

СОРБЦИЯ СВИНЦА АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ПОЧВОЙ
ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЯ (РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)С.Б. СОСОРОВА, Э.Г. ЦЫРЕМПИЛОВ, Л.Н. БОЛОНЕВА,
И.Н. ЛАВРЕНТЬЕВА, В.Л. УБУГУНОВ

(Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН)

Исследованы сорбционные свойства аллювиальной светлогумусовой почвы (Республика Бурятия) по отношению к свинцу в статических условиях. Представлены результаты определения параметров и кинетики сорбции свинца из водных растворов нитрата свинца почвой. В эксперименте использовалась серия почвенных суспензий, из которых через фиксированные промежутки времени (30–1440 минут) отбирались аликваты для определения остаточной концентрации ионов свинца методом атомно-эмиссионной спектроскопии. Экспериментальные данные обработаны с использованием уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха.

Были рассчитаны такие параметры сорбции как A_{max} , K_L , K_F , $\frac{1}{n}$, R^2 , ΔG , S удельной поверхности по отношению к ионам свинца. Показано, что A_{max} исследуемой почвы в диапазоне исследуемых концентрации составляет $100.6 \text{ ммоль} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Установлено, что около 99% ионов свинца поглощаются почвой в первые 3 часа и адсорбционное равновесие в системе свинец – почва в основном достигается за 3–24 ч в зависимости от исходной концентрации свинца. Кинетика сорбции ионов свинца исследуемой почвой удовлетворительно описывается моделью псевдо-второго порядка. Это позволяет сделать вывод о том, что сорбция ионов свинца лимитируется стадией химической реакции.

Ключевые слова: свинец, кинетика сорбции, уравнение Фрейндлиха, Ленгмюра константа скорости, модель псевдо-второго порядка, Fluvisols Eutric (FLeu).

Введение

Среди разнообразных загрязняющих веществ тяжелые металлы (ТМ), в том числе свинец, и их соединения выделяются распространенностью, высокой токсичностью, а также способностью к накоплению в живых организмах [39].

Почва является мощным поглотителем многих химических элементов, удерживающихся в поверхностном, плодородном слое. Компоненты почвенного поглощающего комплекса данного природного сорбента способны снижать токсичность металлов и загрязнителей за счет буферности. Поскольку соединения свинца являются очень токсичными, легкорастворимыми, важно исследовать механизмы сорбционно-десорбционного процесса между ионами свинца и почвами. Поэтому изучение закономерностей его поведения в почве и выявление факторов, влияющих на эти процессы, имеет важное агроэкологическое значение [4, 8].

По мнению Жуковой Л.А. с соавторами [11], зная сорбционные особенности почвы, можно решать вопросы экологического мониторинга, рекультивации

территорий, загрязненных ТМ, внесения веществ-инактиваторов для прочной фиксации ионов ТМ в почве.

Параметры сорбции и механизмы поглощения свинца почвами европейской части России рассмотрены в работах [8, 13, 14, 15, 16, 18, 22, 23, 24].

По сорбционным свойствам почв Забайкалья по отношению к ТМ имеются единичные работы [26, 27, 28].

В литературных источниках отсутствуют данные об исследовании кинетики сорбции свинца почвами, сформированными на территории Республики Бурятия.

Учитывая опасность загрязнения почв буферной байкальской зоны тяжелыми металлами и слабую изученность данного вопроса, целью нашей работы являлось определение кинетических параметров сорбции ионов свинца аллювиальной почвой.

Методика исследования

Объектом исследования явился верхний слой аллювиальной светлогумусовой квазиглееватой криотурбированной постагрогенной почвы (Классификация почв, 2004) на участке выровненной поймы р. Джиды. Растительное сообщество: разнотравно-монгольскополевищевый луг с проективным покрытием 90–95%. Географические координаты места закладки разреза: N50°24'09.1", E103°16'20.1", окрестность г. Закаменска.

Характер распределения ионов ТМ, в т.ч. и ионов свинца, определяется прежде всего свойствами почвы. Основные характеристики некоторых свойств почвы были определены по стандартным методикам [1] и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели свойств аллювиальной светлогумусовой почвы

Горизонт, глубина, см	Содержание фракций, %		pH _{водный}	Обменные катионы, ммоль (экв.)/100 г		Гумус	N _{общ}	Подвижные формы, мг/100 г		Содержание Pb, мг/кг	
	<0.001	<0.01		Ca ²⁺	Mg ²⁺	%		P ₂ O ₅	K ₂ O	валовое	обменная форма
AУра 0-21/24	5	20	5.9	13.5	12.2	3.95	0.37	57.5	30.0	18.3	0.6

Кинетику сорбции ионов свинца почвой из водного раствора Pb(NO₃)₂ изучали в статических условиях методом ограниченного объема. Опыты проводились при температуре 293±1 К. Начальные концентрации ионов свинца колебались в диапазоне от 0.25 до 10.0 ммоль · л⁻¹. Время контакта раствора с почвой составляло от 30 до 1440 мин. Остаточную концентрацию ионов свинца в фильтрате определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрофотометре ««ICPE-9000 Shimadzu»».

Количество поглощенных почвой ионов свинца в момент времени t рассчитывали по формуле:

$$A_t = \frac{(C_{исх.} - C_t) V}{m}, \quad (1)$$

где A_t – величина адсорбции в момент времени t, ммоль · кг⁻¹; C_{исх.} – исходная концентрация иона металла в растворе, ммоль · л⁻¹; C_t – концентрация иона металла в растворе в момент времени t, ммоль · л⁻¹; V – объем раствора, л; m – масса сорбента, кг.

Степень извлечения ионов металлов (α , %) рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{(C_{\text{исх.}} - C_t) \cdot 100}{C_{\text{исх.}}}, \% \quad (2)$$

Коэффициент межфазного распределения (K_d , л · г⁻¹) определяли следующим образом:

$$K_d = \left(\frac{C_{\text{исх.}} - C_t}{C_t} \right) \cdot \frac{V}{m}, \quad (3)$$

где m – масса сорбента, г.

Для оценки сорбционных свойств полученную изотерму анализировали в соответствующих координатах уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха.

Уравнение Ленгмюра [31]:

$$\frac{C_{\text{равн.}}}{A} = \frac{1}{A_{\text{max}} K_L} + \frac{C_{\text{равн.}}}{A_{\text{max}}}, \quad (4)$$

где A_{max} – максимальная сорбционная емкость, которая характеризует поглотительную способность сорбента, ммоль · кг⁻¹; K_L – константа адсорбционного равновесия, характеризующая сродство адсорбата к сорбенту, л · ммоль⁻¹; $C_{\text{равн.}}$ – равновесная концентрация ионов металла, ммоль · л⁻¹.

Линейное преобразование уравнения Ленгмюра дает возможность рассчитать параметры сорбции в графическом виде. Константы уравнения были рассчитаны из наклона и пересечения прямых на графике в координатах линейного уравнения $C_{\text{равн.}}/A$ от $C_{\text{равн.}}$.

Логарифмическую форму уравнения Фрейндлиха применяли для построения линейной зависимости $\lg A - \lg C_{\text{равн.}}$ и графического определения параметров K_F и $\frac{1}{n}$:

$$\lg A = \lg K_F + \frac{1}{n} \lg C_{\text{равн.}}, \quad (5)$$

где K_F – константа равновесия уравнения Фрейндлиха, относящаяся к сорбционной емкости; $\frac{1}{n}$ – параметр, связанный с интенсивностью адсорбции и поверхностной неоднородностью.

Величина A_{max} является предельным значением числа ммоль ионов свинца, сорбировавшегося на одном килограмме исследуемого образца. Из этой величины, зная площадь иона свинца, можно рассчитать удельную поверхность сорбента (почвы) по формуле:

$$S = A_{\text{max}} \cdot N_a \cdot S_{\text{Pb}}, \quad (6)$$

где N_a – число Авогадро, равное $6.02 \cdot 10^{23}$; S_{Pb} – площадь иона свинца, равная $18.3984 \cdot 10^{-20}$ м².

Свободную энергию Гиббса, кДж/моль, рассчитали по формуле:

$$\Delta G = -R \cdot T \cdot \ln K_L, \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная 8.314 Дж/моль · К; T – температура, К.

Результаты и их обсуждение

Изотерма сорбции является основной характеристикой сорбционной способности любого сорбента, отражающей функциональную связь равновесной концентрации с равновесным количеством сорбированного вещества. Анализ изотерм сорбции позволяет сделать определенные выводы о характере поверхности сорбента, о природе взаимодействия адсорбат – адсорбент и др. [32].

На основании полученных экспериментальных данных по сорбции свинца исследуемой почвой построена изотерма сорбции (рис. 1).

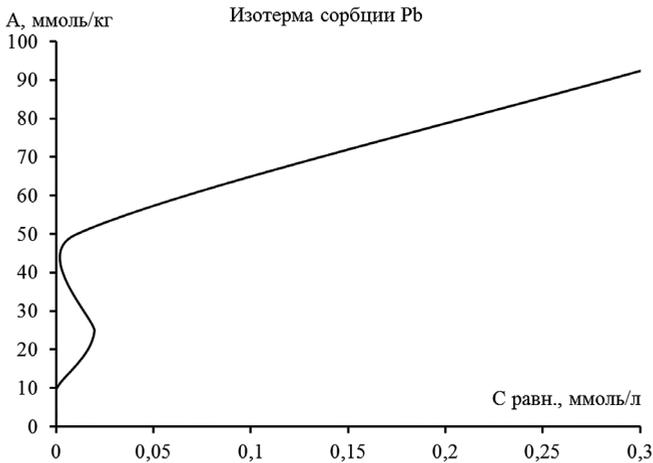


Рис. 1. Изотерма сорбции свинца аллювиальной светлогумусовой почвой из растворов $Pb(NO_3)_2$

Как видно на рис. 1 при увеличении равновесной концентрации раствора угол наклона кривой уменьшается. Снижение углов наклона кривой отражает изменение величин K_d и свидетельствует о том, что с увеличением «степени загрязнения» сродство ТМ к твердой фазе почв уменьшается, а подвижность увеличивается [2]. Гапонова Ю.И. [9] отмечает, что по мере увеличения вносимых концентраций ионов свинца наблюдается снижение K_L и увеличение A_{max} и увеличение количества поглощенных катионов металла. Так исследованные ею черноземы обыкновенные в диапазоне внесенных концентраций от 0,05 до 1 ммоль · л⁻¹ имеют значения $A_{max} = 16.84 - 21.15$ ммоль · кг⁻¹, $K_L = 40.89 - 47.13$ л · ммоль⁻¹, а в диапазоне внесении от 5 до 100 ммоль · л⁻¹ обладают несколько большей емкостью сорбции ($A_{max} = 465.54$ ммоль · кг⁻¹), но меньшим сродством ионов к почве ($K_L = 0.13$ л · ммоль⁻¹).

Кривая поглощения ионов свинца исследуемой почвой имеет перегибы в области равновесной концентрации до 0,02 ммоль/л. Предположительно, в данном диапазоне концентраций поглощение ионов свинца почвой протекает по нескольким механизмам.

По мнению [21, 36] разделение изотерм сорбции на два участка с энергетической гетерогенностью адсорбционных мест указывает на наличие в почве двух и более групп обменных центров. Гетерогенность обменных мест на поверхности почвенных частиц усложняют механизмы взаимодействия ТМ с поверхностью почвенных частиц. Это ведет к неодинаковой прочности их закрепления на поверхности, зависимости энергии взаимодействия от степени заполнения поверхности адсорбированными катионами и от индивидуальных свойств катионов.

Математическое описание процесса сорбции осуществляется изотермически-ми и кинетическими моделями [31].

Сорбция свинца на поверхности исследуемой почвы в изученном диапазоне исходных концентраций ($0.25\text{--}10.0\text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$) описывается уравнениями Ленгмюра и Фрейндлиха. Для расчета параметров сорбции экспериментальные данные были представлены в виде изотерм в линеаризованной форме (рис. 2, 3).

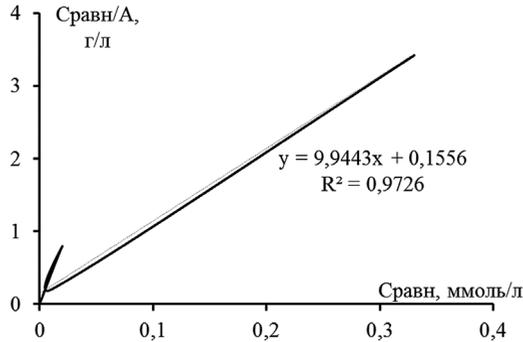


Рис. 2. Изотермы поглощения свинца аллювиальной светлогумусовой почвой из растворов $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ в координатах уравнения Ленгмюра

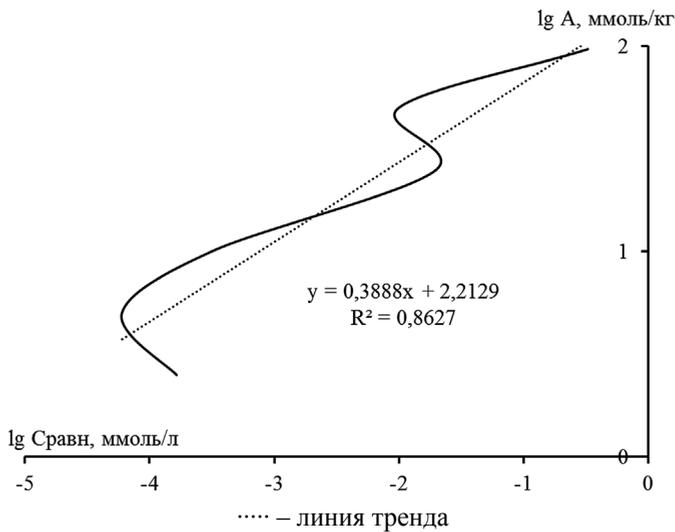


Рис. 3. Изотермы поглощения свинца аллювиальной светлогумусовой почвой из растворов $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ в координатах уравнения Фрейндлиха

Были рассчитаны такие параметры сорбции как A_{max} , K_L , K_F , $\frac{1}{n}$, R^2 , ΔG , S удельной поверхности (табл. 2).

Значения коэффициентов аппроксимации (R^2), приведенные в таблице 2, показывают, что сорбция ионов свинца наилучшим образом описывается моделью Ленгмюра. Это означает, что сорбированные частицы взаимодействуют только с центрами сорбции и не взаимодействуют друг с другом, поэтому на поверхности сорбента образуется мономолекулярный сорбционный слой [5].

Расчеты показывают, что с увеличением времени контакта ионов свинца с почвой возрастает значение K_L (табл. 3).

Таблица 2

**Параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха
для сорбции свинца аллювиальной светлогумусовой почвой**

Уравнение Ленгмюра			ΔG , кДж/моль	S удельной поверхности, м ² /г	Уравнение Фрейндлиха		
A_{\max} , ммоль · кг ⁻¹	K_L , л · ммоль ⁻¹	R^2			K_F , л · кг ⁻¹	$\frac{1}{n}$	R^2
100.56	63.91	0.9726	-10.13	11.14	163.27	0.3888	0.8627

Таблица 3

**Параметры сорбции ионов свинца аллювиальной светлогумусовой почвой
в зависимости от времени сорбции**

Время сорбции, мин	Уравнение Ленгмюра		
	A_{\max} , ммоль · кг ⁻¹	K_L , л · ммоль ⁻¹	R^2
30	96.54	32.27	0.9877
60	87.18	39.29	0.9987
180	92.59	40.54	0.9965
1440	100.56	63.91	0.9726

Так, при равновесном состоянии значение K_L вдвое выше, чем к концу первых 30 мин. сорбции ($K_L = 63.91$ и 32.27 л · ммоль⁻¹ соответственно). Это согласуется с мнением Жуковой Л.А. с соавторами [11] о том, что длительное нахождение элемента в почве способствует его прочному закреплению в ней.

При закреплении ТМ твёрдыми фазами почвы образуются связи, допускающие ионный обмен и не допускающие более прочные хемосорбционные связи. Со временем происходит упрочнение связи ТМ с почвенно-поглощающим комплексом, что выражается в уменьшении содержания водорастворимых и непрочносвязанных форм. В процессе сорбции ТМ почвой они иммобилизуются и переводятся в нетоксичные формы, некоторые входят в кристаллическую решетку алюмосиликатов [10]. Так, по данным Ягодина Б.А., Виноградовой С.Б., Говориной В.В. (1989), в почве техногенный Рb трансформируется в менее подвижные соединения [10].

При низких концентрациях ТМ заполняются места с более высокой энергией связи, т. е. имеет место специфическая адсорбция. По мере их заполнения происходит поглощение катионов на сорбционных центрах с меньшим средством к ТМ, с более низкой энергией связи (неспецифическая сорбция), чему соответствуют конечные участки кривых [21, 36].

Высокое значение K_L указывает на сильное средство адсорбата к адсорбенту [35].

В зависимости от времени контакта ионов свинца с почвой меняется и значение A_{\max} . По нашим расчетам к концу первых 30 минут контакта значение A_{\max} практически равно равновесному (96.54 и 100.56 ммоль · кг⁻¹ соответственно), затем наблюдается некоторое снижение A_{\max} до 87.18 ммоль · кг⁻¹ с последующим

возрастанием на остальном временном отрезке (табл. 4). Эти данные близки значениям A_{\max} для гумусового горизонта серой лесной почвы в дельты р. Селенга ($A_{\max} = 109.67 \text{ ммоль} \cdot \text{кг}^{-1}$) [26].

Модель Фрейндлиха хорошо описывает экспериментальные данные в широком диапазоне концентраций. Данная модель носит эмпирический характер и предполагает, что поглощение ионов происходит на гетерогенной поверхности. Значение параметра $\frac{1}{n}$ дает представление о том, насколько благоприятны процессы адсорбции. При значении $\frac{1}{n}$ от 0.1 до 0.5 адсорбция является благоприятной, 0.5–1.0 – довольно сложной и при значении >1 адсорбция затруднена [31].

Кроме того, величину $\frac{1}{n}$ можно рассматривать как показатель неоднородности сорбционных центров. Значение $\frac{1}{n}$ приближается к 0 по мере возрастания неоднородности и стремится к 1 при увеличении их однородности [25]. Анализ данных таблицы 2 показывает, что исследуемая почва характеризуется неоднородностью сорбционных центров и адсорбция ионов Pb^{2+} исследуемой почвой благоприятна.

K_F представляет собой величину сорбции при равновесной концентрации адсорбата, равной $1 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$ [37]. Для исследуемой почвы значение K_F равно $163.27 \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Значения ΔG указывает на хемосорбцию, химическое взаимодействие адсорбата с функциональными группами поверхности сорбента. Полученные значения энергии Гиббса при $T = 293\text{K}$ имеют отрицательный знак ($-10.1328 \text{ кДж/моль}$), что соответствует устойчивому закреплению ионов свинца на поверхности почвенных частиц. Отрицательные значения ΔG свидетельствуют о самопроизвольности протекания процесса сорбции [10] и об эндотермическом характере процесса [37].

Наряду с вышеуказанными параметрами K_d часто используют для характеристики сорбционных процессов. Если сорбция проходит по уравнению Генри, то K_d постоянен и соответствует наклону изотермы A от $C_{\text{равн}}$. В других случаях K_d зависит от концентрации в растворе. Например, если сорбция проходит по уравнению Ленгмюра, то K_d уменьшается с ростом $C_{\text{равн}}$ (табл. 4). По данным [30] повышение концентрации свинца в равновесном растворе коррелирует со снижением его сорбции.

Панкин А.А. с соавторами [20] отмечает, что наблюдается характерное увеличение K_d при уменьшении концентрации исходного раствора.

Глебова И.В., Стифеев А.И. [10] при рассмотрении динамики распределения K_d свинца в верхних горизонтах лесных почв и пахотном слое черноземов установили, что значения K_d численно находятся в едином диапазоне и обладают почти одинаковой направленностью в отличие от процессов, протекающих в минеральной части почвы.

При изучении кинетики сорбции важно определить либо время достижения равновесия, когда сорбат насытил сорбент и его концентрация в проходящем компоненте остается постоянной, либо степень обогащения, достигаемую при отделении адсорбента от внешней жидкости через определенное время. Время достижения равновесия устанавливая экспериментально, отбирая пробы через определенные промежутки времени [6].

Получить кинетические кривые было важно для оценки времени установления равновесного распределения свинца в гетерогенной системе.

Кинетические кривые сорбции свинца исследуемой почвой показаны на рисунке 4.

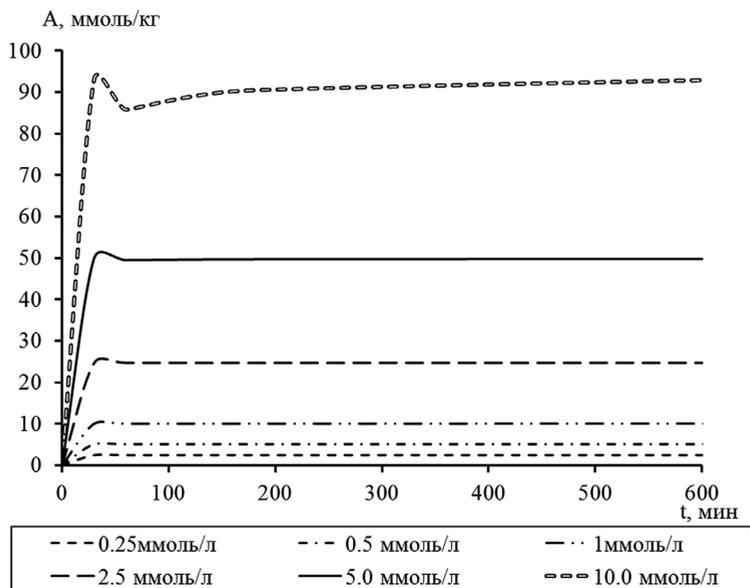


Рис. 4. Кинетическая кривая сорбции свинца из растворов $Pb(NO_3)_2$ аллювиальной светлогумусовой почвой в зависимости от концентрации

Анализ полученных кинетических кривых показывает, что сорбция ионов свинца исследуемой почвой протекает быстро на начальной стадии и замедляется при приближении к состоянию равновесия. В первые 30 мин взаимодействия происходит сорбция иона свинца почвой с максимальной скоростью (рис. 4, 5 и табл. 4).

Это объясняется тем, что в начальные моменты взаимодействия почвы с раствором на поверхности твердой фазы присутствует множество разнообразных вакантных адсорбционных центров различной природы, активности и доступности. С увеличением же времени контакта фаз происходит постепенное их насыщение по мере связывания ионов металлов из раствора, и в результате их количество уменьшается [20]. В данном временном интервале исследуемой почвой поглощается около 92.83–99.97% иона свинца. Затем с течением времени наблюдается обратный процесс – перехода металла из почвы в фильтрат и степень сорбции снижается незначительно. Скорость поглощения иона свинца почвой непостоянна и со временем постепенно убывает (табл. 4).

Из полученных зависимостей видно, что равновесие в системе «ион свинца – почва» в основном достигается в течение 3–24 часов в зависимости от исходной концентрации ионов свинца в растворе. Эти данные согласуются с некоторыми литературными данными. Так, Абдуажитова А.М. [2], Абдуажитова А.М с соавторами [3] отмечают, что в первые 30 минут взаимодействия скорость поглощения ионов свинца каштановой типичной выщелоченной слабогумусированной почвой в 20 раз выше, чем в последующие 45 минут и в 266 раз выше по сравнению с предравновесным периодом, после чего через 5–8 ч. система «почва-раствор» приходит в равновесие, количество поглощенного свинца перестает изменяться.

Гапонова Ю.И. [9] отмечает, что с увеличением времени взаимодействия твердой и жидкой фаз количество поглощенных черноземом ионов свинца возрастает (до 60 минут), затем со временем перестает изменяться. Равновесие в системе достигается практически через час после начала реакции.

Кинетические параметры уравнения псевдо-второго порядка адсорбции ионов свинца аллювиальной светлогумусовой почвой

Исходная концентрация ионов Pb ²⁺ , ммоль · л ⁻¹	Константы скорости адсорбции, к, кг · ммоль ⁻¹ · мин ⁻¹	Расчетная A _{max} , ммоль · кг ⁻¹	Время установления адсорбционного равновесия, мин	Время контакта, мин.	K _d , л · г ⁻¹	Степень извлечения, %
0.25	16.247	2.50	1440	30	6.75	99.85
	3.739	2.49		60	4.10	99.76
	1.686	2.50		180	5.05	99.80
	4.524	2.50		1440	15.14	99.93
0.5	37.872	5.00	1440	30	32.99	99.97
	7.307	5.00		60	17.85	99.94
	1.618	5.00		180	12.49	99.92
	5.333	5.00		1440	83.32	99.99
1.0	0.857	10.00	180	30	2.38	99.18
	8.128	9.99		60	19.22	99.95
	5.290	10.00		180	23.81	99.96
	14.286	10.00		1440	31.74	99.97
2.5	0.282	24.69	1440	30	0.78	98.74
	0.472	24.75		60	1.06	99.07
	0.116	24.88		180	1.01	99.02
	0.108	24.69		1440	1.26	99.21
5.0	1.022	49.75	1440	30	3.78	99.74
	0.039	49.02		60	0.94	98.95
	0.024	45.75		180	1.49	99.38
	0.043	50.00		1440	5.02	99.80
10.0	0.008	95.59	1440	30	0.13	92.83
	0.001	85.47		60	0.06	85.71
	0.001	90.09		180	0.09	90.39
	0.002	97.09		1440	0.29	96.70

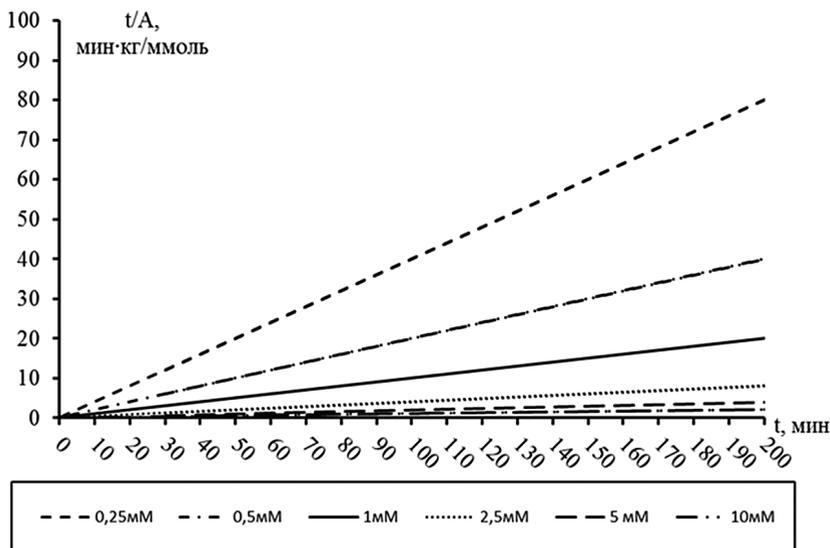


Рис. 5. Кинетика сорбции свинца аллювиальной светлогумусовой почвой в координатах уравнения псевдо-второго порядка

Панкин А.А. с соавторами [20] установил, что скорость поглощения ионов Zn, Pb, Cu, Co, Cd образцами верхнего горизонта серой лесной и песчаной почв из растворов меняется в течение 2 суток эксперимента и за 3 суток наблюдается полное насыщение образцов почв. При этом наиболее высокая скорость извлечения характерна для первых 2 часов контакта почва – раствор металла и не зависит от природы металла.

Везенцевым Е.В. с соавторами [7] выявлено, что сорбция ионов Pb^{2+} монтмориллонитовыми глинами разных месторождений происходит преимущественно за первые 15 минут.

Между скоростью сорбции и степенью извлечения свинца из модельных растворов существует ярко выраженная взаимосвязь: чем быстрее протекает сорбционный процесс, тем выше степень поглощения ионов свинца почвой из модельного раствора.

Кинетика сорбции описывает течение химических процессов во времени и дает возможность теоретически интерпретировать механизм сорбции [11].

Процесс сорбции продолжается до достижения равновесия и происходит в четыре основные стадии в присутствии пористого адсорбента [29]:

1. *Транспортировка адсорбата.* Адсорбат сначала транспортируется в гидродинамический пограничный слой, окружающий адсорбент. Этот перенос происходит либо за счет диффузии, либо турбулентного перемешивания.

2. *Внешняя диффузия пленки.* Адсорбат затем переносится через гидродинамический пограничный слой на поверхность адсорбента с помощью молекулярной диффузии. Толщина пограничного слоя влияет на скорость переноса и зависит от скорости объемного раствора.

3. *Внутренний (пористый) перенос.* Адсорбат затем переносится через поры адсорбента в адсорбционные центры посредством внутри частичной диффузии, т.е. либо молекулярной диффузии через раствор в порах (диффузия поры), либо диффузии по поверхности адсорбента (поверхностная диффузия).

4. *Адсорбция.* Конечной стадией является адсорбция, при которой адсорбент прилипает к адсорбирующей поверхности на доступных участках. Данная стадия быстротечна, а значит, один из предыдущих этапов диффузии будет управлять скоростью массопереноса.

При теоретическом исследовании кинетики сорбции необходимо установить, какая из стадий лимитирует время сорбции: диффузионная или химическая. В диффузионной кинетике можно выделить два частных случая: 1 – внешнедиффузионная кинетика, характеризующаяся временем перемещения ионов из раствора к сорбенту; 2 – внутридиффузионная кинетика, характеризующаяся временем перемещения сорбируемых ионов внутри самого сорбента. Химическая же кинетика сорбции характеризуется временем химического взаимодействия сорбируемых ионов с сорбентами, а временем диффузии можно пренебречь [11].

Для выявления вклада химической стадии применяют модели псевдо-первого, псевдо-второго и модифицированного второго порядков.

Как известно [19], в том случае, когда кинетика процесса описывается моделью псевдо-первого порядка, сорбции предшествует диффузия. Модель псевдо-второго порядка предполагает, что химическая реакция обмена лимитирует процесс сорбции.

В данном исследовании результаты экспериментов были сопоставлены с моделями адсорбционной кинетики псевдо-первого и псевдо-второго порядков.

Уравнение псевдо-первого порядка Лагергрена широко используется для описания скорости адсорбции загрязнителей из водных растворов. В линейной форме это уравнение выглядит следующим образом:

$$\ln(A_{\text{равн.}} - A_t) = \ln A_{\text{равн.}} - k_1 t \quad (8),$$

где A_t – величина адсорбции в момент времени t , ммоль/кг; $A_{\text{равн.}}$ – величина адсорбции при достижении адсорбционного равновесия, ммоль/кг; k_1 – константа скорости псевдо-первого порядка, мин⁻¹.

Это уравнение описывает случаи плёночной диффузии, контролирующей скорость адсорбции в течение нескольких первых минут в экспериментах с перемешиванием [33].

Для внешнедиффузионных процессов кинетическая кривая превращается в прямолинейную зависимость в координатах $-\lg(1-F)$ от t , где t – время, F – степень достижения равновесия в системе, рассчитываемая как $F = A_t/A_{\text{равн.}}$.

В исследуемых нами условиях описать кинетику сорбции с помощью уравнения псевдо-первого порядка не представилось возможным из-за низкой аппроксимации ($R^2 = 0.0236 - 0.7126$, за исключением $R^2 = 0.927$ для исходной концентрации 2.5 ммоль/л).

В работе [34] предложено использовать для описания кинетических закономерностей в системе жидкость/твёрдое тело модель псевдо-второго порядка реакции. В интегрированной форме это уравнение может быть представлено следующим образом:

$$\frac{t}{A} = \frac{1}{k_2 \cdot A_{\text{равн.}}^2} + \frac{t}{A_{\text{равн.}}}, \quad (9)$$

где k_2 – константа скорости сорбции псевдо-второго порядка, кг/ммоль · мин.

Зависимости t/A_t от t (рис. 5) позволяют сделать вывод о том, что параметры процесса сорбции ионов свинца исследуемой почвой удовлетворяют модели кинетики псевдо-второго порядка.

Заключение

Рассчитанные параметры уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха позволяют количественно оценить поглотительную способность почвы.

Проведенные нами в статических условиях опыты показывают, что процесс сорбции ионов свинца аллювиальной светлогумусовой почвой протекает быстро

и эффективно. Около 99% ионов свинца поглощаются почвой в первые 3 часа контакта. Время достижения сорбционного равновесия в системе «свинец-почва» составляет порядка 3–24 часов в зависимости от исходной концентрации ионов свинца. Значение максимальной сорбционной емкости (A_{\max}) исследуемой почвы в диапазоне исследуемых концентрации составляет $100.6 \text{ ммоль} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Установлено что, кинетическая модель псевдо-второго порядка описывает сорбцию ионов свинца исследуемой почвой с хорошим коэффициентом аппроксимации. Из зависимости данного уравнения можно сделать вывод о том, что сорбция ионов свинца лимитируется стадией химической реакции.

Таким образом, полученные данные подтверждают способность почвы поглощать и депонировать практически полностью техногенные выбросы ионов свинца за небольшой временной интервал в исследуемом диапазоне концентраций. Процесс трансформации поглощенного почвой свинца идет в сторону образования менее подвижных соединений с увеличением времени контакта.

Библиографический список

1. Агрохимические методы исследования почв / под ред. Соколов А.В. М.: Изд-во: Наука. 1975 г. 656 с.
2. Абдуажитова А.М. Поглощение свинца каштановыми почвами Семипалатинского Прииртышья / Автореф. дис. кандидата хим. наук. Барнаул. 2005. 20 с.
3. Абдуажитова А.М., Литихина А.В., Жакупова Ш.Б. Степень загрязненности почв Казахстана на примере Семейского региона // Успехи современного естествознания. 2014. № 5–1. С. 122–125. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33861> (дата обращения: 20.02.2019)].
4. Алексеев Ю.В. Тяжёлые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат. Ленинградское отделение, 1987. 142 с.
5. Алошманов Р.М. Исследование процесса сорбции ионов свинца фосфорсодержащим полимерным сорбентом // Современные наукоемкие технологии. 2010. № 5. С. 28–33.
6. Большаков Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра. 1982. 350 с.
7. Везенцев А.И., Перистая Л.Ф., Нгуен Фук Као, Перистый В.А., Копылова Е.В. Исследование сорбционных свойств природных монтмориллонитовых глин разных месторождений для очистки воды от ионов свинца (II) // Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 1. С. 43–51.
8. Власенко Е.А., Разводовская Е.В. Изучение параметров сорбции ионов свинца (II) почвенным поглощающим комплексом дерново-подзолистой супесчаной почвы // Актуальные научные исследования в современном мире. 2016. № 12–1 (20). С. 146–150.
9. Гапонова Ю.И. Поглощение меди, свинца и цинка черноземами Нижнего Дона: автореф. дис... канд. биол. наук. Ростов-на-Дону, 2009. 26 с.
10. Глебова И.В., Стифеев А.И. Основные сорбционные параметры распределения ионов свинца в почвах Курской области // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 4. С. 34–37.
11. Жукова Л.А., Гуламова Н.В., Глебова И.В. Основные закономерности кинетики сорбции ионов циркония серыми лесными почвами Центрального Черноземья // Известия ТСХА. 2008. Выпуск 2. С. 25–31.
12. Костин А.В., Мосталыгина Л.В., Бухтояров О.И. Изучение механизма сорбции ионов меди и свинца на бентонитовой глине // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. Вып. 6. С. 949–957.

13. *Ладонин Д.В.* Изучение механизмов поглощения меди, цинка и свинца дерново-подзолистой почвой // Почвоведение. 2004. № 5. С. 537–545.
14. *Ladonin D.V., Plyaskina O.V.* Mechanisms of Cu (II), Zn (II), Pb (II) sorption by soddy-podzolic soil // Eurasian Soil Science. 2004. Т. 37. № 5. С. 460–468.
15. *Ладонин Д.В., Карпужин М.М.* Влияние основных почвенных компонентов на поглощение меди, цинка и свинца городскими почвами // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2008. № 3. С. 33–38.
16. *Минкина Т.М., Статовой А.А., Крыщенко В.С.* Механизмы поглощения свинца гранулометрическими фракциями чернозема обыкновенного // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2004. № 4 (128). С. 66–69.
17. *Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н.* Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.
18. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В.* Новые подходы и методы определения содержания тяжелых металлов в загрязненных почвах и их информативность // Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. Материалы II Международной школы-семинара для молодых исследователей, посвященной памяти профессора В.Б. Ильина. Тюмень, 2016. С. 94–100.
19. *Никифорова Т.Е.* Физико-химические основы хемосорбции ионов d-металлов модифицированными целлюлозосодержащими материалами: дис...д-ра хим. наук. Иваново. 2014. 365 с.
20. *Панкин А.А., Линник В.Н., Молоток Е.В.* Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов почвой // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: Фундаментальные науки. 2006. № 10. С. 181–183.
21. *Пинский Д.Л.* Ионообменные процессы в почвах. Пушкино. 1997. 166 с.
22. *Пинский Д.Л., Минкина Т.М., Гапонова Ю.И.* Сравнительный анализ моно- и полиэлементной адсорбции меди, свинца и цинка черноземом обыкновенным из растворов азотнокислых и уксуснокислых солей // Почвоведение. 2010. № 7. С. 801–810.
23. *Пинский Д.Л., Минкина Т.М., Манджиева С.С., Федоров Ю.А., Бауэр Т.В., Невидомская Д.Г.* Особенности поглощения Cu(II), Pb(II) и Zn(II) черноземом обыкновенным из растворов нитратов, хлоридов, ацетатов и сульфатов // Почвоведение. 2014. № 1. С. 22–29.
24. *Понизовский А.А., Мироненко Е.В.* Механизмы поглощения свинца (II) почвами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 418–429.
25. *Соколова Т.А., Трофимов С.Я.* Сорбционные свойства почв. Адсорбция. Катионный обмен: учебное пособие по некоторым главам химии почв. Тула: Гриф и К. 2009. 172 с.
26. *Сосорова С.Б.* Сорбционные свойства почв дельты р. Селенга по отношению к свинцу // Разнообразии почв и биоты Северной и Центральной Азии. Материалы III Всероссийской научной конференции. Улан-Удэ. 2016. С. 266–269.
27. *Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Аюшина Т.А.* Оценка сорбционной способности почв западного и юго-западного Забайкалья по отношению к свинцу // Земельные и водные ресурсы: мониторинг эколого-экономического состояния и модели управления. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 10-летию Института землеустройства, кадастров и мелиорации. Улан-Удэ. 2015. С. 248–252.
28. *Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Болонева Л.Н., Убугунов Л.Л.* Параметры сорбции ионов кобальта и никеля солончаками западного Забайкалья // Агрохимия. 2018. № 9. С. 69–79.

29. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов / 2-е изд. испр. и доп. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2004. 442 с.

30. Фролов Ю.Г. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия. 1982. 400 с.

31. Халил А.С., Серпокрылов Н.С., Смоляниченко А.С., Старовойтов С.В. Математическое описание сорбции на модифицированной рисовой соломе // Электронный научный журнал. Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650.

32. Химия поверхностных соединений / под ред. Г.В. Лисичкина. М.: Изд-во Физматлит. 2003. 592 с.

33. Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process Biochemistry. 1999. Vol. 37. P. 451–465.

34. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // Separation and purification methods. 2000. № 2 (29). P. 189–232.

35. Lv L, Tsoi G, Zhao X.S Uptake Equilibria and Mechanisms of Heavy Metal Ions on Microporous Titanosilicate ETS-10 // Ind. Eng. Chem. Res. 2004. 43 (24), pp 7900–7906.

36. Samokhin A.P., Minkina T.M., Statovoi A.A. Comparison anion effect on zink and lead adsorption by chernozem and its pH value // Proceeding of 7th Int. Conf. on the Biochemistry of Trace Elements. June 15–19, 2003, Uppsala. 2003. V. 4. P. 82–83.

37. Минь Фам Тхань, Лебедева О.Е. Изучение кинетики и термодинамики адсорбции бриллиантового зеленого на магнитном композите // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2017.

38. <https://infopedia.su/15x10ef1.html>

39. http://himicheskie-veshestva.vsesekreti.net/a_himicheskie-veshestva&tyagyolie-metalli&1.htm

40. Partition Coefficients for Lead // Understanding Variation in Partition Coefficient K_d Values. Volume II. Geochemistry and Available K_d Values for Selected Inorganic Contaminants. Appendix F. – EPA 402-R-99-004B. 1999. P. F.1–F.10.

LEAD SORPTION BY ALLYUAL SOILS OF WEST TRANSBAIKAL REGION (BURYAT REPUBLIC)

S.B. SOSOROVA, E.G. TSYREMPILOV, L.N. BOLONEVA,
I.N. LAVRENTIEVA, V.L. UBUGUNOV

(Siberian Branch of the RAS Institute of General and Experimental Biology)

The authors studied sorption properties of the alluvial light-humus soil (Republic of Buryatia) relative to lead under static conditions. The paper presents determined parameters and kinetics of lead sorption from aqueous solutions of lead nitrate by soil. A series of soil suspensions were used in the experiment, from which aliquots were taken at fixed intervals (30–1440 minutes) to determine the residual concentration of lead ions with atomic emission spectroscopy. The experimental data were processed using the Langmuir and Freundlich equations. Such sorption parameters as A_{max} , K_L , $K_p \frac{1}{n}$, R^2 , ΔG , S of specific surface were calculated relative to lead ions. It is shown that the A_{max} of the studied soil is $100.6 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the studied concentration range.

It has been established that about 99% of lead ions are absorbed by the soil in the first 3 hours and the adsorption equilibrium in the lead-soil system is mainly reached in 3–24 hours, depending on the initial lead concentration. The kinetics of lead ion sorption by the soil under study

is satisfactorily described by a pseudo-second order model. This leads to a conclusion that the sorption of lead ions is limited by the stage of chemical reaction.

Key words: lead, sorption kinetics, soil, Freundlich equation, Langmuir equation, velocity constant, pseudo-second-order model, Fluvisols Eutric (FLeu).

References

1. Agrokhimicheskiye metody issledovaniya pochv [Agrochemical methods of soil study] / Ed. by Sokolov A.V. M.: Izd-vo: Nauka. 1975: 656. (In Russian)
2. *Abduazhitova A.M.* Pogloshcheniye svintsa kashtanovymi pochvami Semipalatinskogo Priirtysh'ya [Lead sorption by chestnut soils of the Semipalatinsk Irtysh area]: Self-review of PhD (Chem) thesis. Barnaul. 2005: 20. (In Russian)
3. *Abduazhitova A.M., Lipikhina A.V., Zhakupova Sh.B.* Stepen' zagryaznennosti pochv Kazakhstana na primere Semeyskogo regiona [The degree of soil pollution in Kazakhstan as exemplified by the Semey region] // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2014; 5–1: 122–125. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=33861> (Access date: 20.02.2019). (In Russian)
4. *Alekseyev Yu.V.* Tyazholiye metally v pochvakh i rasteniyakh [Heavy metals in soils and plants] L.: Agropromizdat. Leningradskoye otdeleniye, 1987: 142. (In Russian)
5. *Alosmanov R.M.* Issledovaniye protsessa sorbtzii ionov svintsa fosforsoderzhashchim polimernym sorbentom [Study of the sorption process of lead ions by a phosphorus-containing polymer sorbent] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2010; 5: 28–33. (In Russian)
6. *Bol'shakov G.F.* Vosstanovleniye i kontrol' kachestva nefteproduktov [Restoration and quality control of petroleum products.] 2nd ed., reviewed and extended. – L.: Nedra. 1982: 350. (In Russian)
7. *Vezentsev A.I., Peristaya L.F., Nguyen Fuk Kao, Peristy V.A., Kopylova Ye.V.* Issledovaniye sorbttsionnykh svoystv prirodnykh montmorillonitovykh glin raznykh mesozhdeniy dlya ochistki vody ot ionov svintsa (II) [Study of the sorption properties of natural montmorillonite clays from different fields for water purification from lead (II) ions] // *Sorbttsionniye i khromatograficheskiye protsessy*. 2018; 18; 1: 43–51. (In Russian)
8. *Vlasenko Ye.A., Razvodovskaya Ye.V.* Izucheniye parametrov sorbtzii ionov svintsa (II) pochvennym pogloshchayushchim kompleksom dernovo-podzolistoy supeschanoy pochvy [Study of the parameters of lead (II) ion sorption by the soil absorbing complex of the sod-podzolic sandy-loam soil] // *Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire*. 2016; 12–1 (20): 146–150. (In Russian)
9. *Gaponova Yu.I.* Pogloshcheniye medi, svintsa i tsinka chernozemami Nizhnego Dona [Sorption of copper, lead, and zinc by chernozems of the Lower Don]: Self-review of PhD (Bio) thesis. Rostov-na-Donu, 2009: 26. (In Russian)
10. *Glebova I.V., Stifeyev A.I.* Osnovniye sorbttsionniye parametry raspredeleniya ionov svintsa v pochvakh Kurskoy oblasti [Main sorption parameters of the distribution of lead ions in the soils of the Kursk region] // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokozyaystvennoy akademii*. 2012; 4: 34–37. (In Russian)
11. *Zhukova L.A., Gulamova N.V., Glebova I.V.* Osnovniye zakonomernosti kinetiki sorbtzii ionov tsirkoniya serymi lesnymi pochvami Tsentral'nogo Chernozem'ya [Basic laws of the sorption kinetics of zirconium ions by gray forest soils of the Central Chernozem Region] // *Izvestiya TSKHA*. 2008; 2: 25–31. (In Russian)
12. *Kostin A.V., Mostalygina L.V., Bukhtoyarov O.I.* Izucheniye mekhanizma sorbtzii ionov medi i svintsa na bentonitovoy gline [Study of the sorption mechanism of copper

- and lead ions on bentonite clay] // Sorbtsionniye i khromatograficheskiye protsessy. 2012; 12; 6: 949–957. (In Russian)
13. *Ladonin D.V.* Izucheniyе mekhanizmov pogloshcheniya medi, tsinka i svintsа dеrnovo-podzolistoy pochvoy [Study of the sorption mechanisms of copper, zinc, and lead by sod-podzolic soils] // Pochvovedeniye. 2004; 5: 537–545. (In Russian)
14. *Ladonin D.V., Plyaskina O.V.* Mechanisms of Cu (II), Zn (II), Pb (II) sorption by soddy-podzolic soil // Eurasian Soil Science. 2004; 37; 5: 460–468. (In Russian)
15. *Ladonin D.V., Karpukhin M.M.* Vliyaniye osnovnykh pochvennykh komponentov na pogloshcheniye medi, tsinka i svintsа gorodskimi pochvami [Effect of the main soil components on the sorption of copper, zinc, and lead by urban soils] // Moscow University Bulletin. Series 17: Soil Science. 2008; 3: 33–38. (In Russian)
16. *Minkina T.M., Statovoy A.A., Kryshchenko V.S.* Mekhanizmy pogloshcheniya svintsа granulometricheskimi fraktsiyami chernozema obyknovennogo [Mechanisms of lead sorption by granulometric fractions of ordinary chernozem] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki. 2004; 4 (128): 66–69. (In Russian)
17. *Minkina T.M., Pinskiy D.L., Mandzhiyeva S.S., Antonenko Ye.M., Sushkova S.N.* Vliyaniye granulometricheskogo sostava na pogloshcheniye medi, svintsа i tsinka chernozemnymi pochvami rostovskoy oblasti [Effect of granulometric composition on the absorption of copper, lead, and zinc by chernozem soils of the Rostov region] // Pochvovedeniye. 2011; 11: 1304–1311. (In Russian)
18. *Minkina T.M., Motuzova G.V.* Noviyе podkhody i metody opredeleniya sostoyaniya tyazhelykh metallov v zagryaznennykh pochvakh i ikh informativnost' [New approaches and methods for determining the content of heavy metals in polluted soils and their informativeness // Biogeokhimiya khimicheskikh elementov i soyedineniy v prirodnykh sredakh. Materialy II Mezhdunarodnoy shkoly-seminara dlya molodykh issledovateley, posvyashchennoy pamyati professora V.B. Il'ina. Tyumen', 2016: 94–100. (In Russian)
19. *Nikiforova T.Ye.* Fiziko-khimicheskiye osnovy khemosorbtsii ionov d-metallov modifitsirovannymi tsellyulozosoderzhashchimi materialami [Physical-and-chemical principles of the chemisorption of d-metal ions by modified cellulose-containing materials]: Self-review of DSc (Chem) thesis. Ivanovo. 2014: 365. (In Russian)
20. *Pankin A.A., Linnik V.N., Molotok Ye.V.* Kinetika sorbtsii ionov tyazhelykh metallov pochvoy [Kinetics of heavy metal ion sorption by soil] // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S: Fundamental'nyye nauki. 2006; 10: 181–183. (In Russian)
21. *Pinskiy D.L.* Ionoobmennyye protsessy v pochvakh [Ion exchange processes in soils]. Pushchino. 1997: 66. (In Russian)
22. *Pinskiy D.L., Minkina T.M., Gaponova Yu.I.* Sravnitel'nyy analiz mono- i polielementnoy adsorbtsii medi, svintsа i tsinka chernozemom obyknovennym iz rastvorov azotnokislykh i uksusnokislykh soleyн [Comparative analysis of mono- and polyelement adsorption of copper, lead, and zinc by ordinary chernozem from solutions of nitrate and acetic acid salts] // Pochvovedeniye. 2010; 7: 801–810. (In Russian)
23. *Pinskiy D.L., Minkina T.M., Mandzhiyeva S.S., Fedorov Yu.A., Bauer T.V., Nevdomskaya D.G.* Osobennosti pogloshcheniya Su(II), Pb(II) i Zn(II) chernozemom obyknovennym iz rastvorov nitratov, khloridov, atsetatov i sul'fatov [Features of the absorption of Cu (II), Pb (II) and Zn (II) by ordinary chernozem soils from solutions of nitrates, chlorides, acetates, and sulfates] // Pochvovedeniye. 2014; 1: 22–29. (In Russian)
24. *Ponizovskiy A.A., Mironenko Ye.V.* Mekhanizmy pogloshcheniya svintsа (II) pochvami [Mechanisms of lead (II) sorption by soils] // Pochvovedeniye. 2001; 4: 418–429. (In Russian)

25. *Sokolova T.A., Trofimov S.Ya.* Sorbtionniye svoystva pochv. Adsorbtsiya. Kationnyy obmen: uchebnoye posobiye po nekotorym glavam khimii pochv [Sorptions properties of soil. Sorption. Cation exchange: Study manual on some chapters of soil chemistry]. Tula: Grif i K. 2009: 172. (In Russian)

26. *Sosorova S.B.* Sorbtionniye svoystva pochv del'ty r. Selenga po otnosheniyu k svintsu [Sorptions properties of soil in the Selenga estuary relative to lead] // *Raznoobraziye pochv i bioty Severnoy i Tsentral'noy Azii. Materialy II Ulan-Ude.* 2016: 266–269. (In Russian)

27. *Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ayushina T.A.* Otsenka sorbtionnoy sposobnosti pochv zapadnogo i yugo-zapadnogo Zabaykal'ya po otnosheniyu k svintsu [Evaluation of the sorption capacity of the soils of Western and Southwestern Transbaikalia with respect to lead] // *Zemel'niye i vodniye resursy: monitoring ekologo-ekonomicheskogo sostoyaniya i modeli upravleniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 10-letiyu Instituta zemleustroystva, kadastr i melioratsii.* Ulan-Ude. 2015: 248–252. (In Russian)

28. *Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Boloneva L.N., Ubugunov L.L.* Parametry sorbtitsii ionov kobal'ta i nikelya solonchakami zapadnogo Zabaykal'ya [Parameters of cobalt and nickel ion sorption by saline salts of Western Transbaikalia] // *Agrokhiimiya.* 2018: 9: 69–79. (In Russian)

29. *Fenelonov V.B.* Vvedeniye v fizicheskuyu khimiyu formirovaniya supramolekulyarnoy struktury adsorbentov i katalizatorov [Introduction to the physical chemistry of the formation of the supramolecular structure of adsorbents and catalysts] / 2nd ed., reviewed and extended: 442. (In Russian)

30. *Frolov Yu.G.* Poverkhnostniye yavleniya i dispersnyye sistemy [Surface phenomena and disperse systems.]. M.: Khimiya. 1982: 400. (In Russian)

31. *Khalil A.S., Serpokrylov N.S., Smolyanichenko A.S., Starovoytov S.V.* Matematicheskoye opisaniye sorbtitsii na modifitsirovannoy risovoy solome [Mathematical description of sorption on modified rice straw] // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal. Inzhenernyy vestnik Dona.* 2018; 1 ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650. (In Russian)

32. *Khimiya poverkhnostnykh soyedineniy [Chemistry of surface compounds]* / Ed. by G.V. Lisichkin. M.: Izd-vo Fizmatlit. 2003: 592. (In Russian)

33. *Ho Y.S., McKay G.* Pseudo-second order model for sorption processes // *Process Biochemistry.* 1999; 37: 451–465. (In English)

34. *Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G.* Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separation and purification methods.* 2000: 189–232. (In English)

35. *Lv L, Tsoi G, Zhao X.S* Uptake Equilibria and Mechanisms of Heavy Metal Ions on Microporous Titanosilicate ETS-10 // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004; 43 (24): 7900–7906. (In English)

36. *Samokhin A.P., Minkina T.M., Statovoi A.A.* Comparison anion effect on zink and lead adsorption by chernozem and its pH value // *Proceeding of 7th Int. Conf. on the Biochemistry of Trace Elements.* June 15–19, 2003, Uppsala. 2003; 4: 82–83. (In English)

37. *Min' Fam Tkhan', Lebedeva O.Ye.* Izucheniye kinetiki i termodinamiki adsorbtsii brilliantovogo zelenogo na magnitnom kompozite // *Nauchniye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki.* [Electronic resource] 2017. Access mode: nv.bsu.edu.ru (In English)

38. <https://infopedia.su/15x10ef1.html> (In English)

39. http://himicheskie-veshestva.vsesekreti.net/a_himicheskie-veshestva&tyagolye-metalli&l.htm (In English)

40. *Partition Coefficients for Lead // Understanding Variation in Partition Coefficient Kd. Values. Volume II. Geochemistry and Available Kd Values for Selected Inorganic Contaminants. Appendix F. – EPA 402-R-99-004B.* 1999: F.1–F.10. (In English)

Сосорова Соелма Батожаргаловна, к.б.н., н.с. лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; тел.: +7-301-243-31-65; e-mail: soelma_sosorova@mail.ru).

Цыремпилов Энхэ Галсанович, к.б.н., м.н.с. лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; тел.: +7-301-243-31-65; e-mail: enhetsyrempilov@mail.ru).

Болонева Людмила Николаевна, к.б.н., с.н.с. лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; тел.: +7-301-243-31-65; e-mail: ldm-boloneva@mail.ru).

Лаврентьева Ирина Николаевна, к.б.н., с.н.с. лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; тел.: +7-301-243-31-65; e-mail: lira1973@mail.ru).

Убугунов Василий Леонидович, к.б.н., в.н.с. лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; тел.: +7-301-243-31-65; e-mail: ubugunovv@mail.ru).

Soelma B. Sosorova, PhD (Bio), Research Associate, the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, the SB RAS Institute of General and Experimental Biology (670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6; phone: +7-301-243-31-65; e-mail: soelma_sosorova@mail.ru).

Enkhe G. Tsyrempilov, PhD (Bio), Junior Research Associate, the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, the SB RAS Institute of General and Experimental Biology (670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6; phone: +7-301-243-31-65; e-mail: enhetsyrempilov@mail.ru).

Lyudmila N. Boloneva, PhD (Bio), Senior Research Associate, the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, the SB RAS Institute of General and Experimental Biology (670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6; phone: +7-301-243-31-65; e-mail: ldm-boloneva@mail.ru).

Irina N. Lavrentieva, PhD (Bio), Senior Research Associate, the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, the SB RAS Institute of General and Experimental Biology (670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6; phone: +7-301-243-31-65; e-mail: lira1973@mail.ru).

Vasily L. Ubugunov, PhD (Bio), Key Research Associate, the Laboratory of Biogeochemistry and Experimental Agrochemistry, the SB RAS Institute of General and Experimental Biology (670047, Ulan-Ude, Sakhyanova Str., 6; phone: +7-301-243-31-65; e-mail: ubugunovv@mail.ru).