



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10894

Формирование горизонта плужной подошвы в черноземах и ее сорбционные особенности в отношении органического вещества и тяжелых металлов

Аркадий Игоревич Громовик¹✉, Надежда Сергеевна Горбунова¹

¹Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, agrom.ps@mail.ru[✉]

Аннотация. Горизонт плужной подошвы, формируемый при распашке черноземов, отличается значительным уплотнением почвенной массы, а также аккумуляцией тонких элементарных почвенных частиц (ЭПЧ). Это в свою очередь, ограничивает глубину проникновения корневых систем культурных растений, и как следствие, ведет к снижению их продуктивности. На наш взгляд, формирование горизонта плужной подошвы дает предпосылки для увеличения его сорбционной способности в отношении органического вещества и тяжелых металлов. Согласно этой гипотезе, горизонт плужной подошвы можно рассматривать как геохимический барьер для дальнейшей вертикальной миграции органического вещества и солей тяжелых металлов в почвах. Цель работы: установить механизмы формирования горизонта плужной подошвы в черноземах и исследовать его сорбционные свойства в отношении органического вещества и тяжелых металлов – свинца и кадмия.

Задачи исследования являлось проведение полевых исследований морфогенетических особенностей черноземов, подверженных формированию плужной подошвы; отобрать почвенные образцы провести в них ряд лабораторных исследований по выявлению сорбционных свойств в отношении органического вещества и тяжелых металлов (Pb и Cd); доказать, что формируемый агрогенным путем горизонт плужной подошвы является геохимическим барьером для дальнейшей вертикальной миграции органического вещества и тяжелых металлов.

Установлено, что горизонт плужной подошвы формируется при пахотно-иллювиальной аккумуляции тонкодисперсных ЭПЧ, которые проявляют существенные сорбционные свойства в отношении углерода органических соединений почвы, лабильных гумусовых веществ и подвижных форм тяжелых металлов (Pb и Cd). Горизонт выступает в качестве барьера дальнейшей активной миграции мобильной фракции органического вещества и подвижных солей ТМ. Формирование плужной подошвы следует рассматривать как признак деградации черноземов, так как комплекс неблагоприятных свойств (увеличение плотности почв и сужение порового пространства на 10% по сравнению с вышележащим пахотным горизонтом) способствуют снижению продуктивности растений. Аккумуляция тяжелых металлов, обусловленная плужной подошвой, может способствовать их более активной транслокации в растительные организмы, ухудшая качество растениеводческой продукции. В связи с этим комплекс агро-технических мероприятий должен быть направлен на борьбу с этим негативным явлением.

Ключевые слова: сорбционная способность, элементарные почвенные частицы, органическое вещество почв, тяжелые металлы, плужная подошва.

Для цитирования: Громовик А.И., Горбунова Н.С. Формирование горизонта плужной подошвы в черноземах и ее сорбционные особенности в отношении органического вещества и тяжелых металлов // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 6. С. 877-884.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10894>

Original article

Formation of the tillage pan bottom horizon in black soils and its sorption features with respect to organic matter and heavy metals

Arkady I. Gromovik¹✉, Nadezhda S. Gorbunova¹

¹Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, agrom.ps@mail.ru[✉]



Abstract. The tillage pan horizon, which forms when black soils are ploughed, is characterised by a significant compaction of soil material and accumulation of fine elementary soil particles (ESP). This, in turn, limits the penetration depth of root systems of cultivated plants, and, as a result, leads to a decreased productivity. In our opinion, the formation of the tillage pan horizon provides the prerequisites for its increased sorption capacity with respect to organic matter and heavy metals. According to this hypothesis, the tillage pan horizon can be considered as a geochemical barrier for further vertical migration of organic matter and heavy metal salts in soils. Objectives: to establish mechanisms of the formation of the tillage pan horizon in black soils and to study its sorption properties with respect to organic matter and heavy metals, i.e. lead and cadmium.

The research involved completing the following tasks: to conduct a field study of the morphogenetic features of black soils susceptible to the formation of tillage pans; to select soil samples and to conduct a number of laboratory studies aimed at identifying their sorption properties with regard to organic matter and heavy metals (Pb and Cd); to prove that the tillage pan horizon, which has been formed in an agrogenic way, is a geochemical barrier for further vertical migration of organic matter and heavy metals.

It was established that the tillage pan horizon is formed during the arable and illuvial accumulation of fine ESPs, which exhibit sorption properties with respect to carbon of organic compounds in the soil, labile humus substances, and mobile forms of heavy metals (Pb and Cd). The horizon acts as a barrier for further active migration of the mobile fraction of organic matter and mobile heavy metal salts. The formation of tillage pans should be considered as a sign of black soil degradation since a combination of unfavourable properties (an increase in soil density and a 10% reduction in pore space as compared to the upper arable horizon) contributes to decreased plant productivity. Heavy metals accumulated due to tillage pans can contribute to their more active translocation into plant organisms and therefore degrade crop output. In this regard, a set of agrotechnical measures should be implemented to mitigate this negative phenomenon.

Keywords: sorption capacity, elementary soil particles, soil organic matter, heavy metals, tillage pan.

For citation: Gromovik A.I., Gorbunova N.S. Formation of the tillage pan bottom horizon in black soils and its sorption features with respect to organic matter and heavy metals. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(6): 877-884. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10894>

Введение

Одним из главных факторов агрогенной трансформации черноземов является их распашка. Многие исследователи отмечают возможность антропогенной эволюции верхней части гумусовой толщи путем формирования под пахотным горизонтом уплотненного горизонта плужной подошвы [1-3]. Горизонт плужной подошвы отличается значительным уплотнением почвенной массы, а также аккумуляцией тонких элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) на поверхности которых могут сорбироваться органическое вещество и тяжелые металлы [4]. Это в свою очередь, ограничивает глубину проникновения корневых систем культурных растений, и как следствие, ведет к снижению их продуктивности [5]. На наш взгляд, формирование горизонта плужной подошвы дает предпосылки для увеличения его сорбционной способности в отношении органического вещества и тяжелых металлов. Согласно этой гипотезе, формируемый агрогенным путем гори-

зонт плужной подошвы можно рассматривать как геохимический барьер для дальнейшей вертикальной миграции органического вещества и солей тяжелых металлов в почвах.

Цель работы – установить механизмы формирования горизонта плужной подошвы в черноземах и исследовать его сорбционные свойства в отношении органического вещества и тяжелых металлов – свинца и кадмия.

Задачи: провести полевые исследования морфогенетических особенностей черноземов, подверженных формированию плужной подошвы; отобрать почвенные образцы провести в них ряд лабораторных исследований по выявлению сорбционных свойств в отношении органического вещества и тяжелых металлов (Pb и Cd); доказать, что формируемый агрогенным путем горизонт плужной подошвы является геохимическим барьером для дальнейшей вертикальной миграции органического вещества и тяжелых металлов.



Экспериментальная часть

Полевые исследования проводились на территории землепользования ОАО «Восход» (Хохольский район, Воронежской области). В качестве объектов исследований выступали старопахотные черноземы типичные малогумусные среднemocные тяжелосуглинистые на покровных карбонатных суглинках. Почвенные образцы отбирались сплошной колонкой каждые 5 см до глубины 50 см в 8-кратной повторности.

Аналитические исследования проводились в лабораториях кафедры экологии и земельных ресурсов Воронежского государственного университета. В отобранных почвенных образцах определялись следующие показатели по соответствующим методикам: гранулометрический состав методом пипетки по Н.А. Качинскому с обработкой почвы пирофосфатом натрия; микроагрегатный состав методом пипетирования по Н.А. Качинскому; структурный анализ почвы по методу Н.И. Саввинова (сухое и мокрое просеивание); плотность сложения почвы методом режущего кольца; плотность твердой фазы почвы пикнометрическим методом; углерод органических соединений почвы ($S_{орг.}$) методом И.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова; углерод лабильных гумусовых веществ ($S_{лгв}$) в пирофосфатной вытяжке; подвижные формы соединений ТМ – Pb и Cd в вытяжке ацетатно-аммонийного буфера атомно-абсорбционным методом на спектрометре КВАНТ – Z. ЭТА. Расчетными методами определяли общую пористость почвы и коэффициент структурности почвы ($K_{стр.}$).

Модельные эксперименты были проведены на почвенных образцах различного гранулометрического состава, в которых определяли зависимости содержания в почве $S_{орг.}$, $S_{лгв}$ и ТМ от содержания физической глины (ЭПЧ размером <0.01 мм).

Результаты аналитических исследований обрабатывались статистически с использованием программ Statistika 6.0 и Microsoft Excel 2010.

Обсуждение результатов

Полевые исследования позволили выделить основные морфогенетические особенности горизонта плужной подошвы в старопахотных черноземах. Среди них можно отметить следующее: существенная уплотненность почвенной массы; слабовыраженная микропористость; наличие крупных, прочных остро-реберных структурных отдельностей; органо-минеральные коллоидные кутаны на поверхности структурных отдельностей.

Объекты исследований в верхней части почвенного профиля имеют тяжелосуглинистый гранулометрический состав (содержание ЭПЧ <0.01 мм составляет 49.4-54.6%), который с глубиной постепенно утяжеляется до среднеглинистого (доля ЭПЧ <0.01 мм достигает до 66.8%). Среди фракций преобладает крупнопылевая (ЭПЧ 0.05-0.01 мм) – 31.8-37.2% (табл. 1).

Распределение фракций физической глины и ила (<0.001 мм) с глубиной почвы не равномерное. Под пахотной толщей в горизонте формирования плужной подошвы (на глубине 20-25 см) количество этих фракций аккумулируется, что подтверждается наличием максимумов на кривых профильного распределения (рис. 1).

Важным диагностическим критерием формирования горизонта плужной подошвы выступает уплотнение в нем почвы и сужение порового пространства. По сравнению с пахотной толщей, горизонт плужной подошвы уплотняется на 0.18 г/см³. Это способствует уменьшению пористости почвенной массы на 10%. Так на рис. 1-2 можно наблюдать характерный максимум уплотнения и сужение порового пространства (минимум) в горизонте формирования плужной подошвы (20-25 см).

Благодаря заметному уплотнению почвенной массы и накоплению тонких ЭПЧ в

Таблица 1. Гранулометрический состав старопашотных черноземов ОАО «Восход», n=8
 Table 1. Granulometric composition of the old-arable black soils belonging to ОАО Voskhod, n=8

Глубина, см	Содержание фракций ($\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$), % (размер частиц, мм)						
	1-0.25	0.25-0.05	0.05-0.01	0.01-0.005	0.005-0.001	<0.001	<0.01
0-5	9.8±0.4	5.8±0.2	35.0±1.3	9.5±0.4	18.6±0.9	21.3±1.1	49.4±1.8
5-10	9.8±0.3	2.0±0.1	37.2±1.5	9.4±0.5	19.9±0.9	21.7±1.0	51.0±2.0
10-15	4.8±0.1	9.4±0.3	31.2±1.2	10.8±0.4	30.3±1.2	13.5±0.6	54.6±2.1
15-20	4.1±0.2	9.9±0.3	31.8±1.2	12.2±0.5	16.0±0.7	26.0±1.0	54.2±2.4
20-25	4.2±0.2	11.1±0.4	30.6±1.3	6.0±0.3	20.3±1.1	27.8±1.0	54.1±2.1
25-30	4.1±0.1	11.0±0.3	22.9±1.0	11.2±0.4	15.1±0.6	35.7±1.3	62.0±2.6
30-35	3.5±0.1	10.8±0.4	23.9±1.1	9.6±0.3	23.4±1.1	28.8±1.0	61.8±2.6
35-40	3.3±0.1	9.6±0.3	20.3±1.0	10.1±0.4	29.3±1.0	27.4±1.1	66.8±2.5
40-45	3.3±0.2	9.8±0.3	20.0±0.9	11.0±0.4	27.5±1.0	28.4±1.0	66.9±2.8
45-50	3.4±0.2	9.4±0.3	22.3±1.1	9.8±0.3	25.1±1.1	30.0±1.2	64.9±2.5

*n – количество образцов; \bar{x} – среднее арифметическое; $s_{\bar{x}}$ – ошибка среднего арифметического.

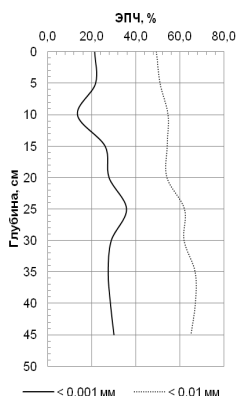


Рис. 1. Профильное распределение физической глины и ила в старопашотных черноземах ОАО «Восход» (n=8)
 Fig. 1. Depthwise distribution of physical clay and silt in the old-arable black soils belonging to ОАО Voskhod (n=8)

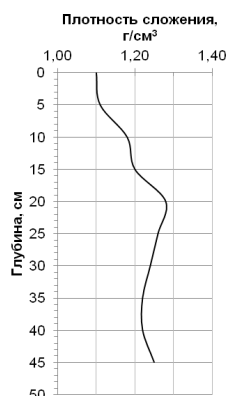


Рис. 2. Профильное распределение плотности сложения в старопашотных черноземах ОАО «Восход» (n=8)
 Fig. 2. Depthwise distribution of bulk density in the old-arable black soils belonging to ОАО Voskhod (n=8)

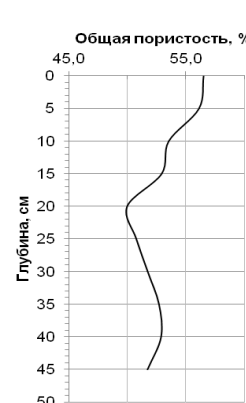


Рис. 3. Профильное распределение общей пористости в старопашотных черноземах ОАО «Восход» (n=8)
 Fig. 3. Depthwise distribution of total porosity in the old-arable black soils belonging to ОАО Voskhod (n=8)

горизонте формирования плужной подошвы происходит аккумуляция $S_{орг}$ (до 3.65%) и $S_{лгв}$ (до 0.36%). На графиках профильного распределения $S_{орг}$ и $S_{лгв}$ в старопашотных черноземах обнаруживается второй максимум аккумуляции в горизонте плужной подошвы на глубине 20-25 см (рис. 4-5), ниже которого содержание рассматриваемых показателей постепенно убывает с глубиной. При этом аккумуляция $S_{лгв}$ в плужной подошве выражена бо-

лее отчетливо, что хорошо иллюстрируется графиком профильного распределения $S_{лгв}$ (рис. 6).

Из полученных данных видно, что сорбция $S_{орг}$ и $S_{лгв}$ в горизонте плужной подошвы происходит за счет увеличения в нем доли ЭПЧ <math><0.01\text{ мм}</math>. Многие исследования показывают, органическое вещество почв напрямую зависит от содержания глинистых ЭПЧ, которые в свою очередь соединяются между собой силами

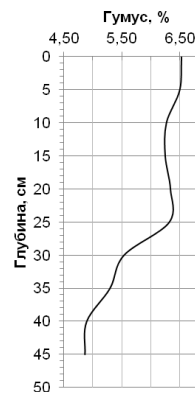


Рис. 4. Профильное распределение гумус в черноземах типичных (n=8)
Fig. 4. Depthwise distribution of humus in typical black soils (n=8)

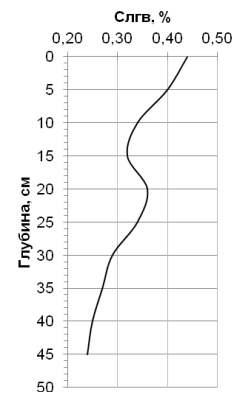


Рис. 5. Профильное распределение С_{ЛГВ} в черноземах типичных (n=8)
Fig. 5. Depthwise distribution of C_{LHV} in typical black soils (n=8)

гидрофобного связывания за счет амфифильности [6-8].

В тонкодисперсных фракциях количество закрепленного органического вещества и алкильного углерода возрастает [9]. Главная роль в повышении $S_{орг}$ почв принадлежит ЭПЧ размером <0.01 мм, что отмечают в своих работах многие ученые [10-17].

Поведение тяжелых металлов, согласно многочисленным исследованиям, в том числе и нашим, определяется как профильным распределением органического вещества, так и илистой фракцией [18-19]. Так при взаимодействии Pb и Cd с молекулами гуминовых кислот образуются прочные соединения хелатного типа, при этом Cd имеет меньшее сродство к гуминовым кислотам [20]. Данное положение подтверждается коэффициентами корреляции между профильным распределением органического вещества, Pb и Cd, которые равны 0.92 и 0.89 (при $P=95.0\%$).

Для подтверждения вышесказанного нами была проделана серия модельных лабораторных экспериментов (объем выборки $n=25$). В почвенных образцах с разной обогащенностью ЭПЧ <0.01 мм определяли содержание $S_{орг}$ и С_{ЛГВ}, а также подвижные соединения Pb и Cd. В ходе анализа были выявлены тесные корреляционные зависимости всех показателей осо-

бенно по С_{ЛГВ} ($R^2=0.94$ при $P=95.0\%$) с физической глиной (рис. 6 и 7). Высокие корреляционные зависимости отмечаются в профильном распределении физической глины и тяжелыми металлами (рис. 8 и 9). Данный эксперимент подтверждает высокую сорбционную способность ЭПЧ, размером <0.01 мм к Pb и Cd. На рисунках 6-9 прослеживаются некоторые отличия между прямолинейной зависимостью сорбции рассматриваемых показателей и экспериментальными точками с ростом доли ЭПЧ <0.01 мм. Это обусловлено дополнительным воздействием химически связанной влаги в минеральной фракции почв, а также естественным варьированием показателей [10, 21].

Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что по мере увеличения в гранулометрическом составе доли тонких ЭПЧ, увеличивается сорбционная способность почвы в отношении органического вещества (в нашем случае $S_{орг}$ и С_{ЛГВ}), а также подвижных соединений Pb и Cd. Таким образом, аккумуляция физической глины в горизонте формирования плужной подошвы способствует также аккумуляции в ней органического вещества и тяжелых металлов. Кроме того, данный горизонт служит не только барьером для дальнейшей активной миграции мобильной фракции органического вещества

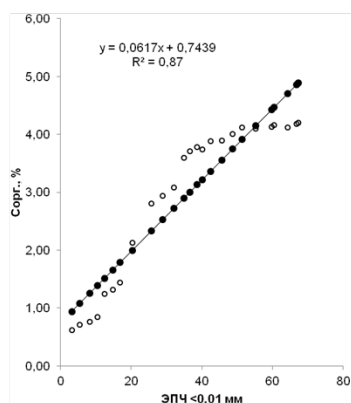


Рис. 6. Зависимость сорбции $C_{орг}$ от содержания в почве ЭПЧ <0.01 мм
 Fig. 6. Dependence of $C_{орг}$ Sorption on the content of ESP in the soil <0.01 mm

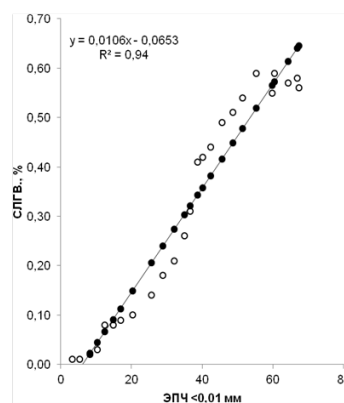


Рис. 7. Зависимость сорбции $C_{ЛГВ}$ от содержания в почве ЭПЧ <0.01 мм
 Fig. 7. Dependence of $C_{ЛГВ}$ sorption on the content of ESP in the soil <0.01 mm

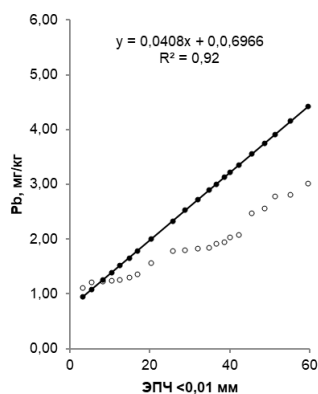


Рис. 8. Зависимость сорбции Pb от содержания в почве ЭПЧ <0.01 мм
 Fig. 8. Dependence of Pb sorption on the content of ESP in the soil <0.01 mm

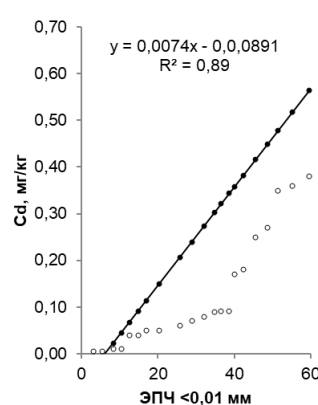


Рис. 9. Зависимость сорбции Cd от содержания в почве ЭПЧ <0.01 мм
 Fig. 9. Dependence of Cd sorption on the content of ESP in the soil <0.01 mm

($C_{ЛГВ}$) вниз по почвенному профилю, но и подвижных соединений Pb и Cd.

Заключение

Установлено, что горизонт плужной подошвы формируется при пахотно-иллювиальной аккумуляции тонкодисперсных элементарных почвенных частиц (ЭПЧ <0.01 мм) с последующим уплотнением, которые проявляют существенные сорбционные свойства в отношении углерода органических соединений почвы, лабильных гумусовых веществ и подвижных форм тяжелых металлов (Pb и Cd). Это также было подтверждено серией модельных экспериментов, в результате которых установлены тесные корреляционные зависимости содержания $C_{орг}$, $C_{ЛГВ}$ и ТМ в

почвах от ЭПЧ <0.01 мм. Горизонт формирования плужной подошвы выступает в качестве барьера дальнейшей активной миграции мобильной фракции органического вещества ($C_{ЛГВ}$) и подвижных солей ТМ.

Горизонт плужной подошвы можно рассматривать как признак деградации верхней части профиля пахотных черноземов, так как высокая плотность и комплекс других неблагоприятных свойств горизонта способствуют снижению продуктивности возделываемых растений. Кроме того, аккумуляция тяжелых металлов в верхней части профиля, обусловленная плужной подошвой, может способствовать их более активной транслокации в растительные ор-



ганизмы, что ухудшает качество растениеводческой продукции. В связи с этим комплекс агротехнических мероприятий должен быть направлен на борьбу с этим негативным явлением.

Список литературы

1. Medvedev V.V. Fizicheskie svoystva i karakter zaleganiya pluzhnoj podoshvy v raznyh tipah pahotnyh pochv. *Pochvovedenie*. 2011; 12: 1487-1495. (In Russ.)
2. Azarov V.M., Belokurenko S.A. O pluzhnoj «podoshve». *Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu*. 2017; 7-9. (In Russ.)
3. Alenov Zh.N., Koshen B.M., Kabdirova B.S. Metody bor'by s pluzhnoj podoshvoj v usloviyah sovremennoj sistemy obrabotki pochvy. *Modern Science*. 2019; 3: 12-15. (In Russ.)
4. 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; 13(6): e0199523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199523>
5. Dexter A.R. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seedbed and a compacted subsoil. 2. Entry of pea and wheat roots into subsoil. *Plant and Soil*. 1986; 95: 135-147.
6. Dymov A.A., Milanovskii E.Y. Assessing the complexing properties of soil organic matter by IMAC (case study of copper ions). *Eurasian Soil Science*. 2020; 53. 2: 178-186. <https://doi.org/10.1134/S1064229320020040>
7. 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.
8. John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils

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.

under different types of land use. *Geoderma*. 2005; 128: 63-79.

9. 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.

<https://doi.org/10.1007/s003740050020>

10. Arthur E., de Jonge L.W., Tuller M., Moldrup P. Clay content and mineralogy, organic carbon and cation exchange capacity affect water vapour sorption hysteresis of soil. *European Journal of Soil Science*. 2020; 71(2): 204-214.

<https://doi.org/10.1111/ejss.12853>

11. Olayemi O.P., Wallenstein M.D., Kallenbach C.M. Distribution of soil organic matter fractions are altered with soil priming. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022; 164: 108494. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108494>

12. Piccolo A., Mbagwu J.S.C. Effects of different organic waste amendments of soil microaggregates stability and molecule sizes of humic substances. *Plant Soil*. 1990; 123: 27-37.

13. Startsev V.V., Khaydapova D.D., Degteva S.V., Dymov A.A. Soils on the southern border of the cryolithozone of European part of Russia (the Subpolar Urals) and their soil organic matter fractions and rheological behavior. *Geoderma*. 2020; 361. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114006>

14. Blair G.J., Lefroy R.D.B., Singh B.P. Development and use of a carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate. *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. 1997; 273-282.



15. Tarchitzky J., Hatcher P.G., Chen J. Properties and distribution of humic substances and inorganic structure-stabilizing components in particle-size fractions of cultivated Mediterranean soils. *Soil Sci.* 2000; 165: 328-342.

16. Laird D.A., Martens D.A., Kingery W.L. Nature of clay-humic complexes in an agricultural soil: chemical, biochemical and spectroscopic analysis. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2001; 65: 1413-1418.

17. Chefetz B., Tarchitzky J., Deshmukh A.P. Structural characterization of humic acids in particle-size fraction of an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002; 66: 129-141.

18. Rajput V.D., Minkina T.M., Kumari A., Shende S.S., Ranjan A., Barakhov A.V., Rajput P., Sushkova S.N., Faizan M., Singh A., Khabirov I., Gromovik A., Gorbunova N., Nazarenko O., Kizilkaya R. A review on nanobioremediation approaches

for restoration of contaminated soil. *Eurasian Journal of Soil Science.* 2022; 11: 43-60. <https://doi.org/10.18393/EJSS.990605>

19. Yakovets L. Migration of heavy metals in the soil profile. *Norwegian Journal of Development of the International Science.* 2021; 54-1: 8-12. <https://doi.org/10.24412/3453-9875-2021-54-1-8-12>

20. Sabitova A.N., Bayakhmetova B.B., Mussabayeva B.Kh., Orazhanova L.K., Ganiyeva K.G. Sorption of heavy metals by humic acids of chestnut soils. *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series.* 2020; 3 (99): 88-98. <https://doi.org/10.31489/2020Ch3/88-98>

21. Zhang Y., Zhen Q., Xin J., Yuan Y., Wu Z., Zhang X., Cui Y., Li P. Storage of soil organic carbon and its spatial variability in an agro-pastoral ecotone of Northern China. *Sustainability.* 2020; 12. 6: 2259. <https://doi.org/10.3390/su12062259>

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

A.I. Gromovik – PhD, associate professor, Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, agrom.ps@mail.ru

N.S. Gorbunova – PhD, associate professor, Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, vilian@list.ru

Статья поступила в редакцию 29.09.2022; одобрена после рецензирования 28.11.2022; принята к публикации 07.12.2022.

The article was submitted 29.09.2022; approved after reviewing 28.11.2022; accepted for publication 07.12.2022.