



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11729

Сорбция лабильных гумусовых веществ структурно-агрегатными фракциями эродированных черноземов

Аркадий Игоревич Громовик[✉],

Надежда Сергеевна Горбунова, Татьяна Анатольевна Девятова

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, agrom.ps@mail.ru[✉]

Аннотация. Эрозионные процессы являются главной причиной деградации черноземов, которая происходит в основном в результате потери почвами органического вещества и ухудшения структурно-агрегатного состояния. Основная часть органического углерода ($C_{орг.}$) сосредоточена в макроагрегатах, поэтому деструкция макроагрегатных фракций является главной причиной потерь $C_{орг.}$ при развитии эрозионных процессов. Способность почв сохранять водоустойчивую структуру обусловлена сорбцией в них гумусовых веществ, обладающих амфифильными свойствами. В наибольшей степени такими свойствами обладают молодые фракции лабильных гумусовых веществ (ЛГВ), находящиеся в адсорбированном состоянии в микроагрегатах. Следовательно, количественное содержание ЛГВ в структурно-агрегатных фракциях является надежным индикатором их противоэрозионной устойчивости. Целью исследований являлось оценить роль адсорбированных ЛГВ в структурно-агрегатных фракциях черноземов в отношении их противоэрозионной устойчивости.

Задачи: провести полевые исследования эродированных черноземов; произвести отбор почвенных образцов и провести в них ряд лабораторных исследований по выявлению сорбционных свойств структурно-агрегатных фракций в отношении Сорг. и ЛГВ; доказать, что сорбция ЛГВ структурно-агрегатными фракциями играет существенную роль в сохранении водопрочной структуры черноземов.

Установлено, что в эродированных черноземах происходит деградация структурно-агрегатного состояния, сопровождающаяся ухудшением микроструктурности, снижением количества мезоагрегатов и коэффициента структурности, а также утратой водопрочной структуры. Показано, что сорбция ЛГВ структурно-агрегатными фракциями играет существенную роль в сохранении водопрочной структуры черноземов. Установлено, что главную роль в сорбции Сорг. играют мезоагрегаты размером 5-1 мм, которые быстро утрачиваются почвой при развитии эрозионных процессов.

Ключевые слова: сорбция, структурно-агрегатные фракции, лабильное.

Для цитирования: Громовик А.И., Горбунова Н.С., Девятова Т.А. Сорбция лабильных гумусовых веществ структурно-агрегатными фракциями эродированных черноземов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 948-957. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11729>

Original article

Sorption of labile humus substances by structural-aggregate fractions of eroded chernozems

Arkady I. Gromovik[✉], **Nadezhda S. Gorbunova, Tatyana A. Devyatova**

Voronezh State University, Voronezh, Russia, agrom.ps@mail.ru[✉]

Abstract. Erosion processes are the main cause of degradation of chernozems, which occurs mainly as a result of the loss of soil organic matter and deterioration of the structural and aggregate state. The main part of organic carbon ($C_{org.}$) is concentrated in macroaggregates, therefore the destruction of macroaggregate fractions is the main cause of loss of $C_{org.}$ during the development of erosion processes. The ability of soils to maintain a water-resistant structure is due to the sorption of humus substances, which have amphiphilic properties in them. To



the greatest extent, such properties are possessed by young fractions of labile humus substances (LHS), present in an adsorbed state in microaggregates. Consequently, the quantitative content of LHS in structural-aggregate fractions is a reliable indicator of their anti-erosion resistance.

The goal of the research was the evaluation of the role of adsorbed LHS in the structural-aggregate fractions of chernozems in relation to their anti-erosion resistance.

Objectives: conduct field research of eroded chernozems; to select soil samples and conduct a series of laboratory studies of these samples for identification of the sorption properties of structural-aggregate fractions in relation to C_{org} and LHS; to prove that the sorption of LHS by structural-aggregate fractions plays a significant role in maintaining the water-resistant structure of chernozems.

It has been established that in eroded chernozems there is a degradation of the structural-aggregate state, accompanied by deterioration of microstructure, a decrease in the number of mesoaggregates and the coefficient of structure, as well as the loss of a water-resistant structure. It has been shown that the sorption of LHS by structural-aggregate fractions plays a significant role in maintaining the water-stable structure of chernozems. It was established that the main role in the sorption of C_{org} belongs to mesoaggregates with the size of 5-1 mm, which quickly lost by the soil during the development of erosion processes.

Keywords: sorption, structural-aggregate fractions, labile.

For citation: Gromovik A.I., Gorbunova N.S., Devyatova T.A. Sorption of labile humus substances by structural-aggregate fractions of eroded chernozems. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(5): 948-957. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11729>

Введение

В условиях склонового типа местности, черноземы могут быть подвержены плоскостному смыву в результате развития эрозионных процессов [1-4]. По этой причине актуальной задачей является поиск новых подходов к выявлению и предотвращению деградации черноземов в результате эрозии [5-7]. Доля деградированных земель в ЦФО составляет около 165.7 тыс. га [8], при этом на эродированные почвы в Центральном Черноземье приходится примерно 30% [9]. Поэтому вопрос противоэрозионной защиты почв стоит остро.

Эрозионные процессы являются главной причиной деградации черноземов, которая происходит в основном в результате потери почвами органического вещества и ухудшения структурно-агрегатного состояния. Водоустойчивость структурно-агрегатных фракций обусловлена сорбцией в них C_{org} . На сегодняшний день вопрос взаимосвязи органического вещества почв с их структурно-агрегатным состоянием является дискуссионным.

Некоторые зарубежные ученые отмечают, что главная роль в аккумуляции C_{org} принадлежит макроагрегатам [10, 11]. Следовательно деструкция макроаг-

регатных фракций является главной причиной потерь C_{org} при развитии эрозионных процессов. Снижение доли крупных структурно-агрегатных фракций сопровождается обеднением почв потенциально-минерализуемым органическим веществом. При этом формирование крупных агрегатов лежит в основе почвенной секвестрации углерода [12]. Количество C_{org} возрастает с увеличением крупности водопрочных агрегатов. Утрата органического углерода в основном связана с разрушением макроагрегатов [13]. В результате утраты структурно-агрегатного состояния макроагрегаты диспергируются [11]. В результате деструкции свежее органическое вещество подвергается деполимеризации и разделяется на фрагменты разного размера, биомолекулы и частицы. В почве в свободном состоянии находится лишь малая часть органического вещества, основная же его доля связана с минеральной частью почвы [3]. Исследования зарубежных ученых [14] показывают, что почвенные фракции с высокой долей аллофанов больше всего аккумулируют C_{org} , в то время как фракции с высокой долей смектита имеют широкий диапазон сорбции C_{org} , а высокое содержание в составе

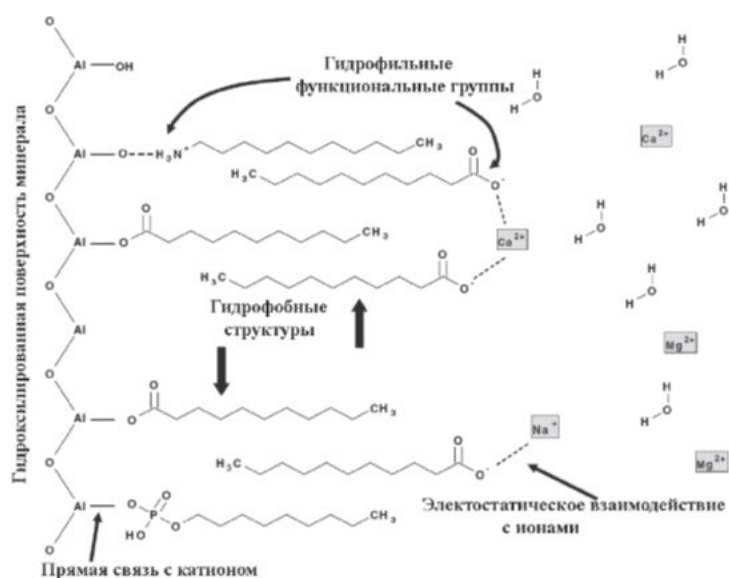


Рис. 1. Модель образования супрамолекулярного агрегата гуминовых веществ на поверхности минерала, предложенная Wershaw (1999)

Fig. 1. The model of the formation of a supramolecular aggregate of humic substances on the surface of a mineral, proposed by Wershaw (1999)

фракций коалинита резко снижает содержание $S_{орг}$. В конечном счете, сорбционная способность глинистых минералов почвы в отношении органического вещества зависит от ее гранулометрического состава, химических и биологических свойств, а также других факторов [3].

Водоустойчивость почвенных структурно-агрегатных фракций обусловлена, главным образом, сорбцией гумусовых веществ с амфифильными свойствами [15]. Одним из важных условий формирования органоминеральных комплексов является амфифильная природа органических веществ, которые содержат как гидрофобные, так и гидрофильные компоненты [16-18]. В жидкой среде амфифильные молекулы стабилизируются, образуя агрегаты. В почвенных же условиях эти молекулы формируют объединения мембраноподобных пленок, которые покрывают минеральные частицы [19]. На рисунке 1 представлена бислойная модель минерально-гуминового комплекса, предложенная Wershaw (1999), где гидрофильные части амфифильных биомолекул взаимодействуют с поверхностью минеральных частиц, а гидрофобные части защищены от полярной водной

связи вторым слоем амфифильного органического вещества. Гидрофобные части молекул слагают внутренний слой двухслойной мембраны, а гидрофильные – внешний слой. Гидрофобные области молекул внутреннего слоя обладают некоторой подвижностью и представляют собой аморфную фазу.

Kleber с соавторами [20] предложили новую многослойную модель органического вещества почвы. Согласно предложенной модели на химически активных поверхностях минеральных частиц происходит самосборка в агрегатоподобные структуры нерастворимых биомолекул органических веществ. В контактной зоне полярные функциональные группы амфифильных биомолекул взаимодействуют в результате лигандного обмена с однокоординированными гидроксильными группами, а возникающие гидрофобные взаимодействия в присутствии белковых материалов усиливают прочность сцеплений, создаваемых электростатическими связями (рис. 2). Гидрофобные части амфифильных молекул в предложенной модели также защищены от полярной водной связи. Прочность присоединения компонентов в гидрофобной зоне слабее, чем в

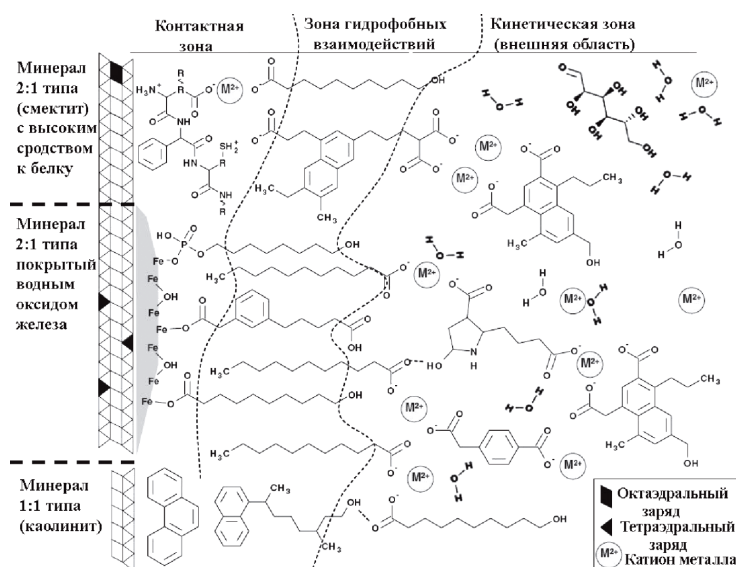


Рис. 1. Модель образования трехслойного супрамолекулярного ансамбля гуминовых веществ на поверхности минералов, предложенная Kleber и др. (2007)

Fig. 2. The model for the formation of a three-layer supramolecular ensemble of humic substances on the surface of minerals, proposed by Kleber et al. (2007)

контактной зоне, из-за чего они легче обмениваются с почвенным раствором. Органический материал в кинетической зоне слабо удерживается катионными мостиками и водородными связями, поэтому может обмениваться с окружающим почвенным раствором и имеет короткое время существования.

Таким образом, соединяясь друг с другом за счет гидрофобного связывания амфифильными гумусовыми веществами, тонкие ЭПЧ размером <0.01 мм формируют водоустойчивые структурно-агрегатные фракции [13, 16, 21, 22]. В наибольшей степени такими гидрофобными свойствами обладают молодые фракции лабильных гумусовых веществ, находящиеся в адсорбированном состоянии в микроагрегатах [21]. Следовательно, количественное содержание ЛГВ в структурно-агрегатных фракциях является надежным индикатором их противоэрозийной устойчивости.

Целью исследований являлось оценить роль адсорбированных ЛГВ в структурно-агрегатных фракциях черноземов в отношении их противоэрозийной устойчивости.

Задачи: провести полевые исследования эродированных черноземов; произвести отбор почвенных образцов и провести в них ряд лабораторных исследований по выявлению сорбционных свойств структурно-агрегатных фракций в отношении $S_{орг}$ и ЛГВ; доказать, что сорбция ЛГВ структурно-агрегатными фракциями играет существенную роль в сохранении водопропускной структуры черноземов.

Экспериментальная часть

Полевые работы проводились в Рамонском районе Воронежской области на базе ФГУП им. А.Л. Мазлумова. Объектом исследований послужила catena юго-западной экспозиции, длина которой составляла 1500 м, а крутизна 5° . Почвенные разрезы закладывались на водораздельном участке, в верхней и средней части склона catena. Почвы классифицировали согласно классификации почв СССР (1977) [23] и WRB (2014) [24].

В качестве объектов исследований выступили выщелоченные черноземы (Voronian Chernozems Pachic по WRB-2014). Почвы водораздела относятся к малогумусным среднемощным видам. В верхней и средней частях склона почвы

Таблица 1. Результаты гранулометрического (над чертой) и микроагрегатного (под чертой) составов выщелоченных черноземов (n=6)

Table 1. Results of granulometric (above the line) and microaggregate (below the line) compositions of leached chernozems (n=6)

Глубина, см	Содержание фракций ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$), % (размер частиц, мм)		Фактор дисперсности ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$)	Фактор структурности ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$)
	<0.001	<0.01		
Водораздел				
0-10	<u>20.0±0.3</u>	<u>42.7±1.0</u>	28±2	50±4
	5.5±0.1	21.1±0.4		
20-30	<u>22.2±0.2</u>	<u>43.9±1.1</u>	26±3	52±3
	5.8±0.2	19.9±0.3		
Верхняя часть склона				
0-10	<u>18.2±0.4</u>	<u>33.5±0.9</u>	42±3	37±5
	7.7±0.2	23.0±0.2		
20-30	<u>19.7±0.6</u>	<u>34.4±1.0</u>	39±2	39±4
	7.7±0.3	23.2±0.4		
Средняя часть склона				
0-10	<u>21.5±0.4</u>	<u>30.2±1.2</u>	48±4	34±2
	10.4±0.4	17.7±0.5		
20-30	<u>21.4±0.6</u>	<u>32.8±1.0</u>	40±3	36±3
	8.5±0.3	21.9±0.4		

относятся к слабо- и среднесмытым разновидностям. Все исследованные почвы характеризуются среднесуглинистым гранулометрическим составом.

В отобранных почвенных образцах выполнялись следующие виды анализов по соответствующим методикам: углерод органических соединений почвы ($C_{орг}$) по Тюрину в модификации Симакова; лабильные гумусовые вещества (ЛГВ) извлекались из почвы пирофосфатной вытяжкой (0.1 М $Na_2P_2O_7$) при pH 7.0 ед. с последующим определением в ней углерода лабильных гумусовых веществ ($C_{лгв}$) по Тюрину; содержание гумуса определяли расчетным методом с использованием коэффициента 1.724 [25]. Был определен ряд физических свойств почв: гранулометрический состав почвы определялся методом пипетки по Качинскому с предварительной обработкой образцов пирофосфатом натрия, в качестве диспергатора ЭПЧ; микроагрегатный состав определялся методом Качинского; структурно-агрегатный состав методом сухого и мокрого просеивания по Саввинову; расчетным методом определяли фактор

дисперсности (по Качинскому), фактор структурности (по Вадюниной), коэффициент структурности ($K_{стр.}$) и критерий водопрочности (АФИ). В полученных при сухом просеве структурно агрегатных фракциях (>10, 10-5, 5-1, 1-0.25 и <0.25 мм) определяли $C_{орг}$ и ($C_{лгв}$). Полученные результаты были обработаны статистически в программе Microsoft Excel 2010.

Обсуждение результатов

Содержание ЭПЧ >0.01 мм (физическая глина) в исследуемых почвах составляет от 30.2 до 43.9%, что позволяет классифицировать их как среднесуглинистые.

По результатам микроагрегатного анализа лучшей микроструктурой характеризуются черноземы не подверженные эрозии (водораздельная часть катены), в которых фактор дисперсности составляет 28% (табл. 1). В эродированных разновидностях этот показатель возрастает до 42-48%. Следовательно микроструктура этих почв менее прочная. Наибольшей способностью к оструктуриванию обладают

Таблица 2. Результаты структурно-агрегатного анализа (сухое просеивание – над чертой; мокрое – под чертой) выщелоченных черноземов (n=6)

Table 2. Results of structural-aggregate analysis (dry sifting – above the line; wet sifting – below the line) of leached chernozems (n=6)

Глубина, см	Содержание фракций ($\bar{x} \pm s_x$). % (размер. мм)					K _{стр.}	АФИ, %
	>10	10-5	5-1	1-0.25	<0.25		
$(\bar{x} \pm s_x)$							
Водораздел							
0-10	<u>28.0±1.6</u> -	<u>15.0±0.8</u> -	<u>42.5±1.3</u> 34.4±1.0	<u>7.0±0.4</u> 32.6±1.0	<u>7.5±0.6</u> 33.0±1.1	1.80±0.3	466±4
20-30	<u>35.9±1.3</u> -	<u>18.0±0.6</u> -	<u>34.4±1.1</u> 40.6±1.2	<u>7.6±0.3</u> 34.2±0.9	<u>4.1±0.5</u> 25.2±1.4	1.50±0.4	450±5
Верхняя часть склона							
0-10	<u>54.2±1.5</u> -	<u>14.4±0.9</u> -	<u>16.7±1.0</u> 16.0±1.1	<u>7.8±0.6</u> 28.4±1.0	<u>6.9±0.5</u> 55.6±1.2	0.64±0.4	364±8
20-30	<u>35.4±1.2</u> -	<u>14.6±1.0</u> -	<u>32.3±1.2</u> 17.6±0.9	<u>9.5±0.4</u> 37.0±0.8	<u>8.2±0.7</u> 45.4±1.1	1.29±0.6	389±6
Средняя часть склона							
0-10	<u>58.0±1.4</u> -	<u>5.0±0.9</u> -	<u>14.3±1.7</u> 7.0±0.9	<u>10.7±0.5</u> 27.6±0.8	<u>12.0±0.4</u> 65.4±1.2	0.43±0.5	258±5
20-30	<u>46.9±1.4</u> -	<u>20.4±0.9</u> -	<u>19.1±1.9</u> 7.0±1.0	<u>10.1±0.5</u> 31.6±1.1	<u>3.5±0.3</u> 61.4±1.3	0.98±0.4	313±5

неэродированные черноземы (фактор структурности равен 50-52%), а наименьшей – слабо- и среднесмытые разновидности, где фактор структурности составляет соответственно 37-39 и 34-36%.

Лучшей почвенной структурой обладает выщелоченный чернозем водораздельного участка (K_{стр.} составляет 1.50-1.82). По результатам мокрого просеивания эта же почва имеет отличную водостойчивость (67% в слое 0-10 см и 75% – 20-30 см) и высокий критерий водопропрочности агрегатов (450-466%) (табл. 2).

K_{стр.} в черноземах подверженных эрозии в слое неудовлетворительный. Данный показатель в слабосмытых почвах составляет 0.64, а в среднесмытых – 0.43. Кроме того, эродированные почвы отличаются низким содержанием водостойчивых агрегатов, количество которых уменьшается с 44-55% до 35-39% по мере нарастания степени смытости. Эти почвы имеют невысокий показатель АФИ, который также уменьшается с 364-389% до 258-313% с нарастанием степени эродированности. Следовательно, развитие эрозионных процессов сопровождается

деградацией структурно-агрегатного состояния черноземов, за счет снижения коэффициента структурности и уменьшения водостойчивых почвенных агрегатов (деагрегация почвенной массы).

Рассмотренные во введении процессы взаимодействия минеральной части почвы с органическим веществом можно рассматривать как основу физико-химической и физической стабилизации последнего. Под стабилизацией можно понимать механизмы формирования микро- и макроагрегатов в почве [26, 27]. По мнению [13] процесс агрегации происходит в несколько этапов: формирование ядер из органоминеральных комплексов; связывание в микроагрегаты органоминеральных ядер агрегирующим материалом, в качестве которого могут выступать оксиды, алюмосиликаты, гуминовые вещества; покрытие полисахаридных капсул микробных колоний частицами глины; сцепление микроагрегатов между собой в макроагрегаты различными клеящими веществами (микробные и растительные полисахариды), мелкими кор-

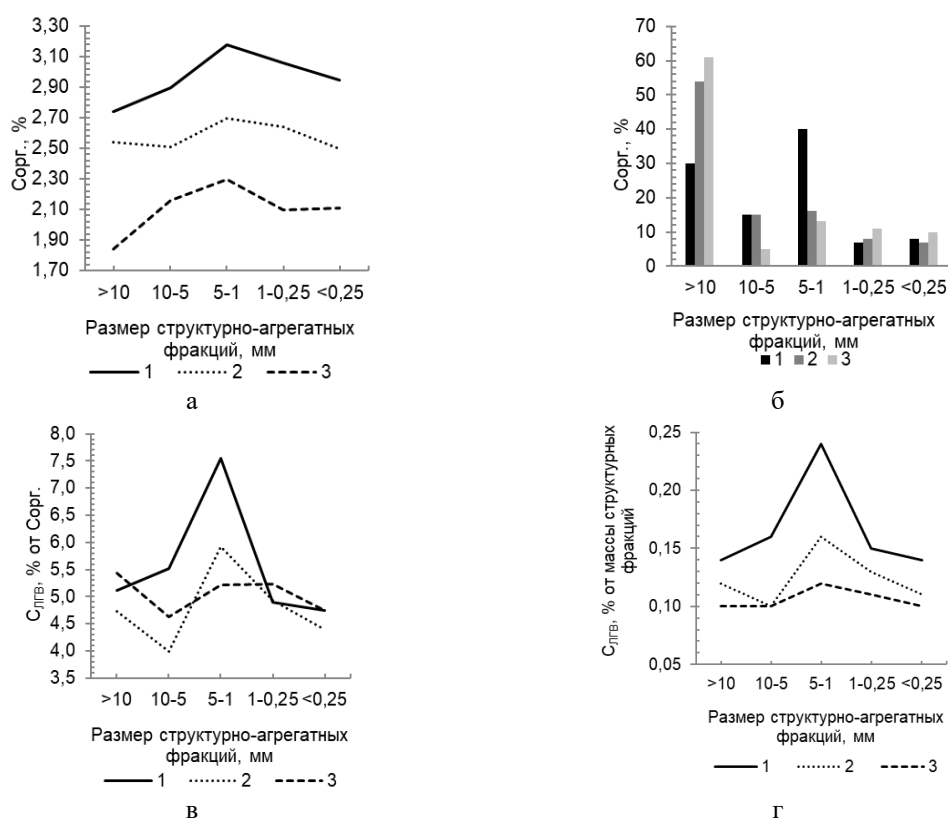


Рис. 3. Распределение $C_{орг}$ и $C_{лгв}$ в структурно-агрегатных фракциях выщелоченных черноземов. Цифрами обозначены: 1 – водораздел; 2 – верхняя часть склона; 3 – нижняя часть склона ($n=6$; $P=95.0\%$)

Fig. 3. Distribution of C_{org} and C_{lgv} in the structural-aggregate fractions of leached chernozems. Distribution options: 1 – watershed; 2 – upper part of the slope; 3 – lower part of the slope ($n=6$; $P=95.0\%$)

ниями, гифами грибов, бактериями и водорослями. Глинистая оболочка образует защитное покрытие, препятствующее разложению органического вещества. Поскольку в результате эрозии почв происходит физическая деградация почвенных агрегатов, то для понимания роли амфифильных ЛГВ в противоэрозионной устойчивости нами было определено количественное содержание $C_{орг}$ и $C_{лгв}$ в структурно-агрегатных фракциях черноземов, подверженных эрозии.

В незеродированном черноземе структурно-агрегатные фракции размером 5-1 мм больше всего содержат адсорбированного $C_{орг}$ (3.18%) (рис. 3а). В слабо- и среднесмытых черноземах содержание адсорбированного $C_{орг}$ снижается соответственно до 2.70 и 2.30%. Установлено,

что структурно-агрегатные фракции размером >10 и <0.25 мм меньше всего участвуют в сорбции $C_{орг}$. Так, статистическая обработка данных (при $P=0.95$) не выявила достоверных различий в содержании $C_{орг}$ в этих агрегатах.

Были выявлены различия во вкладе в $C_{орг}$ агрегатов разных размеров при развитии эрозии на черноземах. В почвах не подверженных эрозии наибольший вклад (40%) в $C_{орг}$ вносят фракции размером 5-1 мм. Доля вклада макроагрегатов (>10 мм) – 30%. Наименьший вклад в $C_{орг}$ был отмечен во фракциях размером 1-0.25 и <0.25 мм. При развитии эрозионных процессов максимальная доля вклада в адсорбированный $C_{орг}$ приходится макроагрегаты (54-61%).



Наличие адсорбированного в структурно-агрегатных фракциях ЛГВ способствует сохранению водопрочных агрегатов. Наибольшая доля адсорбированных ЛГВ в структурно-агрегатных фракциях отмечена в неэродированных почвах, а наименьшая – в среднесмытых разновидностях (рис. 3в,г). Таким образом, в неэродированных черноземах органическое вещество находится в стабилизированном состоянии.

Количество адсорбированного Слгв структурно-агрегатными фракциям разного размера не одинакова. В черноземах не подверженных эрозии максимальная сорбционная способность в отношении ЛГВ отмечена у мезоагрегатов размером 5-1 мм – 0.24% (7.5% от $S_{орг.}$). В более крупных и более мелких фракциях сорбция ЛГВ снижается.

Выявлена тесная зависимость ($R^2=0.81$) между количеством мезоагрегатов и содержанием в них адсорбированного Слгв. Чем больше в почвенных агрегатах аккумулируется адсорбированного Слгв, тем лучшими противозерозионными свойствами они обладают. В результате физической деградации, вызванной эрозией, черноземы в первую очередь утрачивают ценные мезоагрегаты с высокой долей адсорбированного в них $S_{орг.}$, в том числе и Слгв. Наблюдаемый процесс дезагрегации является главной причиной потерь органического углерода почвой в результате эрозии. Подтверждением тому могут служить результаты исследований с меченым углеродом [28, 29]. Доля минерализованного углерода диспергированных агрегатах при лабораторной инкубации образцов часто больше чем в мезоагрегатах [30]. Включенное в мезоагрегаты свежее органическое вещество

Список литературы/References

1. Gusarov A.V., Golosov V.N., Shariullin A.G., Gafurov A.M. Contemporary trend in erosion of arable southern chernozems (haplic chernozems pachic) in the west of Orenburg oblast (Russia). *Eurasian Soil*

предохраняется от быстрой минерализации.

Из вышесказанного следует, что взаимодействие амфифильных ЛГВ с поверхностью минеральных частиц с образованием органоминеральных комплексов – это не только механизм стабилизации органического вещества почв, но и начальное звено формирования почвенных агрегатов, придающих ему физическую защищенность, в том числе и от процессов эрозии.

Заключение

Эрозионные процессы сопровождаются деградацией уровней структурной организации черноземов выщелоченных, что в конечном итоге приводит к физической дезагрегации. Наибольший вклад в содержание адсорбированного $S_{орг.}$ вносят мезоагрегаты 5-1 мм, которые теряются почвами при развитии эрозии. Возможность почв к оструктуриванию напрямую зависит от степени смытости и способности структурно-агрегатных фракций адсорбировать ЛГВ. От сорбции структурно-агрегатными фракциями ЛГВ зависит коэффициент структурности и критерий водопрочности агрегатов. Органоминеральные взаимодействия амфифильных ЛГВ с почвенными частицами лежит в основе стабилизации органического вещества и формирования водостойчивых почвенных агрегатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Science. 2018; 5 (51): 561-575.
<https://doi.org/10.1134/S1064229318050046>

2. Plotnikova O.O., Demidov V.V., Lebedeva M.P. Deystviye melkovodnykh potokov na poverkhnostnyye gorizonty chernozema tipichnogo razlichnoy stepeni smytosti. *Byulleten pochvennogo instituta*



- im. V. V. Dokuchayeva. 2018; 91: 85-109. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-91-85-109>
3. Semenov V.M., Kogut B.M. Pochvennoye organicheskoye veshchestvo. *GEOS*. 2015; 233. (In Russ.)
 4. Shpedt A.A., Zharinova N.Y., Trubnikov Y.N. Agroгенic degradation of soils in Krasnoyarsk forest-steppe. *Eurasian Soil Science*. 2017; 10 (50): 1209-1216. <https://doi.org/10.1134/S106422931710012X>
 5. Zaydelman F.R. Zashchita pochv ot degradatsii. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2008; 78(8): 693-703. (In Russ.)
 6. Kogut B. M. Otsenka urovney erodirovannosti chernozemov po otnositelnoy stepeni ikh gumusirovannosti. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva*. 2015; 78: 59-69. (In Russ.)
 7. Molchanov E.N., Savin I.Y., Bulgakov D.S., Yakovlev A.S., Makarov O.A. National approaches to evaluation of the degree of soil degradation. *Eurasian Soil Science*. 2015; 11 (48): 1268-1277. <https://doi.org/10.1134/S1064229315110113> (In Russ.)
 8. Gosudarstvennyy (natsionalnyy) доклад o sostoyanii i ispolzovanii zemel v Rossiyskoy federatsii v 2017 godu.
 9. Kuznetsov M.S., Glazunov G.P. Eroziya i okhrana pochv. *Kolos*. 2004; 352. (In Russ.)
 10. 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; 128: 63-79.
 11. Six J., Paustian K., Elliott E. T., Combrink C. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000; 64: 681-689.
 12. Semenov V.M., Ivannikova L.A., Semenova N.A., Khodzhaeva A.K., Udaltsov S.N. Organic matter mineralization in different soil aggregate fractions. *Eurasian Soil Science*. 2010; 2 (43): 141-148. <https://doi.org/10.1134/S1064229310020031>
 13. Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian J. Soil Res.* 1991; 29(6): 815-828.
 14. Schulten H.R., Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biology Fertility Soils*. 2000; 30: 399-432.
 15. Milanovskiy E.Yu. Gumusovyye veshchestva pochv kak prirodnyye gidrofobno-gidrofilnyye soyedineniya *GEOS*. 2009; 186. (In Russ.)
 16. Milanovskii E.Yu., Shein E.V. Functional role of amphiphilic humus components in humus structure formation and soil genesis. *Eurasian Soil Science*. 2002; 10(35): 1064-1075.
 17. Wershaw R.L. Model for humus in soils and sediments. *Environmental Science and Technol.* 1993; 27: 814-816.
 18. von Wandruszka R. The micellar model of humic acid: evidence from pyrene fluorescence measurements. *Soil Sci.* 1998; 163: 921-930.
 19. Wershaw R.L. Molecular aggregation of humic substances. *Soil Sci.* 1999; 164: 803-813.
 20. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry*. 2007; 85: 9-24.
 21. 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; 60: 801-807.
 22. Milanovskii E.Yu., Shein E.V. Functional role of amphiphilic humus components in humus structure formation and soil genesis. *Eurasian Soil Science*. 2002; 10(35): 1064-1075.
 23. Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR. *Kolos*. 1977; 221. (In Russ.)
 24. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating



legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO. Rome.

25. Shcheglov D.I., Gromovik A.I., Gorbunova N.S. Osnovy khimicheskogo analiza pochv. Izdatelskiy dom VGU. 2019; 332. (In Russ.)

26. Bronick C.J., Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 2005; 124: 3-22.

27. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 2004; 79: 7-31.

28. Angers D.A., Recous S., Aita C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C¹⁵N-labeled wheat straw in situ. *European J. Soil Sci.* 1997; 48: 295-300.

29. Gale W.J., Cambardella C.A. Carbon dynamics of surface residue – and root-derived organic matter under simulated no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2000; 64: 190-195.

30. Bossuyt H., Six J., Hendrix P.F. Aggregate-protected carbon in no-tillage and conventional tillage agroecosystems using carbon-14 labeled plant residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002; 66: 1965-1973.

Информация об авторах / Information about the authors

А.И. Громовик – к.б.н., доцент кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Н.С. Горбунова – к.б.н., доцент кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

Т.А. Девятова – д.б.н., профессор, заведующая кафедрой экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета, Воронеж, Россия

A.I. Gromovik – PhD, associate professor, Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: agrom.ps@mail.ru

N.S. Gorbunova – PhD, associate professor, Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: vil-ian@list.ru

T.A. Devyatova – Doctor of biological sciences, professor, head of the Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: devyatova.eco@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.06.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 19.07.2023.

The article was submitted 17.06.2023; approved after reviewing 17.07.2023; accepted for publication 19.07.2023.