

УДК 631.417.2:434.445.4

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО

© 2019 г. Е. В. Дубовик<sup>1</sup>, \*, Д. В. Дубовик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт земледелия и защиты почв от эрозии,  
Россия, 305021, Курск, ул. К. Маркса, 70б

\*e-mail: dubovikdm@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.01.2018 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Изучено влияние степени эродированности, экспозиции склона на структурно-агрегатный состав чернозема типичного (Haplic Chernozems) и качественные характеристики органического вещества почвы. Исследовали содержание углерода органических соединений в структурных отдельностях чернозема типичного (Курская область) в различных агроэкологических условиях. Показана ценность агрегатов 3–1 мм, как важного компонента структурного состояния чернозема типичного, которая определялась выходом структурных отдельностей и вкладом углерода органических соединений по сравнению с агрегатами 10–3 и <1 мм. Рассмотрена роль органического вещества и подвижных гумусовых веществ в формировании водоустойчивых почвенных агрегатов чернозема типичного и установлена тенденция повышения диаметра агрегатов с увеличением содержания углерода органических соединений, независимо от степени эродированности почвы. Характерно четкое преобладание углерода подвижных гумусовых веществ в водоустойчивых агрегатах на северном склоне по отношению к южному. Показано, что с увеличением активной части органического углерода, участвующей в создании водоустойчивых агрегатов чернозема типичного, диаметр водоустойчивых агрегатов возрастает от 0.5–0.25 до 3–1 мм, данная закономерность сохраняется в гор.  $A_{\text{пах}}$  и  $A$  на водораздельном плато, северном склоне и в гор.  $A_{\text{пах}}$  на южном склоне независимо от степени эродированности. Полученные результаты могут быть положены в основу методических рекомендаций по регулированию структурно-агрегатного и гумусного состояния чернозема типичного в условиях склонового агроландшафта.

**Ключевые слова:** Haplic Chernozems, почвенные агрегаты, органическое вещество, лабильные гумусовые вещества

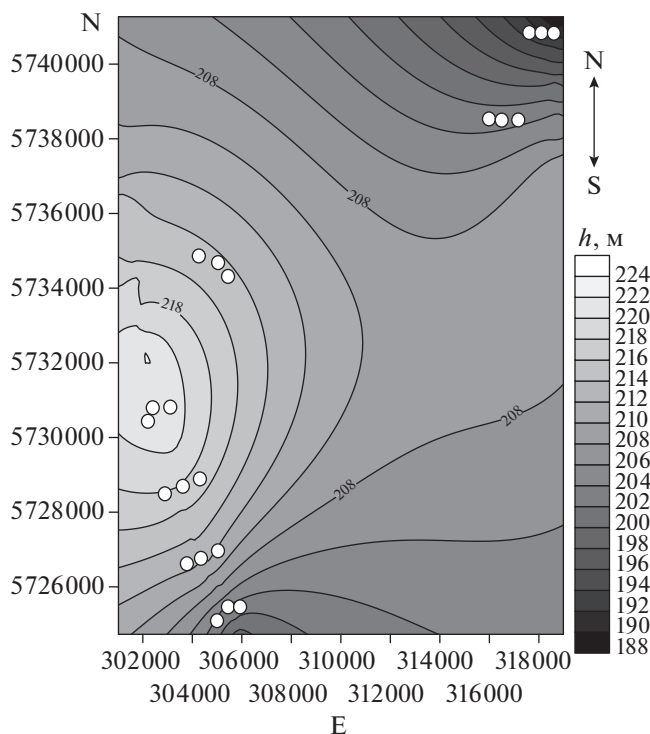
**DOI:** 10.1134/S0032180X19020047

### ВВЕДЕНИЕ

Почвенный агрегат – уникальное природное образование, придающее почве форму структурной иерархической организации, которая лежит в основе всех функций почвы [1, 4, 9, 15]. Основу клеящего вещества при связывании элементарных почвенных частиц и образовании почвенного агрегата выполняют гумусовые вещества, микроорганизмы, гифы грибов, ил, катионы  $Ca^{2+}$  др. [4, 23, 26]. При анализе концептуальной модели иерархии структурных отдельностей установлена взаимосвязь между агрегатным состоянием почвы и качеством и количеством органического вещества почвы [36]. Поскольку макроагрегаты содержат микроагрегаты и органическое вещество, которое их связывает, то и количество углерода органических соединений улучшается в соответствие со степенью увеличения размера агрегатов [29].

В составе агрегатов находится приблизительно около 90% углерода органических соединений верхнего горизонта почвы, причем 60–80% – в виде макроагрегатов [31, 36]. В связи, с чем разрушение почвенных агрегатов является одной из доминирующих причин при потере углерода органических соединений и снижения качества почвы, используемой в земледелии [13, 28].

В то же время в более мелких агрегатах пахотных почв из-за их большей доли аккумулируется почти столько же углерода органических соединений, что и в непашотных почвах [20]. Потери углерода органических соединений из почвы преимущественно обусловлены разрушением макроагрегатов, чем микроагрегатов [33]. Это объясняется тем, что макроагрегаты более насыщены органическим веществом, так как содержат как органическое вещество в микроагрегатах, так и те органиче-



**Рис. 1.** Местоположение точек проведения исследований на опытном поле ВНИИЗиЗПЭ, Курская обл., Медвенский район в системе координат UTM: 37V 5724729 301017–37V 5741269 318990 (51°31' N, 36°07' E).

ские компоненты, которые способствуют связыванию микроагрегатов между собой. Вместе с тем наблюдается меньшая стабильность и большая восприимчивость к любым физическим воздействиям макроагрегатов по сравнению с микроагрегатами.

Склоновые земли претерпевают потерю органического вещества, как вследствие минерализации, так и под влиянием эрозионных процессов [17, 22]. Это в свою очередь может привести к ухудшению структурного состояния, снижению водоустойчивости структурных отдельностей. В результате деградации структурного состояния произойдет разрушение макроагрегатов до микроагрегатов, и в последствие они уже распадутся до элементарных почвенных частиц [2, 34].

Рассмотренные процессы и закономерности структурообразования определяются сложившимися агроэкологическими условиями, такими как экспозиция склона, степень эродированности, местоположение в рельефе и др. Изучая взаимосвязь углерода органических соединений и структурного состояния в различных агроэкологических условиях, сможем понять механизм участия углерода органических соединений в процессе структурообразования чернозема типичного в агроценозах на склонах, что поможет при решении задач прогнозирования изменения, со-

хранения или восстановления агрегатной структуры черноземов.

Еще Докучаев в своей книге “Наши степи прежде и теперь” [6] писал “... факторы, лежащие в основе сельского хозяйства, до такой степени связаны между собой ..., что как при изучении ... так и, особенно, при овладении ими безусловно необходимо иметь в виду, по возможности, всю единую, целую и неразделимую природу, а не отдельные ее части. Иначе мы никогда не сумеем управлять ими”.

Цель работы – выявление взаимосвязи углерода органических соединений и структурного состояния типичных черноземов различной степени эродированности.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории опытного поля Всероссийского НИИ земледелия и защиты почв от эрозии (Курская область, Медвенский район). Объектами исследования были черноземы типичные мощные и среднемощные малогумусные тяжелосуглинистые иловато-крупнопылеватые на лёссовидном суглинке разной степени эродированности [11] или агрочерноземы миграционно-мицелиарные высоко-, средне- и глубококарбонатные среднегумусированные тяжелосуглинистые на лёссовидном суглинке [12], *Naptic Chernozems* (*Loamic, Aric, Pachic*) [37].

Почвенные разрезы (21 шт.) закладывали на северном и южном склонах: при уклоне 1° – 6 разрезов, 3° – 6 разрезов, 5° – 6 разрезов и в центральной части водораздельного плато – 3 разреза. Высоту над уровнем моря и координаты мест закладки почвенных разрезов определяли с помощью GPS-навигатора (рис. 1).

Категорию почв по степени смывистости устанавливали по уменьшению мощности гумусового ( $A_{\text{пах}} + A + AB$ ) горизонта (табл. 1) (по классификации Сурмача [21] для черноземов с эталоном мощности >65 см при сокращении до 30% – слабосмытые; 30–60% – среднесмытые; 60–80% – сильносмытые; 80–100% – весьма сильносмытые) и по уменьшению содержания гумуса и запасов гумуса для черноземов в слое 0–50 см по сравнению с несмытой почвой (по классификации Заславского [8] снижено на 10–20% – слабосмытые; 20–50% – среднесмытые; >50% – сильносмытые). Таким образом, чернозем типичный на склоне северной экспозиции при уклоне 1° и 3° характеризуется как слабосмытый, а при 5° – как среднесмытый, на южном склоне при уклоне 1° – слабосмытый, а при 3° и 5° – как среднесмытый.

Из каждого почвенного разреза в средней части каждого горизонта ( $A_{\text{пах}}$ , A, AB) отобрали по три ненарушенных монолитных образца, средняя масса образца 3.5–4 кг (189 образцов), мощность

**Таблица 1.** Мощность генетических горизонтов чернозема типичного в зависимости от экспозиции и уклона

Экспозиция склона	Уклон, град	Мощность горизонта, см				Содержание гумуса в слое 0–50 см, %	Запас гумуса в слое 0–50 см, т/га	Степень эродированности почвы
		A <sub>пах</sub>	A	AB	A <sub>пах</sub> + A + AB			
Северная экспозиция	5	20	8	12	40 (–53%)*	3.52 (–33%)*	200.6 (–33%)*	Среднесмытая
	3	20	29	24	73 (–14%)	4.55 (–13%)	250.2 (–16%)	Слабосмытая
	1	20	33	21	74 (–13%)	4.64 (–11%)	250.6 (–16%)	Слабосмытая
Водораздельное плато	0	20	35	30	85	5.22	297.5	Несмытая
	1	20	22	28	70 (–18%)	4.60 (–12%)	246.1 (–17%)	Слабосмытая
Южная экспозиция	3	20	16	23	59 (–31%)	4.06 (–22%)	213.1 (–28%)	Среднесмытая
	5	20	15	20	55 (–35%)	3.51 (–33%)	205.3 (–31%)	Среднесмытая

\* Отрицательное значение – уменьшение, % от несмытой почвы.

отобранных монолитов соответствовала мощности анализируемого горизонта. В образцах ненарушенного строения провели сухое и мокрое просеивание по методу Саввинова [3] (сухое просеивание – 189 образцов, для мокрого просеивания составляли среднюю пробу массой 50 г из всех фракций агрегатов, полученных при сухом просеивании в трехкратной повторности, соответственно – 567 образцов). Отдельно из воздушно-сухих агрегатов 3–1 мм выделяли водоустойчивые агрегаты <3 мм по Н.И. Саввинову в модификации Хана [24] в трехкратной повторности – 567 образцов. В работе представлены средние данные. Формирование статистической выборки осуществляли исходя из повторностей определения и количества разрезов.

Содержание углерода органических соединений в нефракционированной почве и в выделенных структурных отдельностях проводили по ГОСТ 26213-91. Определение подвижных гумусовых веществ (ПГВ) и их состав в 0.1 М вытяжке NaOH проводили по методике Почвенного института с предварительным компостированием [19] в водоустойчивых агрегатах <3 мм, полученных из воздушно-сухих агрегатов 3–1 мм чернозема типичного.

Индекс агрегированности [30] рассчитывали по формуле:  $W = \sum PiQi$ , где  $Pi$  – содержание фракций агрегатов  $i$ -того размера, %;  $Qi$  – “весовая величина”, которой наделены фракции водопрочных агрегатов в соответствии с их ролью в формировании агрономически ценной структуры почвы, равная 0 – для фракции >10 мм; 1 – для 10–7 мм; 3 – для 7–5 мм; 8 – для 5–3 мм; 10 – для 3–1 мм; 5 – для 1–0.5 мм; 3 – для 0.5–0.25 мм и 0 – для <0.25 мм.

Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики [5, 7] с использованием программных средств Microsoft Office Excel, Statistica. Оценку корреляционной зависимости проводили по шкале Чеддока [14]: 0.1–0.3 – слабая, 0.3–0.5 – умеренная, 0.5–0.7 –

заметная, 0.7–0.9 – высокая, 0.9–0.99 – весьма высокая.

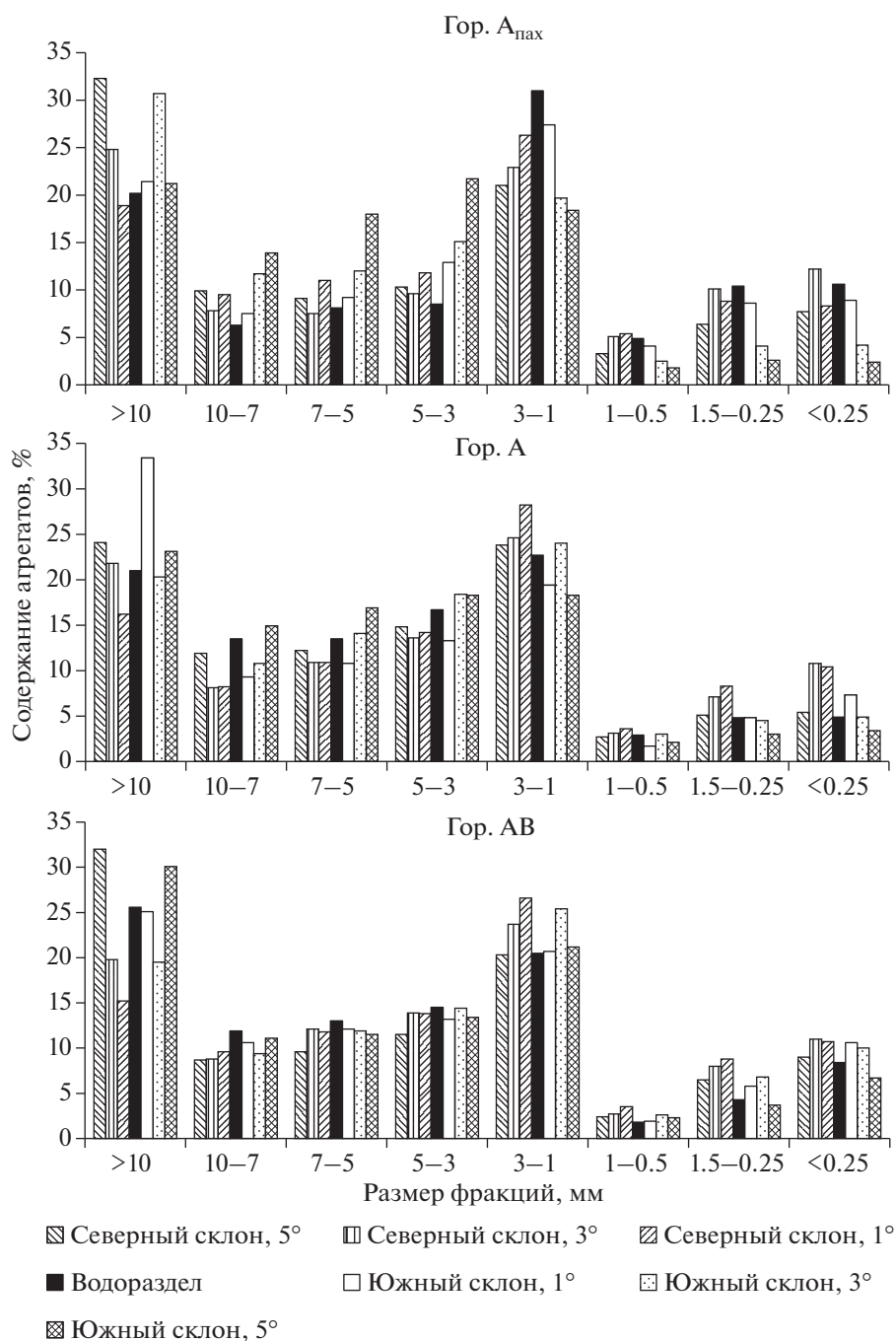
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного сухого просеивания почвенных образцов (рис. 2) выход структурных отдельностей 10–0.25 мм составил в среднем  $68 \pm 1.9\%$ , агрегатов >10 мм  $24 \pm 0.7\%$  и почвенных частиц <0.25 мм  $8 \pm 1.4\%$  от массы почвы. На долю агрономически ценных агрегатов 3–1 мм от массы почвы приходилось  $23 \pm 0.6\%$ , что наряду с почвенными комками >10 мм составляло около 50%, в то же время выход агрегатов 1–0.5 мм от массы почвы был минимальный ( $3 \pm 0.7\%$ ).

В пахотном горизонте несмытого и слабосмытого чернозема типичного содержание агрегатов 3–1 мм было наибольшим, а в гор. А и АВ в зависимости от экспозиции склона подчеркивается преобладающее количество агрегатов >10 и 3–1 мм. В среднесмытой почве независимо от генетического горизонта и экспозиции склона установлено максимальное содержание агрегатов >10 мм. Вместе с тем наблюдается достоверное различие количества структурных отдельностей в гор. А<sub>пах</sub>, А и АВ ( $P = 0.95$ ), и отсутствие значимых различий содержания структурных отдельностей на полярных склонах различной степени эродированности.

При оценке почвенной структуры чернозема типичного установлено, что чернозем типичный несмытый обладает отличным [10, 25] структурным состоянием (коэффициент структурности 2.2–2.9) и отличной водоустойчивостью (по И.В. Кузнецовой (1979) для тяжелосуглинистых почв) сумма водоустойчивых агрегатов составляет 68–70% (табл. 2).

На склоне северной экспозиции с увеличением степени эродированности происходит ухудшение структурного состояния (коэффициент структурности снижается с 2.7 до 1.5), причем водоустойчивость существенно не изменяется. В



**Рис. 2.** Структурно-агрегатный состав (сухое просеивание) чернозема типичного в различных агроэкологических условиях.

связи с повышенным содержанием карбонатов кальция в почве на южном склоне, как вниз по почвенному профилю, так и по склону, прослеживается улучшение структурного состояния (коэффициент структурности увеличивается с 2.3 до 3.2) и водоустойчивости (сумма водоустойчивых агрегатов повышается с 60 до 78%).

С увеличением степени эродированности чернозема типичного на южном склоне в гор. А<sub>пах</sub>

установлен рост индекса агрегированности, что свидетельствует о повышении в составе водоустойчивых агрегатов количества структурных отделностей 3–1 и 5–3 мм. Агрегаты данного размера играют важную роль в формировании агрономически ценной структуры, поэтому наделены наибольшей весовой величиной (соответственно 10 и 8). Средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов в почве на южном склоне с увеличением степени эродированности возрастает.

**Таблица 2.** Основные параметры оценки почвенной структуры чернозема типичного при различных агроэкологических условиях

Горизонт	Показатель	Северная экспозиция			Водораздельное плато	Южная экспозиция		
		5°, средне-смытый	3°, слабо-смытый	1°, слабо-смытый	0°, несмытый	1°, слабо-смытый	3°, средне-смытый	5°, средне-смытый
A <sub>пах</sub>	Σв. а.	65.5	64.8	65.1	67.7	60.0	67.8	77.6
	W	309	314	299	304	254	406	481
	СВД	1.77	1.55	0.63	0.66	0.62	1.82	2.54
	K <sub>стр</sub>	1.5	1.7	2.7	2.2	2.3	1.9	3.2
A	Σв. а.	65.4	58.9	66.3	69.8	72.6	65.4	58.7
	W	326	317	381	325	472	387	327
	СВД	0.93	0.62	0.68	0.65	1.42	1.74	1.26
	K <sub>стр</sub>	2.4	2.1	2.7	2.9	1.5	3.0	2.8
AB	Σв. а.	50.9	63.1	59.5	66.5	70.9	62.9	50.1
	W	234	373	296	386	446	407	222
	СВД	0.49	0.73	0.54	0.85	1.51	1.21	0.48
	K <sub>стр</sub>	1.4	2.2	2.9	1.9	1.8	2.4	1.7

Примечание: Σв. а. – сумма водоустойчивых агрегатов, % (Σв. а. = 100 – Σагрегатов после мокрого просеивания <0.25 мм); W – индекс агрегированности ( $W = \sum PiQi$ , где  $Pi$  – содержание фракций агрегатов  $i$ -того размера, %;  $Qi$  – “весовая величина”, которой наделены фракции водопрочных агрегатов в соответствии с их ролью в формировании агрономически ценной структуры почвы, равная 0 – для фракции >10 мм; 1 – для 10–7 мм; 3 – для 7–5 мм; 8 – для 5–3 мм; 10 – для 3–1 мм; 5 – для 1–0.5 мм; 3 – для 0.5–0.25 мм и 0 – для <0.25 мм); K<sub>стр</sub> – коэффициент структурности; СВД – средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов, мм ( $СВД = \sum_{i=1}^n XiMi$ , где  $Mi$  – весовой % фракции агрегатов со средним диаметром  $Xi$ ,  $n$  – количество фракций).

тает в 2.9–4.1 раза. Это, вероятно, обусловлено более интенсивным смывом неводоустойчивых агрегатов и накоплением водоустойчивых, на что обращают внимание и другие исследователи [18], а также подтверждается увеличением количества водоустойчивых агрегатов 5–3 и 3–1 мм в почве и значений индекса агрегированности. В пахотном горизонте чернозема типичного на северном склоне с ростом степени эродированности почвы изменение индекса агрегированности было несущественным. Наряду с этим средневзвешенный диаметр водоустойчивых агрегатов увеличивается в 2.5–2.8 раза.

Содержание  $C_{орг}$  в изучаемых воздушно-сухих агрегатах чернозема типичного в горизонтах A<sub>пах</sub>, A и AB, как и в нефракционированной почве закономерно уменьшается в ряду: несмытая → слабосмытая → среднесмытая (табл. 3).

Максимальное содержание  $C_{орг}$  выявлено в несмытой почве в пахотном горизонте в структурных отдельностях 3–1 мм (3.31%), в гор. A в агрегатах 7–5, 3–1 и 0.5–0.25 мм (3.04%). В гор. AB преобладающее количество  $C_{орг}$  установлено в аг-

регатах 5–3 и 0.5–0.25 мм (2.17%) среднесмытой почве на южном склоне.

С помощью коэффициента корреляции была установлена прямая умеренная и заметная связь ( $r = 0.33–0.62$ ) углерода органических соединений с суммой водоустойчивых агрегатов, индексом агрегированности, средневзвешенным диаметром воздушно-сухих и водоустойчивых агрегатов в пахотном горизонте.

По выходу структурных отдельностей от массы почвы и содержанию углерода органических соединений в воздушно-сухих агрегатах рассчитана доля вклада углерода органических соединений каждой фракции в общий углерод органических соединений почвы (рис. 3).

В среднем доля вклада углерода органических соединений агрегатов разного размера в общий углерод органических соединений чернозема типичного тяжелосушлистого варьировала в гумусовом горизонте от 2 до 34% от массы выхода структурных отдельностей в зависимости от их размера, количества, экспозиции склона и степени эродированности почвы. Наибольший вклад в

**Таблица 3.** Содержание углерода органических соединений в воздушно-сухих агрегатах чернозема типичного при различных агроэкологических условиях, % от массы фракции

Горизонт	Размер агрегатов, мм	Северная экспозиция			Водораздельное плато	Южная экспозиция		
		5°, средне-смытый	3°, слабо-смытый	1°, слабо-смытый	0°, несмытый	1°, слабо-смытый	3°, средне-смытый	5°, средне-смытый
A <sub>пах</sub>	>10	2.58	3.02	2.92	3.04	3.00	2.81	2.45
	10–7	2.66	2.95	2.92	3.01	2.98	2.82	2.46
	7–5	2.60	2.97	2.91	3.02	2.97	2.81	2.45
	5–3	2.64	3.01	2.92	3.00	2.95	2.80	2.45
	3–1	2.82	2.97	3.03	3.31	3.03	3.04	2.75
	1–0.5	2.85	3.06	2.85	3.09	2.92	2.81	2.65
	0.5–0.25	2.92	3.13	2.92	3.20	3.02	2.85	2.78
	<0.25	2.60	2.45	2.69	2.69	2.63	2.74	2.45
А	>10	2.57	2.35	2.45	2.94	2.52	2.66	2.14
	10–7	2.26	2.53	2.42	3.03	2.44	2.57	2.26
	7–5	2.37	2.62	2.54	3.04	2.55	2.71	2.23
	5–3	2.38	2.62	2.52	2.95	2.52	2.66	2.27
	3–1	2.48	2.57	2.64	3.04	2.45	2.81	2.35
	1–0.5	2.49	2.60	2.58	2.95	2.48	2.57	2.20
	0.5–0.25	2.42	2.58	2.52	3.04	2.57	2.54	2.29
	<0.25	2.15	2.26	2.42	2.78	2.20	2.42	1.90
АВ	>10	1.42	1.65	1.97	2.07	1.38	1.99	1.30
	10–7	1.78	2.02	1.81	1.75	1.57	2.16	1.22
	7–5	1.86	2.09	1.93	1.90	1.72	2.16	1.29
	5–3	1.78	2.12	1.86	1.92	1.73	2.17	1.28
	3–1	1.86	1.99	1.98	1.91	1.78	1.70	1.30
	1–0.5	1.76	2.07	1.83	1.86	1.73	2.12	1.22
	0.5–0.25	1.72	2.12	1.86	1.95	1.83	2.17	1.21
	<0.25	1.59	1.93	1.80	1.68	1.62	1.57	1.14

Примечание. НСР<sub>05</sub> гор. А<sub>пах</sub>: для фактора экспозиция – 0.05; для фактора степень эродированности – 0.06; для фактора размер агрегатов – 0.11. НСР<sub>05</sub> гор. А: для фактора экспозиция – 0.07; для фактора степень эродированности – 0.07; для фактора размер агрегатов – 0.12. НСР<sub>05</sub> гор. АВ: для фактора экспозиция – 0.09; для фактора степень эродированности – 0.11; для фактора размер агрегатов – 0.12.

общий углерод органических соединений почвы вносит углерод органических соединений агрегатов размером >10 и 3–1 мм.

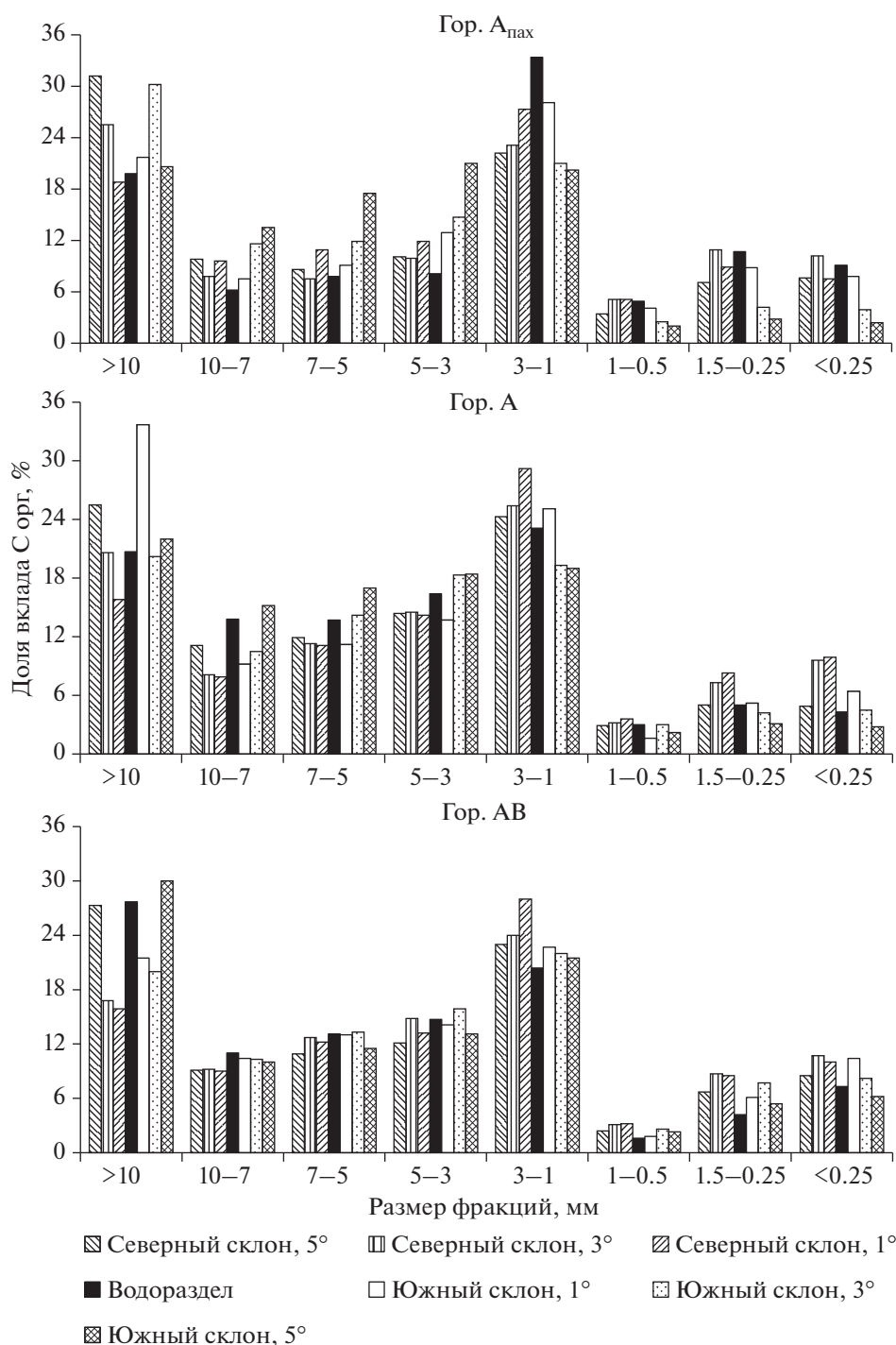
В гумусовом горизонте выход структурных отдельностей 3–1 мм и вклад углерода органических соединений агрегатов данного размера в среднем в 1.2–3.6 раза выше по сравнению с агрегатами 10–3 и <1 мм, что свидетельствует о ценности агрегатов 3–1 мм как важного компонента структурного состояния чернозема типичного.

Наименьшая доля вклада углерода органических соединений структурных отдельностей в общий углерод органических соединений чернозема типичного выявлена для структурных отдельностей размером 1–0.5 мм. Данная закономерность

прослеживается во всех горизонтах независимо от экспозиции, градуса уклона и степени эродированности.

При увеличении степени эродированности в пахотном слое почвы на склонах северной и южной экспозиций доля вклада углерода органических соединений агрегатов 3–1 мм в С<sub>орг</sub> почвы снижается в слабосмытой почве в 1.2–1.4 раза, в среднесмытой – в 1.5–1.7 раза по сравнению с несмытой.

По отношению к доле вклада углерода органических соединений агрегатов >10 мм хочется отметить, ее рост при увеличении степени эродированности за счет повышения выхода агрегатов



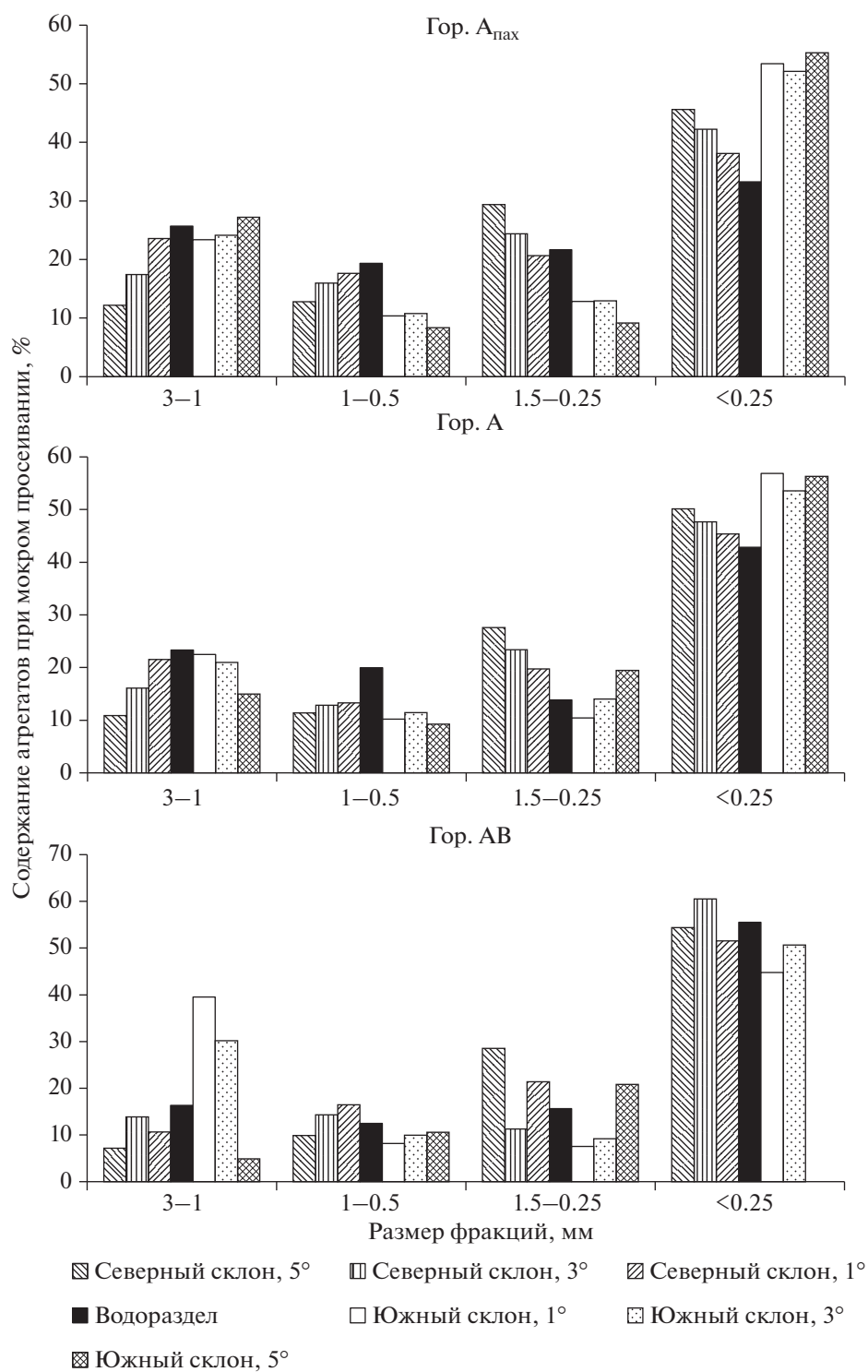
**Рис. 3.** Доля вклада углерода органических соединений структурных отдельных (сухое просеивание) в общий углерод органических соединений чернозема типичного.

данного размера после проведения сухого просеивания, что характерно для эродированных почв.

Рассматривая фракцию >10 мм хочется отметить следующее; во первых данная фракция не является агрономически ценной, во-вторых агрегаты размером >10 мм как правило не обладают

водоустойчивостью состоят как правило из агрегатов меньшего размера. Поэтому для проведения оценки водоустойчивости нами были выбраны именно агрегаты размером 3–1 мм.

После проведения мокрого просеивания воздушно-сухих агрегатов 3–1 мм установлено, что



**Рис. 4.** Результаты мокрого просеивания воздушно-сухих агрегатов размером 3–1 мм чернозема типичного в различных агроэкологических условиях.

почвенные частицы <0.25 мм составляли 40.8–63.7% в гор. А<sub>пах</sub>, А и АВ независимо от агроэкологических условий (рис. 4).

С увеличением степени эродированности на северном склоне в гор. А<sub>пах</sub>, А выявлено уменьше-

ние содержания агрегатов 3–0.5 мм в 1.1–2.1 раза и повышение количества агрегатов <0.5 мм в 1.1–2.0 раза по сравнению с неэродированной почвой. На южном склоне в гор. А<sub>пах</sub> по сравнению с неэродированной почвой в слабосмытой почве



**Таблица 4.** Содержание  $C_{орг}$  в водоустойчивых агрегатах, полученных из воздушно-сухих агрегатов размером 3–1 мм, в черноземе типичном при различных агроэкологических условиях, % от массы структурных отдельностей

Горизонт	Размер водоустойчивых агрегатов, мм	Северная экспозиция			Водораздельное плато	Южная экспозиция		
		5°, средне-смытый	3°, слабо-смытый	1°, слабо-смытый	0°, несмытый	1°, слабо-смытый	3°, средне-смытый	5°, средне-смытый
$A_{пах}$	3–1	2.81	3.02	3.18	3.23	3.29	3.03	2.61
	1–0.5	2.57	2.97	3.03	3.06	3.09	2.86	2.54
	0.5–0.25	2.43	2.95	2.88	2.85	2.98	2.85	2.45
	<0.25	2.23	2.54	2.69	2.64	2.71	2.57	2.14
А	3–1	2.75	2.85	2.72	3.23	2.42	2.69	2.58
	1–0.5	2.38	2.57	2.54	2.95	2.52	2.64	2.48
	0.5–0.25	2.18	2.40	2.45	2.85	2.55	2.77	2.20
	<0.25	1.91	2.24	2.18	2.62	2.35	2.52	1.98
АВ	3–1	2.71	2.37	2.37	2.17	1.86	2.38	1.95
	1–0.5	2.07	1.93	1.95	1.93	1.75	2.27	1.40
	0.5–0.25	1.66	1.70	1.61	1.75	1.65	2.21	1.07
	<0.25	1.38	1.65	1.52	1.52	1.56	2.12	0.99

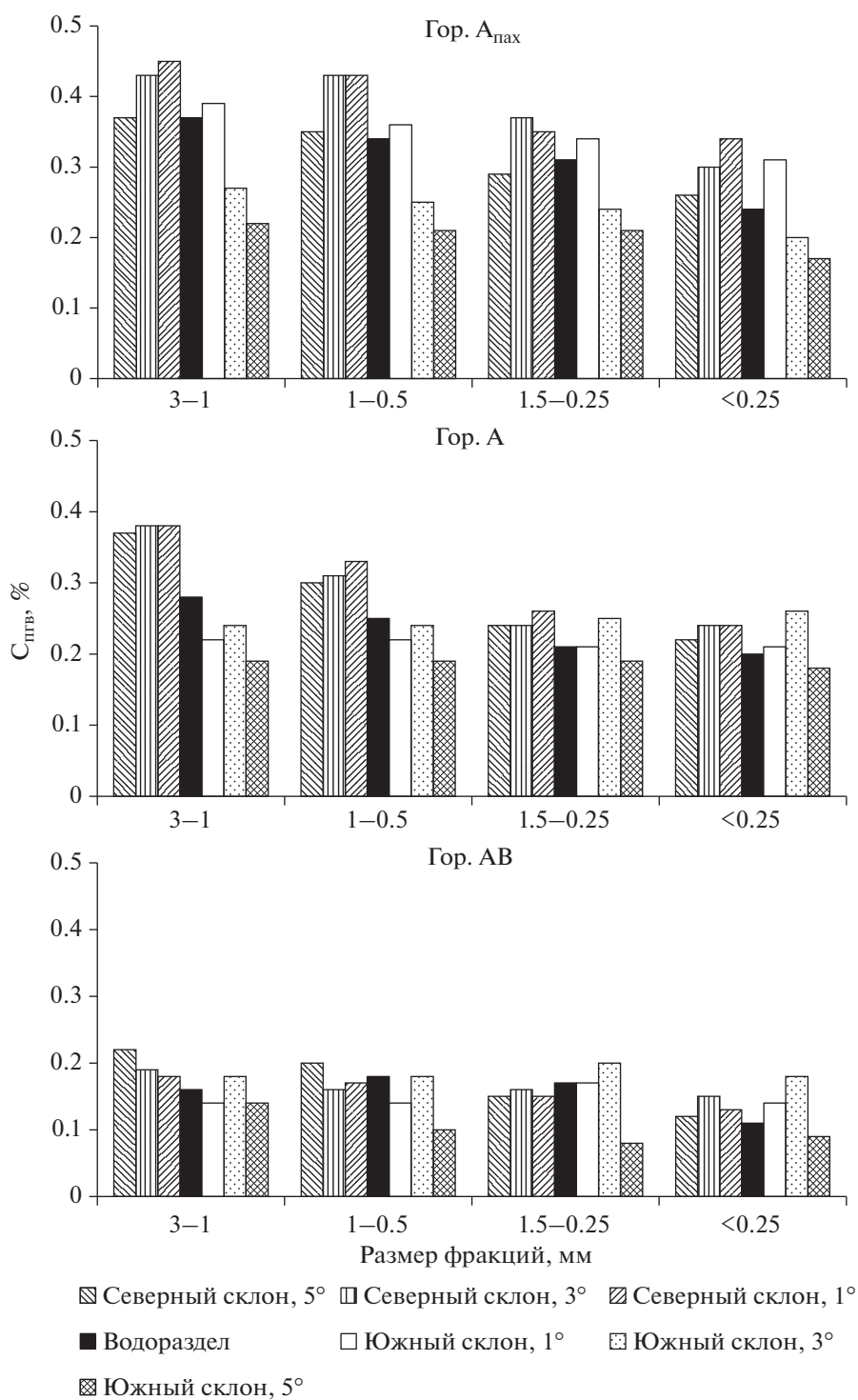
Примечание. НСР<sub>05</sub> гор.  $A_{пах}$ : для фактора экспозиция – 0.05; для фактора степень эродированности – 0.07; для фактора размер агрегатов – 0.08. НСР<sub>05</sub> гор. А: для фактора экспозиция – 0.05; для фактора степень эродированности – 0.08; для фактора размер агрегатов – 0.09. НСР<sub>05</sub> гор. АВ: для фактора экспозиция – 0.06; для фактора степень эродированности – 0.07; для фактора размер агрегатов – 0.09.

при уклоне 1° подчеркивается снижение содержания водоустойчивых агрегатов 3–1 мм на 9%. В среднесмытой почве южного склона по сравнению со слабосмытой установлено увеличение содержания водоустойчивых агрегатов 3–1 мм на 16%. В гор.  $A_{пах}$ , А с увеличением степени эродированности почвы содержание фракции <0.25 мм возросло в 1.2–1.7 раза, а количество агрегатов 1–0.5 мм в гор.  $A_{пах}$  и агрегатов 3–0.5 мм в гор. А – уменьшилось в 1.3–2.4 раза.

В выделенных водоустойчивых агрегатах чернозема типичного определяли количество  $C_{орг}$  (табл. 4). Изучение агрегатов <3 мм показало, что общей закономерностью для них является обеднение фракции <0.25 мм углеродом органических соединений ( $C_{орг}$ ) в гор.  $A_{пах}$ , А и АВ после мокрого просеивания, независимо от экспозиции склона и степени эродированности. В водоустойчивых агрегатах чернозема типичного с уменьшением их диаметра прослеживается тенденция к снижению содержания  $C_{орг}$ , коэффициент корреляции между размером агрегатов и содержанием  $C_{орг}$  составил 0.66–0.95. Аналогичная закономерность встречается в работах ряда исследователей [13, 16, 24, 34, 36], которая характерна для почв, где связующим агентом при формировании водоустойчивых агрегатов служит органическое вещество.

В гор.  $A_{пах}$  чернозема типичного среднесмытого при уклоне 5° на полярных склонах в водоустойчивых агрегатах 3–0.25 мм выявлено уменьшение содержания  $C_{орг}$  по сравнению с неэродированным на 13–19%. В гор. А чернозема типичного в водоустойчивых агрегатах <3 мм наблюдается снижение количества  $C_{орг}$  по сравнению с несмытой почвой в слабосмытой – на 10–25% и в среднесмытой – на 8–32%. В гор. АВ выявлено увеличение содержания  $C_{орг}$  на северном склоне в водоустойчивых агрегатах 3–1 мм слабосмытой почве на 9% и в среднесмытой на 25% по сравнению с неэродированным черноземом. Определена достоверность различий содержания  $C_{орг}$  в водоустойчивых агрегатах в гумусовом горизонте при уровне вероятности  $P = 0.95$  для всех изучаемых факторов.

В последнее время большое значение уделяется участию свежепоступающего органического вещества в процессе формирования водоустойчивых агрегатов [29, 32, 35]. Как известно, подвижные гумусовые вещества (ПГВ) – наиболее трансформируемая часть гумуса, обогащенная азотом, являющаяся источником энергии и питательных элементов для растений, микроорганизмов [19]. Поэтому было определено содержание углерода подвижных гумусовых веществ ( $C_{ПГВ}$ ) в водоустойчивых агрегатах 3–0.25 мм и неводоустой-



**Рис. 5.** Содержание  $C_{ПГВ}$  (% от массы структурных отдельностей) во фракциях мокрого просеивания воздушно-сухих агрегатов 3–1 мм чернозема типичного в различных агроэкологических условиях.

чивых фракциях <0.25 мм для выявления в них особенностей качественного состава органического вещества (рис. 5).

В почве северного склона доля ПГВ в составе органического вещества больше по сравнению с

южным, что обусловлено повышенной численностью микроорганизмов на южном склоне, способных разлагать подвижную часть гумуса. По имеющимся данным [24] численность таких микроорганизмов по отношению к водоразделу на

**Таблица 5.** Приблизительное количество активной части  $C_{орг}$ , участвующей в создании водоустойчивых агрегатов 3–0.25 мм чернозема типичного, %

Горизонт	Размер агрегатов, мм	Северная экспозиция			Водораздельное плато 0°, несмытый	Южная экспозиция		
		5°, средне-смытый	3°, слабо-смытый	1°, слабо-смытый		1°, слабо-смытый	3°, средне-смытый	5°, средне-смытый
$A_{пах}$	3–1	0.58	0.48	0.49	0.59	0.58	0.46	0.47
	1–0.5	0.34	0.43	0.34	0.42	0.38	0.29	0.40
	0.5–0.25	0.20	0.41	0.19	0.21	0.27	0.28	0.31
А	3–1	0.84	0.61	0.54	0.61	0.07	0.17	0.60
	1–0.5	0.47	0.33	0.36	0.33	0.17	0.12	0.50
	0.5–0.25	0.27	0.16	0.27	0.23	0.20	0.25	0.22
АВ	3–1	1.33	0.72	0.85	0.65	0.30	0.26	0.96
	1–0.5	0.72	0.28	0.43	0.41	0.19	0.15	0.41
	0.5–0.25	0.28	0.05	0.09	0.23	0.09	0.09	0.08

южном склоне составляет 132–145%, а на северном – 65–80%. Для гор.  $A_{пах}$  с повышением степени эродированности от слабо- до среднесмытой почвы характерно снижение доли ПГВ на северном – в 1.2–1.4 раза, а на южном склоне – в 1.2–1.8 раза. На северном склоне в гор. А чернозема типичного среднесмытой доля ПГВ в составе органического вещества была на 10–15% больше, чем в слабосмытой почве, а на южном – наоборот: в 1.2–1.8 раза меньше в среднесмытом черноземе типичном, чем в слабосмытом.

Рассматривая долю вклада углерода органических соединений структурных отдельностей в углерод органических соединений почвы в различных агроэкологических условиях, можно прийти к заключению, что не все органическое вещество почвы участвует в образовании водоустойчивых агрегатов, а только его активная часть. Используя метод Хана [24], по разнице между содержанием  $C_{орг}$  в макро- и микроагрегатах определяли приблизительное количество углерода органических соединений (активная часть), участвующего в создании водоустойчивой макроструктуры (табл. 5).

Выявлено, что с увеличением количества активной части  $C_{орг}$ , участвующей в образовании водоустойчивых агрегатов возрастает диаметр водоустойчивых агрегатов с 0.5–0.25 до 3–1 мм в гор.  $A_{пах}$ , А и АВ на водораздельном плато, склоне северной экспозиции независимо от степени эродированности, в среднесмытой почве южного склона (5°), а также в гор.  $A_{пах}$  и АВ в слабо- и среднесмытой почве южного склона (1° и 3°). В черноземе типичном слабо- и среднесмытом на южном склоне при уклоне 1° и 3° в гор. А установлен сбой выявленной закономерности.

Это, вероятно, связано с присутствием карбонатов кальция, которые оседают на тонких фракциях почвы и скрепление элементарных почвенных частиц идет по карбонатному типу твердения, способствуя образованию или укреплению микроагрегатов на различных уровнях почвенной структуры. В слабо- и среднесмытой почве южного склона содержание, как карбонатов кальция, так и фракций ила и мелкой пыли в гор. А было больше чем, в других объектах исследования. Наибольшее количество карбонатов содержится, как правило, в тонких фракциях ила и мелкой пыли, что подчеркивает Воронин [4]. Вероятно, в образовании почвенных агрегатов 3–1, 1–0.5 мм на южном склоне большую роль играет карбонат кальция.

## ВЫВОДЫ

1. Выход структурных отдельностей 10–0.25 мм в среднем составил  $68 \pm 1.9\%$ , на долю агрономически ценных агрегатов 3–1 мм приходилось  $23 \pm 0.6\%$  от массы почвы. Наилучшим структурным состоянием обладал чернозем типичный незэродированный и слабоэродированный по сравнению со среднеэродированным.

2. В гумусовом горизонте выход структурных отдельностей 3–1 мм и вклад углерода органических соединений агрегатов данного размера в среднем в 1.2–3.6 раза выше по сравнению с агрегатами 10–3 и <1 мм, что свидетельствует о ценности агрегатов 3–1 мм как важного компонента структурного состояния чернозема типичного. Наименьшая доля вклада углерода органических соединений структурных отдельностей в общий углерод органических соединений чернозема ти-

пичного выявлена для структурных отдельностей размером 1–0.5 мм.

3. Независимо от степени эродированности чернозема типичного отмечена тенденция к росту диаметра водоустойчивых агрегатов при повышении в них углерода органических соединений ( $r = 0.66–0.95$ ).

4. В черноземе типичном независимо от изучаемых агроэкологических условий выявлена тенденция увеличения количества ПГВ с повышением размера водоустойчивых структурных отдельностей, что говорит о существенном вкладе ПГВ в формировании водоустойчивой структуры чернозема. В то же время выявлено четкое преобладание  $S_{ПГВ}$  в водоустойчивых агрегатах на северном склоне по сравнению с южным.

5. Установлено, что с увеличением активной части  $S_{орг}$ , участвующей в создании водоустойчивых агрегатов, диаметр водоустойчивых агрегатов возрастает от 0.5–0.25 до 3–1 мм. Эта закономерность сохраняется в черноземе типичном в гор.  $A_{пах}$  и  $A$  на водораздельном плато, северном склоне и в гор.  $A_{пах}$  на южном склоне независимо от степени эродированности. На северном склоне в формировании водоустойчивых агрегатов 3–0.25 мм участвует большее количество активной части  $S_{орг}$ , чем на южном. При повышении степени эродированности в черноземе типичном установлен рост участия активной части  $S_{орг}$  в образовании водоустойчивых агрегатов 3–1 мм на северном склоне в 1.2–1.5 раза в гор.  $A_{пах}$  и  $A$ , а на южном склоне данная закономерность определено только в гор.  $A$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов-Каратаев И.Н., Рабинерсон А.П.* Почвенные коллоиды и методы их изучения // Тр. ЛОВИУА, 1930. Вып. 10. 283 с.
2. *Бушуева О.Г., Горбеев А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф.* Разрушение межагрегатных связей между частицами почвы в процессе водной эрозии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 78. С. 20–30.
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Воронин А.Д.* Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
5. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. 292 с.
6. *Докучаев В.В.* Наши степи прежде и теперь (1892). Собр. соч. М.: Наука, 1952.
7. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов). М.: Колос, 1979. 416 с.
8. *Заславский М.Н., Каиштанов А.Н.* Почвозащитное земледелие. М.: Россельхозиздат, 1979. 206 с.
9. *Качинский Н.А.* Физика почв. М., 1965. Ч. 1. 323 с.
10. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
11. *Классификация и диагностика почв СССР.* М.: Колос, 1977. 223 с.
12. *Классификация и диагностика почв России.* Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
13. *Козут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества чернозема типичного при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
14. *Кремлев А.Г.* Математика. Раздел “Статистика”. Екатеринбург: Изд-во УрГЮА, 2001. 140 с.
15. *Кузнецова И.В., Уткаева В.Ф., Бондарев А.Г.* Нормативы изменения физических свойств пахотных черноземов лесостепной зоны Европейской России в условиях интенсивного сельскохозяйственного использования // Почвоведение. 2014. № 1. С. 71–81.
16. *Масютенко Н.П., Козут Б.М., Киселева О.В., Дубовик Е.В., Глазунов Г.П., Панкова Т.И.* Структура чернозема типичного и содержание органического углерода и лабильных гумусовых веществ в почвенных агрегатах. Курск: ВНИИЗиЗПЭ, 2008. 36 с.
17. *Наконечная М.А., Явтушенко В.Е.* Потери гумуса на склоновых землях ЦЧО // Почвоведение. 1989. № 5. С. 19–26.
18. *Нетесонова И.А.* Гумусовое и структурное состояние эродированных почв зонального ряда. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2010. 21 с.
19. *Рекомендации для исследования баланса и трансформации органического вещества при сельскохозяйственном использовании и интенсивном окультуривании почв.* М., 1984. 96 с.
20. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
21. *Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозионные мероприятия. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 1992. 175 с.
22. *Сухановский Ю.П., Прущик А.В., Соловьева Ю.А., Санжарова С.И.* Проблема обоснования допустимых эрозионных потерь почвы и подход к ее решению // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 78. С. 3–19.
23. *Хайдапова Д.Д., Честнова В.В., Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Реологические свойства черноземов типичных (Курская область) при различном землепользовании // Почвоведение. 2016. № 8. С. 955–963. doi 10.7868/S0032180X16080049
24. *Хан Д.В.* Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 141 с.
25. *Шеин Е.В., Карначевский Л.О.* Толковый словарь по физике почв М.: ГЕОС, 2003. 126 с.
26. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
27. *Юринская В.Ф.* Особенности микробиологической деятельности в типичных черноземах в зависимости от их смывости, элемента и экспозиции склона // Науч. тех. Бюл. ВНИИ земледелия и защиты

- почв от эрозии “Почвозащитное земледелие”. 1983. № 1(36). С. 54–60.
28. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: a review // *Geoderma*. 2005. V. 124. P. 3–22.
  29. *Dobrzanski B., Whkowska, Walczak R.* Soil aggregation and water stability index // *Polish J. Soil Sci.* 1975. № 1. V.VIII. P. 3–8.
  30. *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.
  31. *Jastrow J.D., Miller R.M., Boutton T.W.* Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1996. V. 60. P. 801–807.
  32. *Jastrow J.D.* Soil aggregate formation and the accrual of particulate, mineral associated organic matter // *Soil Biol. Biochem.* 1996. V. 28. P. 657–676.
  33. *John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use // *Geoderma*. 2005. V. 128. P. 63–79.
  34. *Oades J.M., Water A.G.* Aggregate hierarchy in soils // *Aust. J. Soil Res.* 1991. V. 29. P. 815–828.
  35. *Puget P., Chenu C., Balesdent J.* Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils // *Eur. J. Soil Sci.* 1995. V. 46. P. 449–459.
  36. *Six J. Paustian K., Elliott E.T., Combrink C.* Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate – size classes and aggregate – associated carbon // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000. V. 64. P. 681–689.
  37. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. Rome: FAO, 2015. № 106. 192 p.

## Relationships between the Organic Carbon Content and the Structural State of Typical Chernozem

E. V. Dubovik<sup>a, \*</sup> and D. V. Dubovik<sup>a</sup>

<sup>a</sup>All-Russia Research Institute of Arable Farming and Soil Erosion Control, ul. K. Marksa 70 b, Kursk, 305021 Russia

\*e-mail: dubovikdm@yandex.ru

The influence of the degree of erosion and slope aspect on the structural composition of typical chernozems (Haplic Chernozems) and the qualitative characteristics of organic matter in these soils were studied. We determined the organic carbon content in separate structural units of the soils under different agroecological conditions of Kursk oblast. Aggregates of 3–1 mm size played the decisive role in the structural state of typical chernozems; their total content and the content of carbon of organic compounds in them were higher than those for the aggregates of 10–3 and <1 mm in size. The contribution of organic matter and labile humic substances to the formation of water-stable soil aggregates was also considered. A tendency for an increase in the diameter of aggregates with an increase in their organic carbon content was displayed in the soils independently from the degree of their erosion. The content of carbon of labile humic substances in water-stable aggregates of the soils on north-facing slopes was higher than that in the soils on south-facing slopes. With organic carbon content in water-stable aggregates increased with an increase in their diameter from 0.5–0.25 to 3–1 mm. this regularity was clearly displayed in the Ap and A horizons of typical chernozems on the interfluvium and on the north-facing slope and in the Ap horizon of these soils on the south-facing slopes independently from the degree of soil erosion. The results of this study may be used in methodological recommendations on regulation of the aggregate and humus states of typical chernozems in agrolandscapes with sloping topography.

**Keywords:** typical chernozem (Haplic Chernozems), soil aggregates, organic matter, carbon of organic compounds, labile humus substances