



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12412

### **Депонирующие функции органического вещества к тяжелым металлам под лесной и степной растительностью Каменной степи**

**Надежда Сергеевна Горбунова<sup>✉</sup>, Аркадий Игоревич Громовик,  
Татьяна Анатольевна Девятова**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, vilian@list.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** При современном подходе в вопросах очищения окружающей природной среды от продуктов техногенеза, требуется разработка новых методов и эффективных сорбентов с точки зрения их повышенной сорбционной способности. Помимо данных качеств, материалы должны обладать селективностью к сорбируемым элементам и веществам, а также экологичностью. Гуминовые вещества отвечают всем из перечисленных требований, кроме того, следует отметить их довольно низкую себестоимость. В состав гуминовых веществ входят как гуминовые кислоты, так и фульвокислоты. Но, прежде всего, именно карбоксильные и фенольные группы гуминовых кислот участвуют в образовании металл-органических комплексов. В материалах приводятся результаты модельных опытов по сорбционной способности гумуса к таким важным загрязнителям окружающей среды как свинец и кадмий. При этом сравнивалось органическое вещество различных экосистем Каменной степи (Таловский район Воронежской области), образованное под лесными насаждениями и степной растительностью. Для реализации поставленной цели – проанализировать влияние лесной и степной экосистем на степень подвижности тяжелых металлов, исследования проводилось с применением современных методов, полученные данные статистически обработаны. Более благоприятные почвенно-климатические условия, созданные в лесополосе, приводят к достоверному накоплению органического вещества и его внутрипочвенному перераспределению. Накопление тяжёлых металлов в гумусоаккумулятивном горизонте залежи и лесополосы объясняется образованием органоминеральных комплексных соединений. Причем большее количество металлорганических соединений образуется под лесополосой благодаря наличию аэробных условий и достаточного увлажнения. В фракционно-групповом составе гумуса отмечается преобладание фракции гуминовых кислот над фракцией фульвокислот. Под лесными насаждениями гуматно-фульватное соотношение сужается, увеличивается доля подвижной фракции. Увеличение в составе гумуса подвижных и «агрессивных» фракций фульвокислот в черноземах лесополосы способствует мобилизации исследуемых тяжёлых металлов, что приводит к увеличению их миграции по профилю почв до карбонатного геохимического барьера, на котором они осаждаются. Согласно полученным данным, высокие протекторные функции органического вещества отмечаются в обеих экосистемах, с небольшим преобладанием под лесной растительностью.

**Ключевые слова:** Каменная степь, гуминовые кислоты, депонирующее свойство органического вещества, тяжелые металлы, валовое содержание, обменные соединения, свинец, кадмий.

**Для цитирования:** Горбунова Н.С., Громовик А.И., Девятова Т.А. Депонирующие функции органического вещества к тяжелым металлам под лесной и степной растительностью Каменной степи // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. Т. 24, № 4. С. 572-580. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12412>

Original article

### **Depositing functions of organic matter to heavy metals beneath the forest and steppe vegetation of the Kamennaya Steppe**

**Nadezhda S. Gorbunova<sup>✉</sup>, Arkady I. Gromovik, Tatyana A. Devyatova**

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, vilian@list.ru<sup>✉</sup>



**Abstract.** When using a modern approach to the issues of purification of the environment from technogenic products, it is necessary to develop new methods and effective sorbents in order to increase their sorption capacity. In addition to these qualities, the materials must be selective to the sorbed elements and substances and also environmentally friendly. Humic substances meet all of the listed requirements, and their cost is also quite low. Humic substances include both humic acids and fulvic acids. But, most importantly, carboxyl and phenolic groups of humic acids are those that participate in the formation of metal-organic complexes. The paper presents the results of model experiments on the sorption capacity of humus to absorb such serious environmental pollutants as lead and cadmium. We compared the organic matter of various ecosystems of the Kamennaya Steppe (Talovsky district of the Voronezh region) formed beneath forest and steppe vegetation. To achieve our goal, that is to analyse the influence of forest and steppe ecosystems on the degree of mobility of heavy metals, the research was conducted using modern methods, and the obtained data were statistically processed. More favourable soil and climatic conditions created in the forest belt result in the reliable accumulation of organic matter and its subsurface redistribution. Accumulation of heavy metals in the humus accumulative horizon of the deposit and forest belt can be explained by the formation of organomineral complex compounds. A greater number of organometallic compounds were formed beneath the forest belt due to the presence of aerobic conditions and sufficient moisture. In the fractional group composition of humus we noted the prevalence of the humic acid fraction over the fulvic acid fraction. Beneath forest vegetation, the humic-fulvic ratio narrowed, and the share of the mobile fraction grew. An increase in the composition of humus of mobile and “aggressive” fractions of fulvic acids in black soils of the forest belt contributed to the mobilisation of the studied heavy metals, which led to an increase in their migration along the soil profile to the carbonate geochemical barrier, where they were deposited. According to the data obtained, high protective functions of the organic matter were observed in both ecosystems, with a slight predominance beneath forest vegetation.

**Keywords:** Kamennaya Steppe, humic acids, depositing property of organic matter, heavy metals, gross content, exchange compounds, lead, cadmium.

**For citation:** Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Devyatova T.A. Depositing functions of organic matter to heavy metals beneath the forest and steppe vegetation of the Kamennaya Steppe. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2024. 24(4): 572-580. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12412>

## Введение

Общеизвестным является положение о том, что в фракционном составе гумуса черноземных почв ведущее положение занимают гуминовые кислоты (ГК), способные образовывать органо-минеральные комплексные соединения с тяжелыми металлами (ТМ) [1]. ГК препятствуют дальнейшей миграции ТМ в сопредельные среды, организмы растений и животных. Данным свойством, органическое вещество, подтверждает свои депонирующие или протекторные функции. Следует подчеркнуть, что наряду с ГК макролигандными свойствами обладают и фульвокислоты (ФК), но поскольку в почвах черноземного ряда доминируют ГК, то далее по тексту мы будем придерживаться этого понятия.

Для более глубокого понимания процессов сорбции и аккумуляции ТМ органическим веществом, необходимо иметь представление о структурной формуле ГК, которая способна объяснить ее многие химические свойства. В настоящее

время существует множество структурных схем строения ГК [2, 3], но для объяснения процессов депонирования удобнее использовать схему, предложенную Д.С. Орловым, а также В.Ф. Селеменевым с соавторами (рис. 1). Исходя из предложенной схемы, видно, что сложная структура ГК включает углеродные цепи, поликонденсированные ароматические кольца, остатки аминов, сахаров, гетероатомы, а также большое количество различных функциональных групп, характеризующихся высоким сродством к ТМ. Данное свойство снижает подвижность и доступность ТМ [4, 5].

Следует подчеркнуть, что в настоящее время, в условиях повышенной техногенной нагрузки, огромное внимание уделяется состоянию органического вещества при постоянном загрязняющем воздействии на него ТМ [6]. По мнению Л. Яковцева, загрязнение почв ТМ не только затрудняет созревание молекул гуминовых кислот (ГК), но и трансформирует их структуру [7].

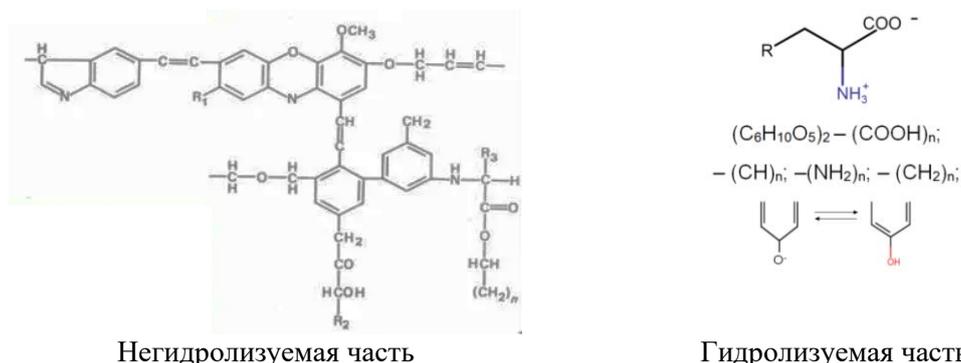


Рис. 1. Схема строения структурной ячейки гуминовых кислот негидролизуемая часть по Д.С. Орлову [2], гидролизуемая часть по В.Ф. Селеменеву [3].  
 Fig. 1. Scheme of the structure of the structural cell of humic acids, the non-hydrolyzable part according to D.S. Orlov [2], hydrolyzable part according to V.F. Selemenев [3].

Несмотря на прочную сорбционную способность молекул ГК, органическое вещество со временем минерализуется микроорганизмами [8], состав которых отличается в зависимости от растительных сообществ. Кроме того, на процессы мобилизации могут влиять корневые выделения растений.

Цель работы сравнение влияния лесной и степной растительности на степень мобилизации и иммобилизации ТМ органическим веществом черноземов.

### Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования изучались черноземы Таловского района Воронежской области (Каменная степь). Сравнивали два участка: залежь косимую и расположенную в непосредственной близости от нее лесополосу №40 (рис. 2). Несмотря на выровненность рельефа и одинаковые почвообразующие породы – покровные карбонатные глины, подстилаемые коричнево-бурыми глинами [9], растительность повлияла на трансформацию почвенного покрова.

Так под степной растительностью косимой залежи сформировались черноземы обыкновенные среднегумусные среднетяжелосуглинистые. Длительное произрастание лесополосы привело к трансформации черноземов обыкновенных в черноземы типичные средне-

гумусные среднетяжелосуглинистые. Лесная растительность задерживает не только снежный покров, но и на длительное время сохраняет влажность после осадков. Со временем создается уникальный микроклимат, который способствует более глубокому промачиванию почвенного профиля. В результате отмечается более интенсивное развитие гумусовой толщи за счет перераспределения органического вещества и выщелачивание карбонатов в нижнюю часть гумусового горизонта.

Почвенные образцы отбирались по слою, каждые 20 см. В отобранных образцах определяли валовое содержание гумуса по И.В. Тюрину, фракционно-групповой состав по И.В. Тюрину в модификации В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [10]. Помимо органического вещества, на миграцию ТМ огромное влияние оказывает реакция среды. Поэтому потенциометрическим методом была определена pH водной суспензии, с применением микропроцессорного иономера И-160МИ (Aquilon, Moscow, Russia). Подготовительные работы по определению масс почвенных образцов и реактивов проводили на электронных аналитических весах HR-100ARG. Химические реактивы и лабораторная посуда поставляется фирмой Vekton (St. Petersburg, Russia).



Рис. 2. Схема расположения объектов исследования: 1 – лесополоса №40 (N 51.032286°, E 40.726286°); 2 – залежь косимая (N 51.032253°, E 40.728653°).  
Fig. 2. Layout of research objects: 1 – forest belt №40 (N 51.032286°, E 40.726286°); 2 – mowing fallow (N 51.032253°, E 40.728653°).

Для обоснования и доказательства депонирующих свойств органического вещества к ТМ исследовалось валовое содержание и обменные соединения ТМ – Pb, Cd. Из большого перечня ТМ, данные элементы были выбраны согласно своей высокой токсичности и довольно широкому распространению в техногенезе. Исследование отношения – валовое содержание/обменные соединения ТМ позволяет анализировать и прогнозировать дальнейшее поведение ТМ в естественных и техногенных ландшафтах, показать пути их миграции [11-14]. Валовое содержание элементов определяли в прокаленной почве. Каление проводили при температуре 505°C в течение 3 часов в муфельной печи SNOL (Umega, Lithuania). После прокаливания, навески обрабатывались азотной кислотой (HNO<sub>3</sub>) 1:1 и концентрированной (30%) перекисью водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). С указанными реагентами почва подвергалась кипячению, отстаиванию и фильтрации через плотный фильтр (синяя лента). Для определения обменных соединений ТМ использовалась вытяжка ацетатно-аммонийного буфера (ААБ) с рН 4.8 единиц при соотношении почва : раствор 1:10 [13]. ТМ определялись в полученных вытяжках с помощью метода инверсионной вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе ТА-4 (ТА-Lab, Томск, Россия).

Статистическая обработка, получение уравнений и линий регрессии, модельные

построения интенсивности сорбции ТМ органическим веществом проводилась с использованием пакета программ STATISTICA 10 и Microsoft Excel. Географические координаты мест заложения почвенных разрезов определяли с помощью GPS навигаторов фирмы Garmin.

### Обсуждение результатов

Ежегодное накопление влаги в почвенном покрове под лесополосой приводит к более глубокому промачиванию почвенного профиля, что влияет на основные почвенные свойства, такие как содержание гумуса и значение рН. Увеличение влажности приводит к более глубокому выщелачиванию карбонатного горизонта. В результате линия вскипания в черноземах типичных лесополосы отмечается на уровне 59±2 см, в то время как в черноземах обыкновенных залежного участка карбонаты обнаружены на глубине 46±1 см. Следует отметить эволюционные особенности в карбонатных новообразованиях, так в черноземах обыкновенных довольно ярко представлена белоглазка, в типичных – обилие псевдомицелия в нижней части почвенного профиля.

Реакция среды в верхней части исследуемых почв близкая к нейтральной и не превышает значения 7.1±0.72. На глубине появления карбонатов рН водной вытяжки возрастает до 7.5±0.11, на

Таблица 1. Фракционно-групповой состав гумуса (% от  $C_{\text{общ.}}$ ) черноземов обыкновенных Каменной степи под различными угодьями  
Table 1. The fractional group composition of humus (% of  $C_{\text{total}}$ ) of ordinary chernozems of the Stone steppe under various lands

Глубина, см	Гуминовые кислоты				Фульвокислоты					$\frac{C_{\text{ГК}}}{C_{\text{ФК}}}$	Н.О
	ГК1	ГК2	ГК3	Сумма	ФК1а	ФК1	ФК2	ФК3	Сумма		
Черноземы под лесополосой, n = 10   Chernozems under the forest belt											
0-20	6.2	22.5	10.9	39.6	3.4	6.0	7.8	4.4	21.6	1.8	38.8
20-40	5.6	24.0	11.8	41.4	3.9	5.1	6.4	5.3	20.7	2.0	37.9
Черноземы под залежью, n = 10   Chernozems under fallow											
0-20	4.1	25.5	12.0	41.6	1.3	3.3	8.3	4.2	17.1	2.4	41.3
20-40	3.8	27.1	14.6	45.5	1.8	4.0	8.0	4.0	17.8	2.6	36.7
НСР <sub>05</sub>											
0-20	1.3	1.9	1.3	1.6	1.5	0.9	*	*	1.0	-	1.3
20-40	1.0	1.4	1.2	1.5	1.4	0.9	0.8	1.1	0.9	-	1.4

Примечание: \* –  $F_{\text{факт.}} < F_{05}$ ; Н.О – нерастворимый остаток

уровне залегания почвообразующих пород –  $8.5 \pm 0.31$ . Полученные данные по валовому содержанию органического вещества характеризуют исследуемые черноземы как среднегумусные. При этом в черноземах обыкновенных в верхнем 0-20 см слое его содержание составляет  $7.5 \pm 0.15\%$ . Черноземы типичные под лесополосой характеризуются достоверно большим содержанием гумуса, величина которого достигает  $8.6 \pm 0.11\%$ . При этом следует отметить, что лесная растительность не только способствует накоплению органического вещества, но и его более глубокому проникновению. Так мощность гумусового горизонта А+АВ под залежным участком составляет  $60 \pm 1$  см, под лесополосой достигает  $67 \pm 2$  см. Явление объясняется тем, что в условиях длительного произрастания лесополосы, отмечается регулярное поступление растительного опада на поверхность, отмерших корневых остатков в почвенную толщу и их довольно быстрое превращение в органическое вещество. Достоверное отличие в процентном содержании гумуса оказывает влияние на количественное содержание исследуемых ТМ. Указанная особенность отмечается и в других работах [15].

Общими чертами фракционно-группового состава гумуса исследуемых почв является преобладание в составе гумуса

группы гуминовых кислот над группой фульвокислот. В группе гуминовых кислот преобладает фракция связанная с кальцием (ГК2) (табл. 1).

Отмечено сужение гуматно-фульватного соотношения ( $C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}}$ ) в черноземах под лесными насаждениями. В верхней части гумусового горизонта состав гумуса характеризуется как фульватно-гуматный  $C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}} = 1.8$ . Это обусловлено увеличением в составе гумуса доли фульвокислот при одновременной убыли гуминовых кислот. На залежном участке соотношение  $C_{\text{ГК}}:C_{\text{ФК}}$  более широкое по сравнению с почвами под древесными насаждениями и составляет соответственно 2.4, что характеризует гумус, как гуматный. Это связано с увеличением в составе гумуса почв лесных насаждений доли фульвокислот в составе гумуса.

В группах гумусовых кислот рассматриваемых почв прослеживаются различия. Так в почвах под лесными насаждениями в составе гумуса увеличивается доля подвижной фракции ГК1 (6.2% от  $C_{\text{орг.}}$ ) по сравнению с залежью (4.1% от  $C_{\text{орг.}}$ ). В группе фульвокислот черноземов под лесными полосами существенно увеличивается доля подвижных агрессивных фракций ФК1а и ФК1. Содержание этих фракций составляет соответственно 3.4 и

Таблица 2. Валовое содержание и обменные соединения Pb и Cd в черноземах обыкновенных Каменной степи под различными угодьями (среднее значение  $\pm$  ошибка среднего арифметического)

Table 2. Total content and exchange compounds of Pb and Cd in ordinary chernozems of Kamennaya steppe under various lands (average value  $\pm$  mean error)

Глубина, см	Pb, мг/кг		Подвижность Pb, %	Cd, мг/кг		Подвижность Cd, %
	Валовое содержание	Обменные соединения		Валовое содержание	Обменные соединения	
Черноземы под лесополосой, n = 10						
0-20	20.6 $\pm$ 0.17	3.51 $\pm$ 0.06	17.0	0.31 $\pm$ 0.02	0.12 $\pm$ 0.01	38.7
20-40	18.9 $\pm$ 0.14	3.46 $\pm$ 0.04	18.3	0.30 $\pm$ 0.02	0.11 $\pm$ 0.01	36.7
40-60	17.1 $\pm$ 0.09	3.35 $\pm$ 0.05	19.6	0.28 $\pm$ 0.01	0.10 $\pm$ 0.01	35.7
60-80	14.4 $\pm$ 0.17	3.29 $\pm$ 0.02	22.8	0.24 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	33.3
80-100	12.3 $\pm$ 0.15	3.20 $\pm$ 0.02	26.0	0.22 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.01	31.8
100-120	13.1 $\pm$ 0.08	3.16 $\pm$ 0.02	24.1	0.21 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.02	33.3
Черноземы под залежью, n = 10						
0-20	17.4 $\pm$ 0.21	1.20 $\pm$ 0.05	6.90	0.28 $\pm$ 0.03	0.10 $\pm$ 0.01	35.7
20-40	16.1 $\pm$ 0.20	1.19 $\pm$ 0.04	7.39	0.26 $\pm$ 0.02	0.10 $\pm$ 0.01	38.5
40-60	14.6 $\pm$ 0.16	1.18 $\pm$ 0.04	8.08	0.24 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	37.5
60-80	12.8 $\pm$ 0.13	1.17 $\pm$ 0.03	8.01	0.22 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	40.9
80-100	11.7 $\pm$ 0.11	1.17 $\pm$ 0.02	10.0	0.19 $\pm$ 0.01	0.08 $\pm$ 0.01	42.1
100-120	12.9 $\pm$ 0.10	1.16 $\pm$ 0.02	8.99	0.18 $\pm$ 0.01	0.07 $\pm$ 0.01	38.9
ПДК [15]	100	6		1	0,5	

6.0% от  $C_{орг.}$ , в то время как в почвах залежи содержание фракции ФК1а составляет 1.3% от  $C_{орг.}$ , а ФК1 – 3.3% от  $C_{орг.}$ . Увеличение в составе гумуса подвижных и «агрессивных» фракций фульвокислот может способствовать мобилизации ТМ в почвах под лесными насаждениями в составе подвижных комплексов с органическими соединениями и дальнейшей их профильной миграции к карбонатному геохимическому барьеру. Наибольшее валовое содержание как Pb, так и Cd характерно для верхнего горизонта черноземов типичных под лесополосой (табл. 2).

Явление можно объяснить синтезом адсорбционных органо-минеральных комплексов, которые образуются благодаря полимеризации растворимых соединений на поверхности минеральной части почв при участии иммобилизованных оксидов [17]. Необходимыми условиями протекания данного процесса являются одновременное присутствие аэробных условий и достаточное увлажнение,

наличие которых отмечается под лесополосой. Вниз по почвенному профилю происходит постепенное снижение валового содержания ТМ, в почвообразующей породе вновь отмечается некоторое повышение количества ТМ. Почвообразующие породы региона обогащены многими редкими и акцессорными минералами, содержащими ТМ. Кроме того, карбонатность почвообразующих пород обуславливает наличие дополнительного геохимического барьера на пути миграции ТМ.

Процент, который составляют обменные соединения ТМ от валового содержания элементов, дает представление о подвижности и доступности элемента, растительным и живым организмам. Так, степень подвижности свинца колеблется в пределах от 6.9 до 26%, кадмия – 31.8 до 42.1%. Данный показатель определяется интенсивностью удержания металлов прежде всего органическим веществом, кроме того, на сорбцию ТМ влияет

значение рН и процент содержания илистой фракции. В целом показатель – обменные соединения элементов показывает, насколько металлы являются подвижными и доступными растительным организмам. Имея представление о данной форме соединений ТМ можно судить о дальнейшей их миграции в сопредельные среды. Поэтому полученные данные позволяют судить об экологической ситуации и прогнозировать возможные экологические риски [13]. Согласно полученным данным, для кадмия характерна довольно высокая степень подвижности, что делает элемент очень миграционно-способным. Исходя из этого, крайне важным является исследование сорбционных свойств ГК и гумуса в целом.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что длительное произрастание лесных полос оказывает воздействие не только на морфологические признаки исследуемых почв, изменяются многие физические, физико-химические и химические характеристики, в том числе и в гумусовом состоянии черноземов. Гуминовые вещества представляют собой высокодисперсные коллоидные системы, наиболее важными свойствами, которых являются большая площадь поверхности с высокими поверхностно-активными свойствами.

Отмечается синтез адсорбционных органо-минеральных комплексов с участием исследуемых ТМ, в результате чего наибольшее количество как Pb, так и Cd приурочено к верхней гумусовой толще исследуемых почв. Протеканию данного

процесса сопутствуют уникальные условия, созданные в черноземных почвах, а именно – аэробные условия и достаточное увлажнение. Вниз по почвенному профилю черноземов всех исследуемых угодий происходит постепенное снижение валового содержания ТМ, далее в почвообразующей породе, которая выступает геохимическим барьером на пути миграции ТМ, вновь отмечается некоторое повышение количества Pb и Cd. В составе валового содержания, обязательно присутствуют более подвижные и доступные растительным организмам, мобильные формы ТМ. Исследуемые нами обменные формы Pb и Cd, а также полученный процент их подвижности, свидетельствуют о довольно высокой мобильности и миграционной способности Cd. Результаты могут послужить для прогнозирования загрязнения, его предотвращения, а также восстановления уже загрязненных территорий. Увеличение подвижных продуктов гумусового синтеза (подвижных фульвокислот) в почвах под лесной полосой способствует большей мобилизации ТМ в составе подвижных комплексов с органическими соединениями и дальнейшей их профильной миграции к карбонатному геохимическому барьеру, по сравнению с почвой залежного участка, где подвижность ТМ резко снижается.

### 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.

### Список литературы/References

1. Perelomov L., Sarkar B., Pinsky D., Atroshchenko Y., Perelomova I., Mukhtorov L., Mazur A. Trace element adsorption by natural and chemically modified humic acids. *Environ Geochem Health*. 2021; 43:

127-138. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00686-0>.

2. Mironov A.A. Vtorichnaja struktura makromolekuly guminovykh kislot. *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2005; 1: 21-23. (In Russ.)

3. Selemenev V.F., Rudakov O.B., Slavinskaja G.V., Drozdova N.V. Pigmenty



pishhevyh proizvodstv (melanoidiny). M.: DeLi print. 2008. 246 p. (In Russ.)

4. Liu X.P., Bi Q.F., Qiu L.L., Li K.J., Yang X.R., Lin X.Y. Increased risk of phosphorus and metal leaching from paddy soils after excessive manure application: Insights from a mesocosm study. *Science of the Total Environment*. 2019; 666: 778-785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.072>

5. Wang Y., Zhang X., Zhang X., Meng Q., Gao F., Zhang Y. Characterization of spectral responses of dissolved organic matter (DOM) for atrazine binding during the sorption process onto black soil. *Chemosphere*. 2017; 180: 531-539. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.063>

6. Zamulina I.V., Gorovtsov A.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Bauer T.V. Soil organic matter and biological activity under long-term contamination with copper. *Environ Geochem Health*. 2022; 44: 387-398. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01044-4>

7. 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>.

8. Akinwole P., Kaplan L., Findlay R. Elucidating stream bacteria utilizing terrestrial dissolved organic matter. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2021; 37: 32. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-02997-5>

9. Chizhikova N.P., Hitrov N.B., Samsonova A.A., Varlamov E.B., Churilin N.A., Rogovneva L.V., Cheverdin Ju.I. Mineraly trehkomponentnoj pjatnistosti agrochernozemov Kamennoj stepi. *Pochvovedenie*. 2017; 4: 468-482. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17020022> (In Russ.)

10. SHCHeglov D.I., Gromovik A.I., Gorbunova N.S. Osnovy himicheskogo analiza. Voronezh: VGU. 2019: 332 p. (In Russ.)

11. Plehanova I.O., Zolotareva O.A. Jekologicheskoe normirovanie sostojanija pochv, zagrzaznennyh tjazhelymi metallami. *Agrohimiya*. 2020; 10: 79-88. <https://doi.org/10.31857/S0002188120100099> (In Russ.)

12. Chernova O.V., Bezuglova O.S. Use of background concentrations of heavy metals for regional monitoring of soil contamination by the example of Rostov oblast. *Eurasian Soil Sci*. 2019; 52(8): 1007. <https://doi.org/10.1134/S1064229319080040>

13. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Bauer T.V., Sushkova S.N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil. *MethodsX*. 2018; 5: 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>

14. Vodyanitskii Y., Minkina T., Bauer T. Method for calculation the selectivity of reagents extracting heavy metals mobile compounds from soil. *Applied Geochemistry*. 2020; 116: 104570. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104570>.

15. Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu E., Khusro A., Abubakr M. I., Khandaker M. U., Osman H., Alhumaydhi F. A., Simal-Gandara J. Impact of heavy metals on the environment and human health: *Novel therapeutic insights to counter the toxicity Journal of King Saud University – Science*. 2022: 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>

16. Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Devjatova T.A., Cherepuhina I.V. Zagrzaznenie pochv. Sposoby kontrolja i normirovanija. Voronezh: VGU. 2022: 81 p.

17. Martynova N.A. Himija pochv: organicheskoe veshhestvo pochv. M.: MGU. 2011: 255 p. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

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

**N.S. Gorbunova** – PhD, associate professor, Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [vilian@list.ru](mailto:vilian@list.ru)



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

**Т.А. Девятова** – д.б.н., профессор, зав. 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, Russian Federation, e-mail: [agrom.ps@mail.ru](mailto:agrom.ps@mail.ru)

**T.A. Devyatova** – Doctor Sci(Bio), professor, Head. Department of ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: [devyatova.eco@gmail.com](mailto:devyatova.eco@gmail.com)

*Статья поступила в редакцию 20.03.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 05.06.2024.*

*The article was submitted 20.03.2024; approved after reviewing 03.06.2024; accepted for publication 05.06.2024.*