Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 358-368.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 358-368.

ISSN 1680-0613

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья
УДК 631.4
doi: 10.17308/sorpchrom.2026.26/14183

Современное состояние проблемы сорбционных свойств почв на примере взаимодействий элементарных почвенных частиц в отношении к органическому веществу почв и ионам тяжелых металлов

Надежда Сергеевна Горбунова ✉, Аркадий Игоревич Громовик, Татьяна Анатольевна Девятова, Владимир Фёдорович Селеменев, Виктор Николаевич Семенов

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, vilian@list.ru✉

Аннотация. Элементарные почвенные частицы размером менее 0.01 мм и гумус играют ведущую роль в процессах сорбции различных элементов, в том числе и ионов тяжелых металлов – Pb^{2+} и Cd^{2+}, являющихся канцерогенными. При современном уровне техногенной нагрузки на окружающую среду данное свойство почв приобретает все большее значение. В дальнейшем процесс самоочищения почв можно применять и к другим объектам. Цель исследований – выявить особенности сорбции ионов тяжелых металлов – Pb^{2+} и Cd^{2+} органическим веществом почв и илистой фракцией черноземов, а также установить влияние особенностей профильного распределения элементарных почвенных частиц (ЭПЧ)<0.01 мм на миграцию гумуса и ионов тяжелых металлов.

В задачи входило: изучение особенностей морфологического строения черноземов выщелоченных различной степени гумусированности, имеющих широкий диапазон процентного содержания элементарных почвенных частиц размером менее 0.01 мм, что отразилось на их довольно разнообразном гранулометрическом составе; лабораторно-аналитические исследования направленные на определение сорбционных свойств элементарных почвенных частиц размером менее 0.01 мм по отношению к гумусу и валовому содержанию ионов тяжелых металлов – Pb^{2+} и Cd^{2+}; выявление закономерностей распределения ионов тяжелых металлов и гумуса в черноземах различного гранулометрического состава.

Полученные данные свидетельствуют, что при увеличении элементарных почвенных частиц размером менее 0.01 мм происходит увеличение сорбционной способности черноземов к гумусу и ионам тяжелым металлам – Pb^{2+} и Cd^{2+}. Результатами модельного эксперимента подтвердились теоретические предположения о влиянии размера частиц на валовое содержание ионов тяжелых металлов – Pb^{2+} и Cd^{2+} и гумуса. Минимальные сорбционные способности характерных для черноземов выщелоченных супесчаных, в которых содержание тонкодисперсной фракции размером менее 0.01 мм не превышает 20%. Максимальные сорбционные способности диагностированы в глинистых разновидностях черноземов выщелоченных, с содержанием ЭПЧ менее 0.01 мм более 60%. Гумусовые вещества способны сорбироваться и прочно удерживаться илистой и коллоидной фракцией исследуемых почв, причем максимальное накопление гумуса (более 7%) было зафиксировано в глинистых черноземах, обогащенных тонкодисперсной фракцией, размерном менее 0.01 мм. Различное процентное содержание физической глины повлияло не только на выявление разновидностей и видов черноземов (в том числе и по мощности гумусового горизонта, но и на валовое содержание исследуемых ионов переходных металлов. Полученные данные могут служить основанием для проектировки мер защиты окружающей среды от загрязнения ее тяжелыми металлами.

Ключевые слова: сорбция, тонкодисперсная фракция, гумус, черноземы выщелоченные, ионы тяжелых металлов, свинец, кадмий.

Для цитирования: Горбунова Н.С., Громовик А.И., Девятова Т.А., Селеменев В.Ф., Семенов В.Н. Современное состояние проблемы сорбционных свойств почв на примере взаимодействий элементарных почвенных частиц в отношении к органическому веществу почв и ионам тяжелых металлов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2026. Т. 26, № 2. С. 358-368. https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14183

© Горбунова Н. С., Громовик А. И., Девятова Т. А., Селеменев В. Ф., Семенов В. Н., 2026

Сорбционные и хроматографические процессы. 2026. Т. 26, № 2. С. 358-368.
Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy. 2026. Vol. 26, No 2. pp. 358-368.

ISSN 1680-0613

Original article

Current state of the problem of soil sorption properties as illustrated by interactions of elementary soil particles with soil organic matte and heavy metals

Nadezhda S. Gorbunova✉, Arkady I. Gromovik, Tatyana A. Devyatova, Vladimir F. Selemenev, Victor N. Semenov

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, vilian@list.ru✉

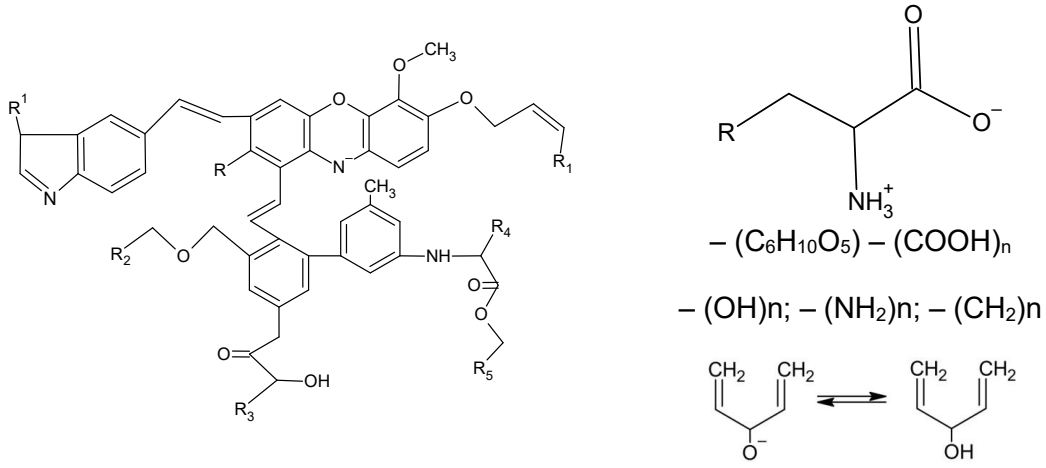
Abstract. Elementary soil particles smaller than 0.01 mm in size and humus play a leading role in the sorption of various elements, including heavy metal ions – Pb^{2+} and Cd^{2+}, which are carcinogenic. Given the current level of anthropogenic impact on the environment, this soil property is becoming increasingly important. In the future, the soil self-purification process can be applied to other objects. The aim of this study was to identify the sorption characteristics of heavy metal ions – Pb^{2+} and Cd^{2+} – by soil organic matter and the clay fraction of chernozems, as well as to establish the influence of the profile distribution characteristics of elementary soil particles (ESP)<0.01 mm on the migration of humus and heavy metal ions. The objectives included: studying the morphological structure of leached chernozems with varying degrees of humification, with a wide range of percentages of elementary soil particles smaller than 0.01 mm, which is reflected in their rather diverse particle size distribution; Laboratory and analytical studies aimed at determining the sorption properties of elementary soil particles smaller than 0.01 mm in size for humus and the total content of heavy metal ions – Pb^{2+} and Cd^{2+}; identifying patterns in the distribution of heavy metal ions and humus in chernozems of different particle sizes. The obtained data indicate that with an increase in elementary soil particles smaller than 0.01 mm, the sorption capacity of chernozems for humus and heavy metal ions – Pb^{2+} and Cd^{2+} – increases. The results of the model experiment confirmed theoretical assumptions about the influence of particle size on the total content of heavy metals – Pb^{2+} and Cd^{2+} – and humus. The minimum sorption capacities are typical of leached sandy loam chernozems, in which the content of the fine fraction smaller than 0.01 mm does not exceed 20%. Maximum sorption capacities were detected in clayey varieties of leached chernozems, with a fine-grained particle size (less than 0.01 mm) content of over 60%. Humic substances are capable of being sorbed and firmly retained by the silt and colloidal fractions of the studied soils, with maximum humus accumulation (over 7%) recorded in clayey chernozems enriched with a fine-grained particle size (less than 0.01 mm). Varying percentages of physical clay influenced not only the identification of chernozem varieties and types (including the thickness of the humus horizon), but also the total content of the studied transition metal ions. The obtained data can serve as a basis for designing measures to protect the environment from heavy metal pollution.

Keywords: sorption, fine fraction, humus, leached chernozems, heavy metal ions, lead, cadmium.

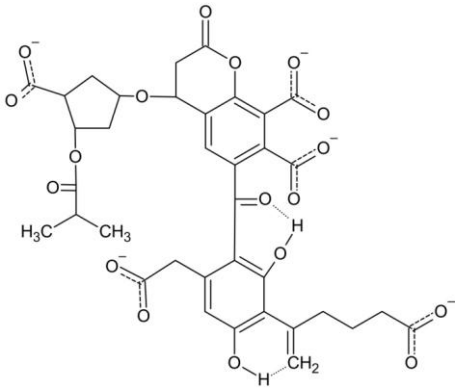
For citation: Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Devyatova T.A., Selemenev V.F., Semenov V.N. The current state of the problem of sorption properties of soils using the example of interactions of elementary soil particles in relation to soil organic matter and heavy metal ions. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2026. 26(2): 358-368. (In Russ.). https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2026.26/14183

Введение

Согласно многочисленным данным, отмечается высокая адсорбционная способность глинистых минералов и чернозёмов по отношению к ионам тяжелых металлов [1-9]. Гранулометрический состав черноземов характеризуется преобладанием частиц, обладающих высокой удельной поверхностью, а также высокой дисперсностью, в результате чего для них характерна хорошая адсорбция по отношению к ионам тяжелых металлов [10-13]. Следует отметить, что элементарные почвенные частицы размером <0.01 мм играют ведущую роль в повышении гумусированности почв [2-9]. Если принимать во внимание, что не до конца исследуемая структура гуминовых кислот (рис. 1) обогащена карбоксильными функциональными группами, фенольными группами, содержащими амидный и гетероциклический азот, то следует ожидать высокой реакционной способности и сорбирующих свойств по отношению к ионам тяжелых металлов. Описанные сорбционные свойства элементарных почвенных частиц размером <0.01 мм и гумусовых веществ можно использовать



(1-а)



(1-в)

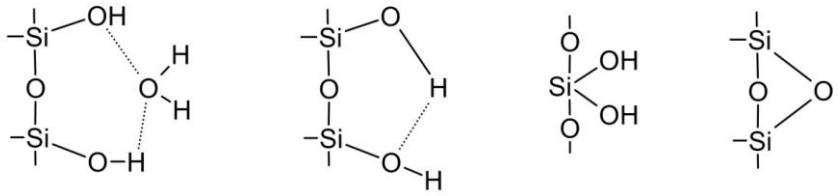
Рис. 1. Структурные ячейки гуминовых кислот (фульвокислот) с негидролизуемой частью (а) по Д.С. Орлову [16]; гидролизуемой частью (б) по Г.В. Славицкой, В.Ф. Селеменеву [17] и гидролизуемой частью (в) по Ж.А. Леенеру [18].

Fig. 1. Structural cells of humic acids (fulvic acids) with a non-hydrolyzable part (a) according to D.S. Orlov [16]; a hydrolyzable part (b) according to G.V. Slavitskaya, V.F. Selemenev [17] and a hydrolyzable part (c) according to J.A. Leener [18].

в решении проблемы снижения уровня загрязнения почв тяжелыми металлами [14-15].

Авторами [17] установлено три типа функциональных групп в гуматах, имеющих $pK_a(1)=4.3$; $pK_a(2)=8.0$ и $pK_a(3)=9.5$. Их можно отнести к процессам протолиза карбоксильных, фенольных и аминогрупп соответственно. Приведенные на рисунке 1 структурные фрагменты могут вступать во взаимодействие с ионами металлов, образуя ионные, дативные и/или донорно-акцепторные (координационные) связи [18, 21].

Одним из компонентов глинистых минералов является монтмориллонит, состав которого соответствует формуле – $Na_{0,62}[(Al_{3,33}Mg_{0,67})Si_8O_{20}]\cdot nH_2O$ [18, 22]. Монтмориллонит (смектит) представляет собой глинистый слоистый материал, имеющий соотношение слоев 2:1. Данное соотношение означает, что два тетраэдрических кремнекислородных слоя покрывают с двух сторон октаэдрический алюмогидроксидный слой. Примерно



(а) (б) (в) (г)

Схема 1. Свободные силанольные (а); геминальные (парные) силанольные (б); вициальные (соседние) силанольные (в); силоксановые (г) группы.

Scheme 1. Free silanol (a); geminal (paired) silanol (b); vicial (adjacent) silanol (c); siloxane (g) groups.

расстояние между тетраэдрическими слоями и приводя к набуханию глины.

Поверхность тетраэдрических кремнекислородных слоев содержит силанольные и силоксановые группы, представленные на схеме 1.

Свободные силанольные (а); геминальные (парные) силанольные (б); вициальные (соседние) силанольные (в); группы обладают протоноакцепторными свойствами (pKa=6.0-6.8); действуют как доноры протонов и функционируют как слабокислотные ионообменники [17, 22]. Следовательно, силанольные группы в глинистых слоях (наряду с фрагментами гуминовых кислот) могут взаимодействовать с ионами металлов, образуя ионные ассоциаты и/или хелатные комплексы [21].

Цель: выявить особенности сорбции ионов Pb^{2+} и Cd^{2+} органическим веществом почв и илистой фракцией черноземов, а также установить особенности профильного распределения ионов тяжелых металлов в зависимости от содержания гумуса и размера элементарных почвенных частиц.

Экспериментальная часть

Исследования сорбционной способности гумуса и элементарных почвенных частиц (ЭПЧ) <0.01 мм к ионам тяжелых металлов – Pb^{2+} и Cd^{2+} осуществлялись на выровненных водораздельных пространствах крупных орографических структур – Окско-Донской низменности и Среднерусской возвышенности. На хорошо дренированных участках закладывались мусными и среднегумусными. Лабораторно-аналитические исследования были применены для установления разновидности почв, а именно для определения гранулометрического состава почв с помощью процентного содержания элементарных почвенных частиц размером менее 0.01 мм. Определение проводили классическим пипет-методом по Качинскому, согласно которому были выделены супесчаные, легкосуглинистые, среднесуглинистые, тяжелосуглинистые и глинистые разновидности черноземов выщелоченных.

Из заложенных почвенных разрезов, вскрывающих почвообразующую породу, в 6-ти кратной повторности (n=6) послойно (каждые 10 см) были отобраны почвенные образцы. В образцах определялся общий углерод методом Тюрина в модификации Симакова; вычисление массовой доли гумуса в почве (в %) производили путем умножения полученной массовой доли углерода органических соединений, выраженной в процентах, на коэффициент равный 1.724. Определение валового содержания ионов тяжелых металлов Pb^{2+} и Cd^{2+} проводили по следующей методике. Почву предварительно озоляли в муфельной печи при температуре 505ºС в течение 3 часов. 5 г. прокаленной почвы помещали в сухую коническую термостойкую колбу вместимостью 100 $см^3$. Приливали азотную кислоту HNO_3 1:1 и кипятили 10 минут. Охлаждали и приливали концентрированную перекись водорода H_2O_2 (конц.), кипятили 10 минут. Охлаждали, фильтровали

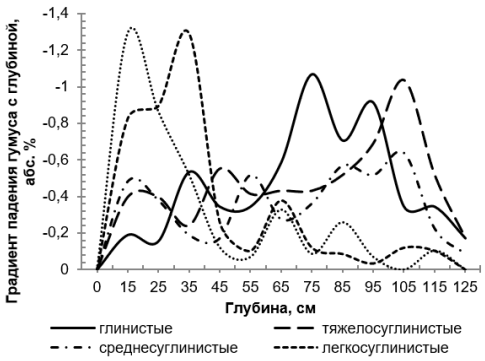


Рис. 2. Профильное распределение градиента падения гумуса в черноземах выщелоченных разного гранулометрического состава.

Fig. 2. Profile distribution of the humus gradient in leached chernozems of different granulometric composition.

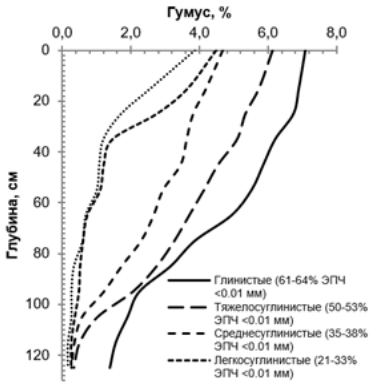


Рис. 3. Особенности профильного распределения гумуса в черноземах выщелоченных имеющих различный гранулометрический состав.

Fig. 3. Features of the profile distribution of humus in leached chernozems with different granulometric composition.

через плотный фильтр (синяя лента). Фильтрат помещали в мерную колбу на 50 мл, объем доводили до метки дистиллированной водой. Содержание металлов в почвенных вытяжках определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометре КВАНТ.Z-ЭТА. Построение графиком, статистическая обработка полученных данных, а также построение модельных экспериментов проводилось с применением пакета анализа программы Microsoft Excel 2010.

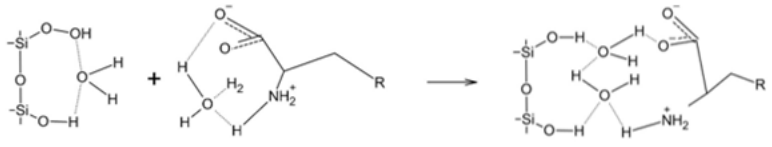
Помимо традиционных графиков распределения элементов и веществ в профиле почв, в данном исследовании применяюли графики изменения градиентов, анализ которых позволяет более детально дать анализ внутрипрофильного распределения, что позволяет детализировать профильное распределение вещества в черноземах. Резко выраженные пики могут свидетельствовать о высокой мобилизационной способности элементов и веществ.

Обсуждение результатов

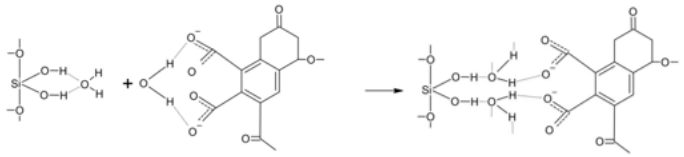
Согласно полученным данным, изучаемые черноземы выщелоченные имеют довольно разнообразный гранулометрический состав, который определяется процентным количеством элементарных почвенных частиц размером менее 0.01 мм. Максимальное процентное содержание ЭПЧ <0.01 мм достигает 65% и свидетельствуют о глинистом гранулометрическом составе почв. При таком процентном содержании тонкодисперсной фракции количество гумуса в среднем составляет 7.1%, черноземы диагностируются как среднегумусные. Следует отметить, что изучаемые черноземы выщелоченные среднегумусные глинистые имеют довольно мощную гумусовую толщу, которая достигает метра, что относит почвы к мощным видам (рис. 2-3).

Снижение тонкодисперсной фракции в почвенном профиле влечет за собой уменьшение процентного содержания гумуса, отмечается сокращение толщины гумусового горизонта. Так, согласно полученным данным в черноземах среднесуглинистых среднее количество тонкодисперсных частиц составляет 37%, а содержание гумуса не превышает 4.7%, что характеризует черноземы как малогумусные. Толщина гумусового горизонта в них не превышает 80 см и черноземы выщелоченные диагностируются как среднемощные.

В ходе процесса почвообразования, под влиянием естественных и антропогенных фактором может происходить дальнейшее снижение ЭПЧ в среднем до



(2-а)



(2-б)

Схема 2. Образование гидроксоассоциатов.
Scheme 2. Formation of hydroxy associates.

20%, что отмечается и в нашем случае, а черноземы трансформируются в легкосуглинистые и супесчанные, при этом содержание гумуса снижается до 4.5% в черноземах легкосуглинистых и до 3.8% в супесчанных, что определяет почвы как малогумусные и слабогумусированные виды соответственно. Наряду со снижением процентного содержания гумуса отмечается снижение мощности гумусового горизонта.

Приведенные данные, показывающие изменение гранулометрического состава от глинистого до супесчаного симбатно снижению содержания в черноземах ЭПЧ <0.01 мм (фракция физической глины), а также снижению содержания гумусовых веществ. На схемах 2-а и 2-б представлены возможные варианты фиксации гуматов на силанольных группировках увлажнённых глинистых минералов.

Приведенные взаимодействия приводят к образованию гидроксоассоциатов (за счет водородных связей). Данные системы «силанольные фрагменты глин + H_2O + фрагменты гуматов» следует отнести к супрамолекулярным системам [18, 22].

Широкий диапазон полученных данных содержания частиц размером менее 0.01 мм оказывает влияние как на процентное содержание гумуса, так и на характер его профильного распределения, а также глубину проникновения компонентов гумуса (мощность гумусовой толщи) на рис. 2 и 3.

Исходя из графических данных рис. 2, черноземы имеют довольно неоднородное распределение градиентов падения. Согласно рис. 2, в средне-, тяжелосуглинистых и глинистых разновидностях черноземов максимальные градиенты падения гумуса отмечаются с глубины 50 см, а после глубины 100 см они постепенно снижаются. Иное распределение градиентов падения гумуса отмечается в черноземах легкосуглинистых и супесчаных. Максимальные пики градиентов характерны на глубинах 15 см в супесчаных почвах и 35 см в легкосуглинистых, далее на глубине градиенты постепенно снижаются и кривые выравниваются, приобретая волнообразный характер (рис. 2). В данном случае отмечается отсутствие интенсивной сорбции гумусовых веществ, поскольку для верхней части органопрофиля характерно низкое содержанием тонких высокодисперсных фракций частиц. При наличии в черноземах высокого содержания ЭПЧ <0.01 мм, кривые градиента падения гумуса приобретают волнообразный вид в верхнем 50 см слое почв, для этих же слоев характерно максимальное накопление гумуса. Отмеченные особенности профильного распределения гумуса не нарушают общую тенденцию, характерную для всех разновидностей черноземов – аккумулятивный тип профильного распределения гумуса (рис. 3). При этом черноземы глинистые характеризуются прогрессивно-аккумулятивным типом распределения гумуса до слоя

S-хелат > S^{2-} > N-хелат > I^- > Br^- > Cl^- ≈ NH_3 > OH^- > H_2O
Схема 3. Убывающий ряд устойчивости хелатных соединений.
Scheme 3. Decreasing order of stability of chelate compounds.

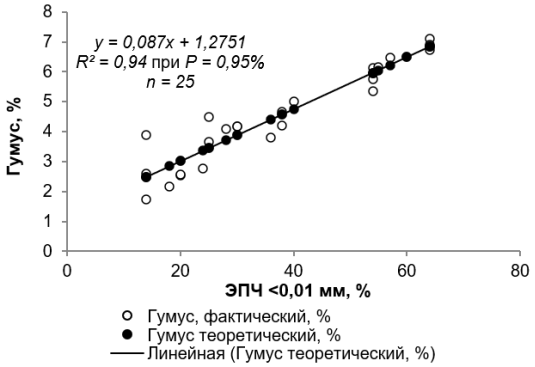


Рис. 4. Сорбционные взаимодействия между количественным содержанием гумуса и процентной долей ЭПЧ < 0.01 мм.
Fig. 4. Sorption interactions between the quantitative content of humus and the percentage of ESP < 0.01 mm.

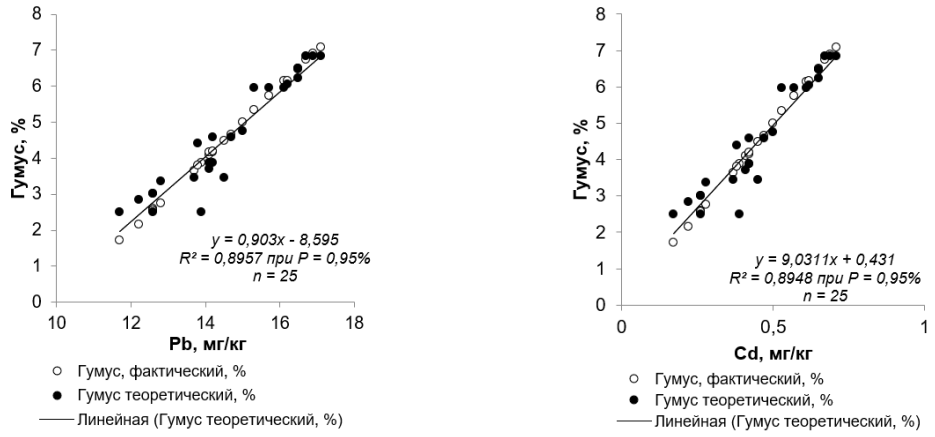
100 см, а глубже тип распределения равномерно-аккумулятивный (рис. 3).

Для тяжелосуглинистых черноземов характерен аккумулятивный вид кривой с незначительным прогрессивным характером до уровня 40 см, далее распределение равномерно-аккумулятивное, а глубже 100 см, кривая гумусового распределения приобретает черты регрессивности. Для среднесуглинистых черноземов характерно равномерно-аккумулятивное распределение гумуса. Легкосуглинистые и супесчаные разновидности черноземов выщелоченных характеризуются регрессивно-аккумулятивный типом распределения до глубины 35-40 см, а ниже – равномерно-аккумулятивным. При этом кривые распределения градиентов падения содержания гумуса с глубиной незначительны, и располагаются практически под прямым углом к оси ОХ, несмотря на низкое содержание гумуса (рис. 3). Это явление связано с постепенной миграцией гумусовых веществ в более глубокие почвенные слои с нисходящими токами влаги благодаря тому, что легкие по гранулометрическому составу почвы имеют крупные ЭПЧ (более 0.01 мм) не способные к сорбции гуматов.

Таким образом, по мере уменьшения содержания тонкодисперсной фракции почв, размером менее 0.01 мм в черноземах выщелоченных отмечается снижение процентного содержания гумуса, снижение мощности гумусовой толщи. Следует отметить, что реакции, приведенные на схеме 2, в наименьшей степени характерны для супесчанных чернозёмов, в которых имеется значительное количество кристаллического оксида Si (кварца) SiO_2 [18].

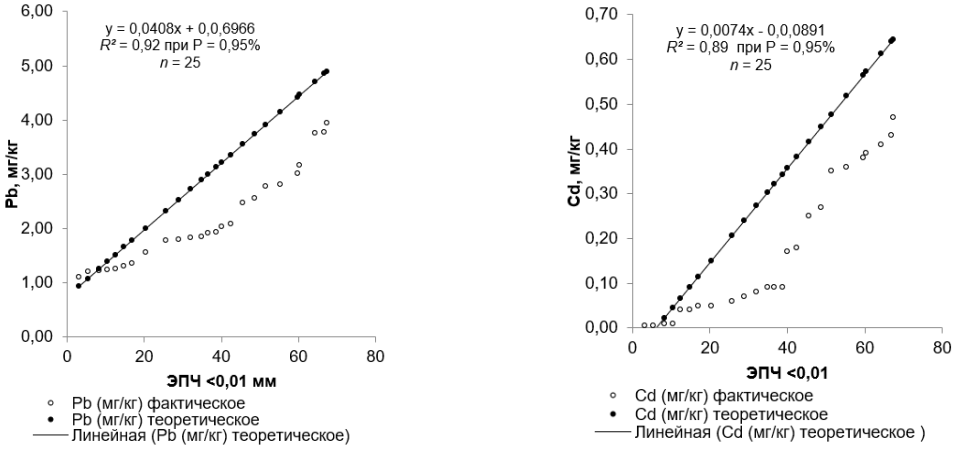
Следующим этапом исследований явилось установление особенностей «закрепления» (сорбции) ионов Pb^{2+} и Cd^{2+} гумусом и тонкодисперсной фракцией почв. Подчеркнём, что данные катионы следует рассматривать как кислоты Льюиса (Б-катионы), относящиеся (по Пирсону) к «мягким» кислотам [21]. Все Б-катионы (в том числе Pb^{2+} и Cd^{2+}) образуют с хелатообразующими реагентами (полиоксисоединениями; карбонильными C=O-группами; поликарбоновыми кислотами; H_2O; OH^-; лигандами, где S и N являются донорными атомами) прочные хелаты, которые по устойчивости располагаются в ряд [21] (схема 3).

Поэтому ионы Pb^{2+} и Cd^{2+} способны прочно закрепляться в чернозёмных почвах за счет образования хелатов с функ-



а б

Рис. 5. Зависимость сорбции ионов тяжелых металлов от процентного содержания гумуса.
Fig. 5. Dependence of sorption of heavy metal ions on the percentage content of humus.



а) б)

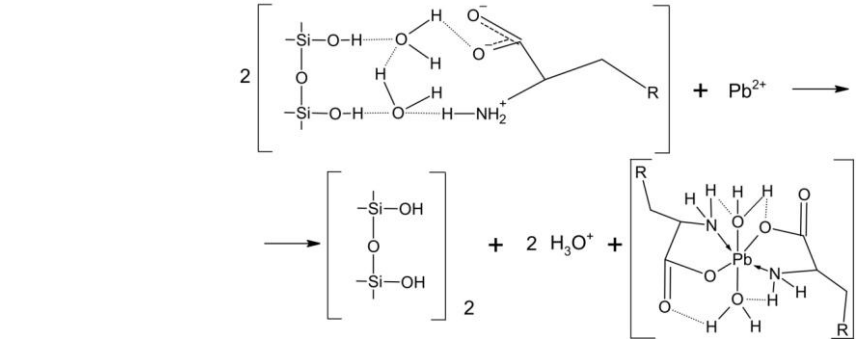
Рис. 6. Зависимость сорбции ионов тяжелых металлов от содержания в почве ЭПЧ <0.01 мм.
Fig. 6. Dependence of sorption of heavy metal ions on the content of ESP <0.01 mm in the soil.

циональными группами гуминовых кислот и/или гидроксокомплексов с силанольными группировками коллоидных почвенных частиц [10-13].

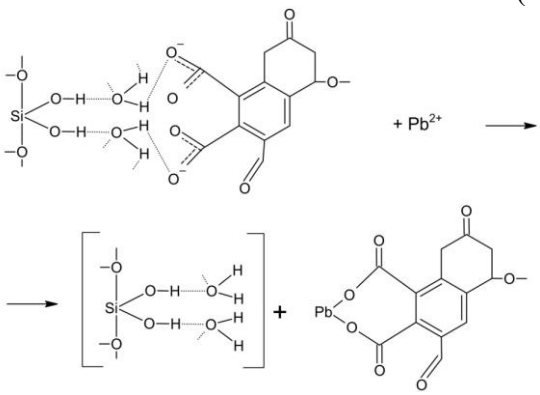
Для подтверждения закономерности зависимостей сорбции тяжелых металлов гумусом и тонкодисперсной фракцией почв был осуществлен эксперимент, с высоким объемом выборки (n=25). Предварительно в лабораторных условиях, была выделена тонкодисперсная фракция – частицы менее 0.01 мм и определен ее процент. Далее во фракции были проведены определения валового содержания ионов тяжелых металлов – Pb^{2+}, Cd^{2+} и гумуса. Данные эксперимента выявили тесную корреляционную зависимость между процентным содержанием гумуса и физической глиной (рис. 4), а также между валовым содержанием ионов Pb^{2+} и Cd^{2+}, гумусом (рис. 5 а, б) и тонкодисперсной фракцией почв (рис. 6 а, б).

Возможные варианты сорбционного поглощения ионов Pb^{2+} и Cd^{2+} ассоциатами «глина + H_2O + гумат» приведены на схемах (4-а) и (4-б).

Для сорбции Cd^{2+} схема (4-а) также справедлива. Образование ионного ассоциата Pb^{2+} с фрагментом гуминовых кислот (схема 1-в) объясняется тем, что по отношению к кислородсодержащим анионам, катионы Pb^{2+} ведут себя подобно катионам щёлочноземельных металлов (то



(4-а)



(4-б)

Схема 4. Возможные варианты поглощения ионов Pb^{2+} и Cd^{2+}.
Scheme 4. Possible options for the absorption of Pb^{2+} and Cd^{2+} ions.

есть подобно А-катионам) [21]. Даная аномалия не является характерной для катионов Cd^{2+}. Это обстоятельство объясняет факт большего сродства Pb^{2+} к гуминовым кислотам по сравнению с Cd^{2+} [13].

Данные модельного эксперимента подтверждают зависимость сорбции Pb^{2+} и Cd^{2+} гумусом и частицами размером менее 0.01 мм. Чем больше содержания доли тонкой фракции в составе ЭПЧ почв, тем выше сорбционная способность черноземов в отношении органического вещества, гумуса и изучаемых ионов тяжелых металлов Pb^{2+} и Cd^{2+}. В ЭПЧ <0.01 мм преобладают вторичные глинистые минералы, структуры и строение которых предполагает встраивание в них гумусовых веществ и ионов тяжелых металлов, в том числе Pb^{2+} и Cd^{2+}. При «облегчении» гранулометрического состава черноземов отмечается уменьшение процентного содержания ЭПЧ <0.01, что приводит к снижению органического вещества и гумуса в почвах, а также к снижению содержания ионов тяжелых металлов, которые переходят в подвижные и обменные формы соединений и мигрируют по почвенному профилю. В результате этого может происходить загрязнение сопредельных сред.

Заключение

Согласно полученным данным при увеличении содержания ЭПЧ размером менее 0.01 мм в черноземах выщелоченных возрастает сорбционная способность почв по отношению к гумусу и ионов тяжелых металлов Pb^{2+} и Cd^{2+}. Отмечается рост содержания ЭПЧ<0.01 мм в черноземах от супесчаного до глинистых разновидностях. В этом же направлении увеличивается сорбционная способность илистой фракции к органическому веществу почв (степень гумусированности возрастает от слабогумусированных и малогумусных до среднегумусных). Благодаря росту илистой фракции происходит увеличение мощности гумусовой толщи (от 22 до 100 см) и валового содержания

ионов тяжелых металлов Pb^{2+} и Cd^{2+}. В свою очередь, комплексное взаимодействие ионов тяжелых металлов с илистой фракции при высоком содержании гумуса приводит элементы к иммобилизации в почвенном профиле.

Согласно полученным графикам распределения градиентов падения были определены типы органопрофиля исследуемых разновидностей черноземов выщелоченных. Изучаемые почвы тяжелосуглинистого и глинистого гранулометрического состава имеют прогрессивно-аккумулятивный органопрофиль. Черноземы среднесуглинистые – равномерно-аккумулятивный с незначительными признаками прогрессивности. В почвах легкосуглинистого и супесчаного гранулометрического состава отмечается равномерно-аккумулятивное распределение гумуса, что связано с миграцией гумуса с нисходящими потоками влаги в почвах с низким содержанием ЭПЧ<0.01 мм. Крупные ЭПЧ не способны сорбировать и удерживать продукты гумусового синтеза, а также ионы тяжелых металлов. Поэтому в почвах легкого гранулометрического состава необходимо осуществлять регулярные мониторинговые исследования с целью контроля содержания в них ионов тяжелых металлов, для предотвращения миграции загрязняющих элементов в сопредельные среды.

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. Kanigina O.N., Kushnareva O.P., Babicheva V.A., Lyalyukova T.O., Salaveva V.A. *Sorbtsionnie i khromatograficheskie protsessy.* 2024; 24(4): 530-541. https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12411. (In Russ.)

2. Piccolo A., Mbagwu J.S.C. *Plant Soil*. 1990; 123: 27-37.

3. Blair G.J., Lefroy R.D.B., Singh B.P., Till A.R. *Driven by nature: Plant litter quality and decomposition*. 1997; 273-282.

4. Tarchitzky J., Hatcher P.G., Chen J. *Soil Sci.* 2000; 165: 328-342.

5. Laird D.A., Martens D.A., Kingery W.L. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2001; 65(5): 1413-1418.

6. Chefetz B., Tarchitzcy J., Deshmukh A.P. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002; 66(1): 129-141.

7. Arthur E., de Jonge L.W., Tuller M., Moldrup P. *European Journal of Soil Science*. 2020; 71(2): 204-214. https://doi.org/10.1111/ejss.12853.

8. Olayemi O.P., Wallenstein M.D., Kallenbach C.M. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022; 164: 108494. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108494.

9. Startsev V.V., Khaydapova D.D., Degteva S.V., Dymov A.A.*Geoderma*. 2020; 361. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114006 EDN: VKWJTO.

10. 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., Kızılkaya R. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2022; 11(1): 43-60. https://doi.org/10.18393/EJSS.990605

11. Yakovets L. *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

12. Sabitova A.N., Bayakhmetova B.B., Mussabayeva B.Kh., Orazhanova L.K., Ganiyeva K.G. *Bulletin of the Karaganda University. Chemistry Series.* 2020; 99(3): 88-98. https://doi.org/10.31489/2020Ch3/88-98.

13. Gromovik A.I., Gorbunova N.S. *Sorbtsionnie i khromatograficheskie protsessy*. 2022; 22(6): 877-884. https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10894. (In Russ.)

14. Liu X.P., Bi Q.F., Qiu L.L., Li K.J., Yang X.R., Lin X.Y. *Science of the Total Environment*. 2019; 666: 778-785. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.072.

15. Wang Y., Zhang X., Zhang X., Meng Q., Gao F., Zhang Y. *Chemosphere*. 2017; 180:

531-539. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.063.

16. Mironov A.A. *Teoreticheskaja i prikladnaja jekologija*. 2005; 1: 21-23. (In Russ.)

17. Selemenev V.F., Rudakov O.B., Slavinskaja G.V., Drozdova N.V. Pigmenty pishhevyh proizvodstv (melanoidiny). M.: DeLi print. 2008; 246 p. (In Russ.)

18. Moris P. Poverhnost' i mezhfaznye granicy v okruzhayushchej srede. Ot nanourovnya k global'nomu masshtabu. M.: BINOM. Laboratoriya znanij, 2015; 540 p. (In Russ.)

19. Klassifikaciya i diagnostika pochv SSSR. M., Kolos, 1977; 221. (In Russ.)

20. World reference base for soil resources 2014. International soil classification Schulten H.R., Leinweber P. New in- sights into organic–mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. Biology Fertility Soils. 2000; 30: 399-432.

21. Umland F., Yansen A., Tirig D., Vyunsh G. Kompleksnye soedineniya v analiticheskoj himii. M., Mir, 1975; 531 p. (In Russ.)

22. Karpov S.I., Selemenev V.F. Infrakrasnaya spektroskopiya sorbentov. Voronezh, Izd-ko poligraf. centr «Nauchnaya kniga», 2024; 376 p. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Н.С. Горбунова – к.б.н., доцент каф. экологии и земельных ресурсов, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

А.И. Громовик – д.б.н., доцент каф. экологии и земельных ресурсов, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Т.А. Девятова – д.б.н., профессор, зав. каф. экологии и земельных ресурсов, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

В.Ф. Селеменев – д.х.н., профессор каф. аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

В.Н. Семенов – д.х.н., профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

N.S. Gorbunova – PhD, Associate Professor of the Department of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: vilian@list.ru

A.I. Gromovik – PhD, Associate Professor of the Department of Ecology and Land Resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: agrom.ps@mail.ru

T.A. Devyatova – DSc in Biology, professor, Head. Departmentof ecology and land resources, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: devyatova.eco@gmail.com

V.F. Selemenev – DSc in chemistry, Professor of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: common@chem.vsu.ru

V.N. Semenov – DSc in chemistry, Professor of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: common@chem.vsu.ru

Статья поступила в редакцию 22.02.2026; одобрена после рецензирования 08.04.2026; принята к публикации 15.04.2026.
The article was submitted 22.02.2026; approved after reviewing 08.04.2026; accepted for publication 15.04.2026.