (в 1.3 раза) > 2–1 мм (в 1.2 раза) (рис. 2, Б). Уменьшение содержания ОВ является следствием включения в состав пахотного горизонта менее гумусированного материала нижележащего почвенного слоя [1–3]. Это сопровождается интенсификацией *in situ* минерализации ранее физически защищенного ОВ, которое высвобождается при разрушении агрегатов

Таблица 1. Компонентный состав водоустойчивых структурных отдельностей размером 2–1 и <0.25 мм. Среднее (стандартная ошибка)

Структурные отдельности, мм	Вариант	ЛФ _{СВ}	ЛФ _{АГР}	Ил	Остаток
		% от массы структурных отдельностей			
2–1	Несмытый	0.97 (0.10)	2.78 (0.13)	24.14 (0.46)	72.14 (0.61)
	Смытый	0.65 (0.13)	2.12 (0.37)	23.56 (0.72)	73.67 (0.60)
	Намытый	0.88 (0.26)	3.33 (0.31)	21.75 (1.01)	74.05 (0.74)
<0.25	Несмытый	Не обн.	2.64 (0.24)	21.63 (0.72)	75.73 (0.95)
	Смытый	Не обн.	1.36 (0.19)	22.89 (0.71)	75.74 (0.69)
	Намытый	Не обн.	2.29 (0.25)	19.66 (0.11)	78.05 (0.29)

и становится более доступным для микробиологических атак [24, 35, 41].

В намытом агрочерноземе аккумулятивной зоны содержание углерода водоустойчивых структурных отдельностей всех изученных размерностей практически восстанавливается до такового полнопрофильного агрочернозема.

Таким образом, аналитические данные свидетельствуют, что в аккумулятивной зоне происходит седиментация вынесенного сверху почвенного материала с последующим его включением в процессы агрегирования. Это согласуется с литературными данными [23, 32, 33] об обогащении намытых почв **ОВ** за счет отложения в них высокогумусированного тонкодисперсного материала верхних горизонтов эродированных почв. Росту концентрации углерода водоустойчивых структурных отдельностей в аккумулятивной зоне также может способствовать локальный гидроморфизм, часто наблюдаемый внизу катены. Последнее положение согласуется с данными об относительной повышенной влажности намытых почв в разных биоклиматических зонах мира [14, 20, 47, 48].

Компонентный состав водоустойчивых структурных отдельностей воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм. Аналитические данные выявили, что вне зависимости от положения агрочерноземов на склоне, компонентный состав водоустойчивых структурных отдельностей разного размера, выделенных их воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм, практически идентичен. Доля компонентов в структурных отдельностях разного размера уменьшается в ряду: Остаток (73–78%) > Ил (20–24%) > ЛФ_{АГР} (1–3%) (табл. 1). Исключение отмечено лишь для свободного **ОВ** (ЛФ_{СВ}), которое в микроагрегатах практически отсутствует (обнаружены следы).

В макроагрегатах эродированного агрочернозема выявлено статистически достоверное уменьшение количества ЛФ_{СВ} по сравнению с таковым полнопрофильного (в 1.5 раза), что обусловлено, в первую очередь, включением в состав пахотного горизонта эродированного чернозема материала

нижележащего почвенного слоя с исходно меньшим содержанием свободного **ОВ**. Увеличение количества ЛФ_{СВ} в намытом агрочерноземе может быть совокупным результатом отложения эродированного **ОВ**, поступления свежего **ОВ** растительных остатков сельскохозяйственных культур, а также консервации **ОВ** в условиях повышенного увлажнения внизу склона.

Для агрегированного **ОВ** (ЛФ_{АГР}) во всех объектах исследования наблюдается единая закономерность: его содержание значимо уменьшается при переходе от несмытого к смытому чернозему, а затем возрастает в намытом варианте. Следует отметить, что в микроагрегатах величина снижения существенно больше по сравнению с таковой в макроагрегатах: 1.9 против 1.3 раза соответственно.

Доля ила в водоустойчивых структурных отдельностях по вариантам опыта меняется незначительно. Для микроагрегатов отмечено увеличение количества ила в смытом и его уменьшение в намытом агрочерноземах. Для макроагрегатов характерно постепенное уменьшение количества ила вниз по склону.

Доля фракции **Ост** в разных зонах денудации-аккумуляции меняется незначительно.

Таким образом можно отметить общую тенденцию уменьшения количества дискретного **ОВ**, вызванного как эрозийными процессами, так и распашкой исследованных агрочерноземов на фоне включения в состав пахотного горизонта эродированных почв материала нижележащего слоя. Следствием этих процессов является относительное увеличение минеральной составляющей почв (**Ил**). Этому также способствует вынос эродированного материала, обогащенного дискретным **ОВ**, с последующим его переотложением в зоне аккумуляции.

Качественный состав **ОВ водоустойчивых структурных отдельностей.** Вне зависимости от размера структурных отдельностей, для величины концентрации **С** дискретного **ОВ** (ЛФ_{СВ} и ЛФ_{АГР}) наблюдается единая тенденция к уменьшению в ряду: эродированный > полнопрофильный > намытый

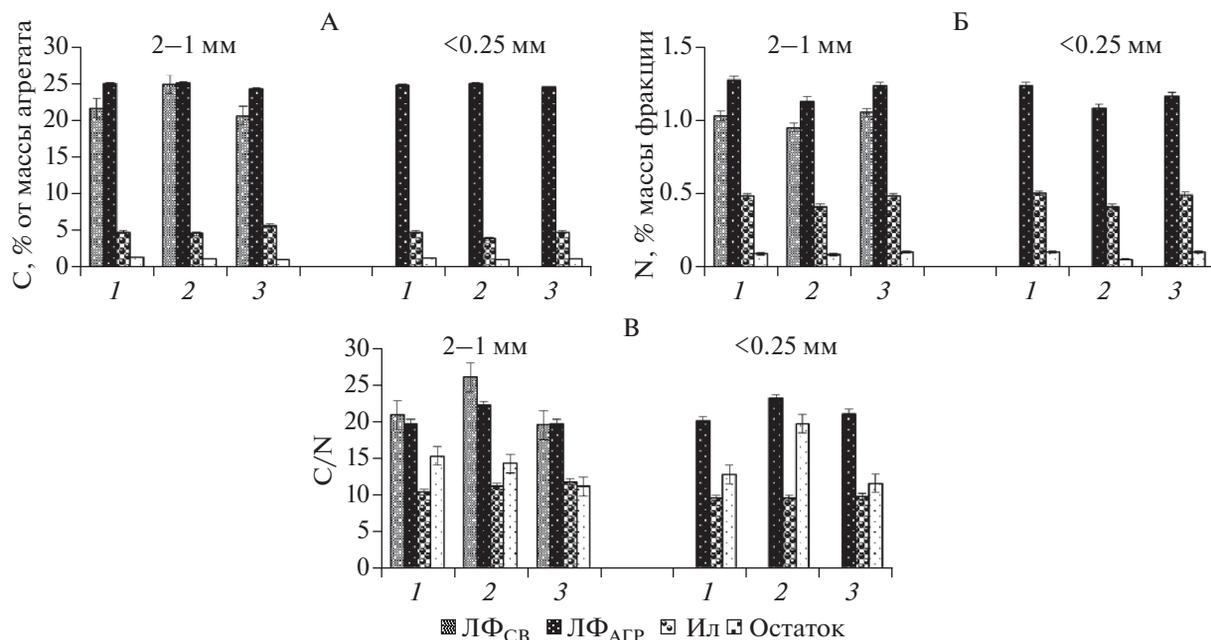


Рис. 3. Величины концентрации углерода (% от массы фракции) (А) и азота (% от массы фракции) (Б), а также отношения C/N (В) в органических и органо-минеральных фракциях в разных компонентах ОВ водоустойчивых структурных отдельностей, выделенных из воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм.

(рис. 3, А). Для азота наблюдается иной характер распределения величин концентрации, которые увеличиваются в такой же последовательности. Минимальные величины концентрации азота, аналогично углероду, отмечены для эродированного агрочернозема, однако в намытом агрочерноземе, в противоположность углероду, концентрация азота не восстанавливается даже до уровня полнопрофильного варианта (рис. 3, Б).

Средняя величина отношения C/N в дискретном ОВ вне зависимости от размера структурных отдельностей увеличивается в ряду: эродированный < полнопрофильный ≈ намытый (рис. 3, В). Отмеченные максимальные величины отношения C/N в эродированном агрочерноземе, по-видимому, свидетельствуют о протекающих процессах обновления дискретного ОВ на всех уровнях организации почвенной массы на фоне изменившихся экологических условий.

Вне зависимости от размера структурных отдельностей величины концентрации С и N минерально-ассоциированного ОВ (Ил и Ост) уменьшаются в ряду: полнопрофильный ≈ намытый > > эродированный (рис. 3, А, Б). Средняя величина отношения C/N в илистой фракции вне зависимости от размера структурных отдельностей увеличивается в ряду: полнопрофильный < эродированный < намытый (рис. 3, В). При этом средняя величина отношения C/N для илистой фракции микроагрегатов (9.6) меньше таковой макроагрегатов (11.0), что позволяет предполо-

жить, что ОВ ила макроагрегатов обновляется более быстрыми темпами.

Для фракции Ост отмечена иная закономерность: средняя величина отношения C/N в макроагрегатах уменьшается в ряду: полнопрофильный > > эродированный > намытый, а в микроагрегатах увеличивается в ряду: намытый < полнопрофильный < эродированный.

Уровень накопления углерода в водоустойчивых структурных отдельностях разного размера. Вне зависимости от положения на склоне макроагрегаты накапливают больше углерода по сравнению с микроагрегатами, что согласуется с многочисленными литературными данными [15, 21, 22, 26, 28, 45, 49]. При этом величина увеличения возрастает в ряду: полнопрофильный (в 1.1 раза) < < намытый (в 1.2 раза) < < смытый (в 1.3 раза).

В микроагрегатах эродированного агрочернозема уровень накопления углерода статистически значительно уменьшается относительно такового полнопрофильного в 1.3 раза, а в макроагрегатах в 1.2 раза. Содержание углерода в водоустойчивых структурных отдельностях разного размера намытого агрочернозема восстанавливается, не достигая, однако, уровня полнопрофильного (рис. 4, А).

Выявлены существенные различия по содержанию углерода в компонентах ОВ водоустойчивых структурных отдельностей разного размера между агрочерноземами, приуроченными к разным зонам денудации-аккумуляции. Для всех компонентов ОВ эродированного агрочернозема,

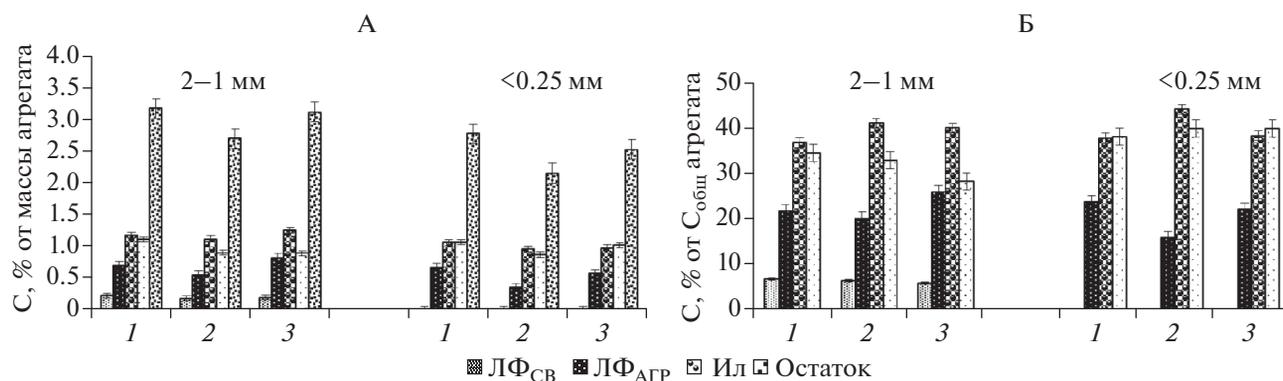


Рис. 4. Содержание углерода (% от массы агрегата) (А) в разных компонентах ОВ водоустойчивых структурных отделностей разного размера и их доли в общем уровне накопления углерода (% от $C_{\text{общ}}$ агрегата) (Б).

зафиксировано значительное уменьшение содержания углерода, что свидетельствует о минерализации ОВ. При этом макроагрегаты демонстрируют большую степень устойчивости к эрозионным процессам по сравнению с микроагрегатами.

В макроагрегатах эродированного агрочернозема отмечено уменьшение (в 1.2 раза) содержания свободного ОВ (ЛФ_{СВ}) по сравнению с полнопрофильным. В намытом агрочерноземе оно частично восстанавливается, однако не достигает уровня полнопрофильного.

Для агрегированного ОВ (ЛФ_{АГР}) в эродированном агрочерноземе величина убыли содержания углерода в микроагрегатах больше таковой в макроагрегатах (в 1.9 против 1.3 раза, соответственно). В намытом агрочерноземе уровень содержания углерода увеличивается относительно смытого и либо превышает (в макроагрегатах), либо не достигает (в микроагрегатах) такового полнопрофильного агрочернозема.

На уровне накопления углерода в илистой фракции почв изученных вариантов эрозионные процессы практически не сказываются: в смытом агрочерноземе его величина лишь в 1.1 раза меньше по сравнению с полнопрофильным на всех исследованных уровнях организации почвенной массы. В намытом агрочерноземе уровень содержания углерода увеличивается относительно смытого и, либо превышает (в макроагрегатах), либо не достигает (в микроагрегатах) такового полнопрофильного агрочернозема.

Для ОВ фракции Ост эродированного агрочернозема отмечено уменьшение (в 1.2 раза) уровня накопления углерода на всех исследованных уровнях организации почвенной массы.

Распределение углерода в компонентах водоустойчивых структурных отделностей разного размера. Анализ долевого участия углерода разных компонентов ОВ (% $C_{\text{общ}}$ агрегата) агрочерноземов, приуроченных к разным зонам денудации-

аккумуляции, показал, что в результате эрозионных процессов в первую очередь сокращается доля дискретного ОВ (рис. 4, Б). Уменьшение доли ЛФ_{АГР} в микроагрегатах значительно больше таковой в макроагрегатах: 1.5 против 1.1 раза соответственно. Следует особо отметить отсутствие свободного ОВ в водоустойчивых микроагрегатах. Долевое участие илистой фракции в макро- и микроагрегатах увеличивается в 1.1 и 1.2 раза соответственно.

Распределение долевого участия фракции Ост в общем уровне накопления углерода в структурных отделностях разного размера носит разнонаправленный характер. В макроагрегатах смытого агрочернозема доля фракции Ост незначительно уменьшается относительно таковой полнопрофильного, а в микроагрегатах — увеличивается.

В намытом агрочерноземе доля ЛФ_{АГР} увеличивается относительно смытого и либо превышает (в макроагрегатах), либо не достигает (в микроагрегатах) таковую полнопрофильного агрочернозема. Это сопровождается уменьшением долевого участия илистой фракции в макро- (незначительно) и микроагрегатах (в 1.2 раза). Доля фракции Ост в макроагрегатах намытого агрочернозема продолжает уменьшаться, а в микроагрегатах практически не меняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показал, что эрозионные процессы активно разрушают все классы воздушно-сухих структурных отделностей, материал которых частично выносится вниз по склону.

Однако эродированные почвы активно используются в сельском хозяйстве, соответственно в почву поступает свежее ОВ растительных остатков культурных растений, что стимулирует процессы агрегирования в почве.

Распределение структурных отдельностей того или иного размера в агрочерноземах, находящихся в разных эрозионно-аккумулятивных зонах, является суммарным результатом процессов разрушения-новообразования агрегатов.

Воздушно-сухие структурные отдельности размером 2–1 мм представляют собой одну из наименее подверженных изменениям фракций в составе воздушно-сухой агрегатной структуры агрочерноземов.

Под влиянием эрозионных процессов активно деградирует и водоустойчивая структура агрочерноземов, о чем свидетельствует значительное уменьшение количества водоустойчивых агрегатов размером 1–0.5 мм (в 1.8 раза относительно полнопрофильного агрочернозема), сопровождающееся увеличением количества структурных отдельностей меньшего размера (<0.5 мм).

Эрозионные процессы активно способствуют минерализации ОВ всех компонентов водоустойчивых структурных отдельностей разного размера, выделенных из воздушно-сухих агрегатов размером 2–1 мм. Это обусловлено разрушением структуры под действием эрозионных процессов и распашки, в результате чего ОВ, ранее локализованное в водоустойчивых структурных отдельностях, становится более доступным для микробиологических атак и, следовательно, минерализуется *in situ*, частично выносится вниз по склону.

В первую очередь минерализуется дискретное ОВ. Уровень накопления углерода дискретного ОВ и его доля в $S_{\text{общ}}$ структурных отдельностей уменьшаются, что сопровождается относительным увеличением доли илистой фракции.

Максимальные наблюдаемые величины отношения С/Н в эродированном агрочерноземе для большинства исследованных компонентов ОВ, по-видимому, свидетельствуют о меньшей степени зрелости ОВ эродированного агрочернозема, то есть эрозионные процессы способствуют обновлению ОВ.

Процессы новообразования ОВ имеют место и в намытом агрочерноземе. За счет поступления достаточно зрелого ОВ материала пахотного горизонта эродированного агрочернозема, ОВ намытого агрочернозема в целом более зрелое по сравнению с эродированным, но менее зрелое, по сравнению с полнопрофильным, что подтверждается большей величиной отношения С/Н. Увеличение количества структурных отдельностей большей части размеров в намытом агрочерноземе, часто превышающее таковое полнопрофильной почвы, по-видимому, свидетельствует о благоприятных условиях для формирования агрегатов, чему способствует и свежее ОВ (растительные остатки культурных растений).

Микроагрегаты представляют собой фрагменты/структурные единицы макроагрегатов. Основ-

ными аргументами в пользу этого являются: 1 – отсутствие свободного ОВ в микроагрегатах, что предполагает лишь минерализацию агрегированного ОВ без возможности его возобновления за счет свободного ОВ, 2 – близкий количественный и качественный состав ОВ, 3 – большая степень выраженности негативных изменений состава и качества ОВ микроагрегатов под воздействием эрозионных процессов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследования проведены с привлечением оборудования Центра коллективного пользования “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемова З.С.* Органические и органо-глинистые комплексы агрогенно-деградированных почв. Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2008. 48 с.
2. *Артемова З.С.* Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
3. *Артемова З.С.* Органо-минеральные профили агрогенно-эрозионно-деградированных типичных черноземов Западной части Центрально-Черноземного района // *Агрохимия*. 2009. № 3. С. 1–8.
4. *Артемова З.С., Травникова Л.С.* Изменение характеристик органического вещества и глинистых минералов серых почв в процессе агропедогенеза // *Почвоведение*. 2006. № 1. С. 96–107.
5. *Васнев И.И.* Почвенные сукцессии как форма средневременной эволюции почв. Автореф. дис. ... докт. биол. н. М., 2003. 48 с.
6. *Ермолаев О.П.* Пояса эрозии в природно-антропогенных ландшафтах речных бассейнов. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1992. 147 с.
7. *Когут Б.М., Артемова З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И.* Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов 2–1 мм типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // *Почвоведение*. 2019. № 2. С. 161–170. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020084>
8. *Сыснев С.А.* Содержание и состав органического вещества агрегатов черноземов Автореф. дис. ... канд. с.-х. н. 2005. 24 с.
9. *Травникова Л.С., Артемова З.С., Сорокина Н.П.* Распределение гранулоденсиметрических фракций в дерново-подзолистых почвах, подверженных плоскостной эрозии // *Почвоведение*. 2010. № 4. С. 495–504.
10. *Федотов Г.Н., Артемова З.С.* Коллоидная составляющая грануло-денсиметрических фракций почв // *Почвоведение*. 2015. № 1. С. 61–70. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15010049>

11. Хан Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.
12. Angers D.A., N'dayegamiye A., Côté D. Tillage-induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1993. V. 57. P. 512–516.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020035x>
13. Baldock J., Kay B., Schnitzer M. Influence of cropping treatment on the monosaccharide content of the hydrolysates of a soil and its aggregate fractions // *Can. J. Soil Sci.* 1987. V. 67. P. 489–499.
<https://doi.org/10.4141/cjss87-046>
14. Berhe A.A., Kleber M. Erosion, deposition, and the persistence of soil organic matter: Mechanistic considerations and problems with terminology // *Earth Surf. Process. Landf.* 2013. V. 38. P. 908–912.
<https://doi.org/10.1002/esp.3408>
15. Cambardella C.A., Elliott E.T. C and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils // *Soil Sci Soc Am J.* 1994. V. 58. P. 123–130.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010017x>
16. Cerdá A. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types // *Catena.* 1998. V. 32. P. 73–86.
[https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00041-1)
17. Chalise D., Kumar L., Spalevic V., Skataric G. Estimation of Sediment Yield and Maximum Outflow Using the IntErO Model in the Sarada River Basin of Nepal // *Water.* 2019. V. 11. P. 952.
<https://doi.org/10.3390/w11050952>
18. 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.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1984.tb00278.x>
19. De Ploey J., Poesen J. Aggregate stability, runoff generation and interrill erosion / Eds.: K.S. Richards, R.R. Arnett, S. Ellis. *Geomorphology and Soils.* George Allen & Unwin, London, 1985.
20. Dlugoß V., Fiener P., Van Oost K., Schneider K. Model based analysis of lateral and vertical soil carbon fluxes induced by soil redistribution processes in a small agricultural catchment // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2012. V. 37(2). P. 193–208.
<https://doi.org/10.1002/esp.2246>
21. Dormaar J.F. Chemical properties of soil and water stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat // *Plant Soil.* 1983. V. 75. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1007/BF02178613>
22. 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.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030017x>
23. Gregorich E.G., Greer K.J., Anderson D.W., Liang B.C. Carbon distribution and losses, erosion and deposition effects // *Soil & Tillage Research.* 1998. V. 47. P. 291–302.
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00117-2)
24. Hancock G.R., Kunkel T., Wells T., Martinez C. Soil organic carbon and soil erosion – Understanding change at the large catchment scale // *Geoderma.* 2019. V. 343. P. 60–71.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.012>
25. Jakab G., Szabó J., Szalai Z., Mészáros E., Madarász B., Centeri C., Szabó B., Németh T., Sipos P. Changes in organic carbon concentration and organic matter compound of erosion-delivered soil aggregates // *Environ. Earth Sci.* 2016. V. 75. P. 144.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-5052-9>
26. Jastrow J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral associated organic matter // *Soil Biology & Biochemistry.* 1996. V. 28. P. 656–676.
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00159-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00159-X)
27. Jocteur-Monrozier L., Ladd J.N., Fitzpatrick R.W., Foster R.C., Raupach M. Components and microbial biomass content of size fractions in soils of contrasting aggregation // *Geoderma.* 1991. V. 50(1–2). P. 37–62.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(91\)90025-O](https://doi.org/10.1016/0016-7061(91)90025-O)
28. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Organic carbon storage in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma.* 2005. V. 128. P. 63–79.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.013>
29. Imeson A.C., Vis M. Assessing soil aggregate stability by ultrasonic dispersion and water-drop impact // *Geoderma.* 1984. V. 34. P. 185–200.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(84\)90038-7](https://doi.org/10.1016/0016-7061(84)90038-7)
30. Kemper W.D., Koch E.J. Aggregate stability of soils from Western United States and Canada // *Colorado Agric. Exp. Stn. Bull.* 1966. V. 1355. P. 1–52.
31. Khaledi Darvishan A., Mohammadi M., Skataric G., Popovic S., Behzadfar M., Rodolfo Ribeiro Sakuno N., Luiz Mincato R., Spalevic V. Assessment of soil erosion, sediment yield and maximum outflow, using IntErO model (Case study: S8-IntA Shirindarreh Watershed, Iran) // *Agriculture and Forestry.* 2019. V. 65(4). P. 203–210.
<https://doi.org/10.17707/AgricultForest.65.4.18>
32. Kuhn N.J. Erodibility of soil and organic matter, independence of organic matter resistance to interrill erosion // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2007. V. 32. P. 794–802.
<https://doi.org/10.1002/esp.1486>
33. Kuhn N.J., Hoffmann T., Schwanghart W., Dotterweich M. Agricultural soil erosion and global carbon cycle, controversy over? // *Earth Surface Processes and Landforms.* 2009. V. 34. P. 1033–1038.
<https://doi.org/10.1002/esp.1796>
34. Lal R. Soil erosion and the global carbon budget // *Environ. Int.* 2003. V. 29. P. 437–450.
[https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
35. Lal R. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂ // *Soil Tillage Research.* 2018. V. 188. P. 35–40.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001>
36. Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology // *Eur. J. Soil Sci.* 1996. V. 47. P. 425–437.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
37. Nikolic G., Spalevic V., Curovic M., Khaledi Darvishan A., Skataric G., Pajic M., Kaviani A., Tanaskovik V. Variability of Soil Erosion Intensity Due to Vegetation Cover Changes: case Study of Orahovacka Rijeka, Montenegro // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 2019. V. 47(1). P. 237–248.
<https://doi.org/10.15835/nbha47111310>

38. *Onweremadu E.U., Akamigbo F.O.R., Igwe C.A.* Pedality and Soil Moisture Retention Characteristics in Relation to Erodibility of Selected Soils // *Nature and Science*. 2007. V. 5(1). P. 1–7.
39. *Ouallali A., Aassoumi H., Moukhchane M., Moumou A., Houssni M., Spalevic V., Keesstra S.* Sediment mobilization study on Cretaceous, Tertiary and Quaternary lithological formations of an external Rif catchment, Morocco // *Hydrological Sciences J.* 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1755435>
40. *Rabbi S.M.F., Wilson B.R., Lockwood P.V., Daniel H., Young I.M.* Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses // *Geoderma*. 2014. V. 216. P. 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.023>
41. *Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Kleber M., Kogel-Knabner I., Lehmann J., Manning D.A.C., Nannipieri P., Rasse D.P., Weiner S., Trumbore S.E.* Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property // *Nature*. 2011. V. 478. P. 49–54. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
42. *Six J., Paustian K.* Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool // *Soil Biology & Biochemistry*. 2014. V. 68. P. A4–A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>
43. *Spaccini R., Piccolo A.* Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils // *J. Geochem Explor.* 2013. V. 129. P. 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.004>
44. *Spalevic V., Curovic M., Borota D., Fustic B.* Soil erosion in the river basin Zeljeznica, area of Bar Montenegro // *Agriculture and Forestry*. 2012. V. 54(1–4). P. 5–24.
45. *Tisdall J.M., Oades J.M.* The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth // *Aust. J. Soil Res.* 1980. V. 18. P. 423–433. <https://doi.org/10.1071/SR9800423>
46. *Western A.W., Grayson R.B.* The tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements // *Water Resour. Res.* 1998. V. 34. P. 2765–2768. <https://doi.org/10.1029/98WR01833>
47. *Wiaux F., Cornelis J.T., Cao W., Vanclooster M., Van Oost K.* Combined effect of geomorphic and pedogenic processes on the distribution of soil organic carbon quality along an eroding hillslope on loess soil // *Geoderma*. 2014. V. 216. P. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.013>
48. *Wilson D.J., Western A., Grayson R.B.* A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture // *Adv. Water Resour.* 2005. V. 28. P. 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.09.007>
49. *Zheng H., Liu W., Zheng J., Luo Y., Li R., Wang H., Qi H.* Effect of long-term tillage on soil aggregates and aggregate-associated carbon in black soil of Northeast China // *PLoS ONE*. 2018. V. 13(6). P. e0199523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199523>

Alteration of the Content and Composition of Organic Matter in Macro- and Microaggregates of Haplic Chernozem under the Influence of Erosion Processes

Z. S. Artemyeva^{1, *}, N. N. Danchenko¹, N. P. Kirillova², N. P. Masyutenko³,
E. V. Dubovik³, A. V. Kuznetsov³, and B. M. Kogut¹

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

³*Federal State Budget Scientific Institution "Kursk FANTS", Kursk, 305021 Russia*

*e-mail: artemyevazs@mail.ru

A quantitative assessment of the content and composition of structural unites of agrochernozems located in different erosive-accumulative zones are presented. The studies were carried out on of Haplic Chernozems (Loamic, Pachic) in a long multifactor field stationary experiment of the Russian Research Institute of Agriculture and Protection of Soil from Erosion (Kursk region) on the watershed plateau and the slope of the Northern exposure. It is shown that under the influence of erosion there is a significant decrease in the carbon content in all air-dry structural unites of studied soils. It was revealed that erosion also lead to significant losses of organic matter in water-stable structural unites isolated by wet sieving from air-dry macroaggregates of 2–1 mm in size. The main features of the character of carbon content recovery in the aggregate structure of agrochernozem of the accumulative zone were noted. A detailed comparative study of the composition of different organic matter pools in water-stable macro- (2–1 mm) and microaggregates (<0.25 mm) isolated by wet sieving from air-dry macroaggregates of 2–1 mm size was conducted. A general tendency to a decrease in quantity of the discrete OM was revealed, which was provoked both by erosive processes and plowing of the Chernozems dated to different zones of denudation-accumulation on a slope, against the background of inclusion in composition of the arable horizon of the eroded soils the material of the underlying layer.

Keywords: erosion, water-stable structure, granulo-densitometric fractionation, free organic matter, occluded organic matter, clay