



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544:543.421;422:615.322

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9222

Кинетика сорбции ионов никеля на почвах Удмуртии

Марина Анатольевна Шумилова[✉], **Вадим Генрихович Петров**

Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

[✉]shumilovama@udman.ru

Аннотация. Благодаря компонентам поглощающего комплекса почва является мощным природным сорбентом тяжелых металлов в поверхностном слое, снижая, таким образом, негативное воздействие поллютантов. Накопление в почве ионов никеля, способных при изменяющихся внешних условиях вновь переходить в растворенное состояние, диктует необходимость изучения кинетики сорбционного процесса между ионами металла и почвой. Лабораторный эксперимент по изучению кинетики сорбции ионов никеля проводили в статических условиях контакта раствора соли с верхним гумусовым горизонтом (A_0) дерново-подзолистой, дерново-карбонатной и серой лесной почв, наиболее распространенных в Удмуртской республике. Представлены результаты определения параметров кинетики ионов никеля из водных растворов сульфата никеля почвой. В эксперименте использовались серия почвенных суспензий, в которых через фиксированные промежутки времени (0.5-600 час) определяли остаточную концентрацию ионов металла методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией.

Определено, что процесс сорбции протекает достаточно быстро, более 90% ионов никеля поглощается в первые два часа всеми типами исследуемых почв; равновесие в системе «почва – никель» достигается практически за 24 часа. С помощью экспериментальных кинетических кривых найдено, что величина адсорбции в момент равновесия у дерново-подзолистой почвы по отношению к ионам никеля равна $0.00697 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$, у дерново-карбонатной $-0.00645 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$ и у серой лесной $-0.00635 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$. Применение уравнений диффузионной кинетики к экспериментальным кинетическим кривым показало, что кинетика исследуемого сорбционного процесса представляет собой комбинацию внешней и внутренней диффузионной кинетики, при этом внешнедиффузионные ограничения проявляются в большей степени у дерново-подзолистой и дерново-карбонатной почв. Сопоставление результатов использования моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков при изучении механизмов сорбции ионов никеля почвами Удмуртии показывает, что в изученных условиях уравнение псевдо-второго порядка лучше описывает экспериментальные данные у всех исследуемых типов почв, свидетельствуя о контроле процесса сорбции металла почвой химической реакцией. Максимальная константа скорости зафиксирована у дерново-карбонатной почвы ($2.97 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{час}^{-1}$), минимальные значения константы скорости у дерново-подзолистой почвы ($0.68 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{час}^{-1}$).

Ключевые слова: никель, почва, сорбция, кинетика сорбции, диффузия, модель реакции псевдо-первого и псевдо-второго порядка

Для цитирования: Шумилова М.А., Петров В.Г. Кинетика сорбции ионов никеля на почвах Удмуртии // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 2. С. 173-182.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9222>

Original article

Kinetics of Nickel Ion Sorption on Soils of Udmurtia

Marina A. Shumilova[✉], **Vadim G. Petrov**

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russian Federation

[✉]shumilovama@udman.ru

Abstract. Due to the components of the absorbing complex, soil is a powerful natural sorbent of heavy metals in the surface layer, thus reducing the negative impact of pollutants. The accumulation of nickel ions in soil,

which are capable of re-dissolving under changing environmental conditions, determines the need to study the kinetics of the sorption process between metal ions and soil.

A laboratory experiment for the study of the sorption kinetics of nickel ions was carried out under static conditions of contact of a salt solution with the upper humus horizon (A_0) of sod-podzolic soil, sod-carbonate and grey forest soils, the most common in the Udmurt Republic. The results of determining the parameters of the kinetics of nickel ions from aqueous solutions of nickel sulphate in soil are presented. A series of soil suspensions was used in the experiment, in which the residual concentration of metal ions was determined at fixed intervals (0.5-600 h) by atomic absorption spectrometry with electrothermal atomization.

It was determined that the sorption process proceeds quite quickly, more than 90% of nickel ions are absorbed in the first two hours by all types of studied soils; equilibrium in the "soil-nickel" system is achieved in almost 24 hours. Using experimental kinetic curves, it was found that the value of adsorption at the moment of equilibrium in sod-podzolic soil with respect to nickel ions was equal to $0.00697 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$, in sod-carbonate— $0.00645 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ and for the grey forest— $0.00635 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$. The application of the equations of diffusion kinetics to the experimental kinetic curves showed that the kinetics of the studied sorption process is a combination of external and internal diffusion kinetics, while external diffusion limitations are manifested to a greater extent in sod-podzolic and sod-carbonate soils. A comparison of the results of using pseudo-first and pseudo-second order models in studying the mechanisms of nickel ion sorption by soils of Udmurtia shows that under the studied conditions, the pseudo-second order equation better described the experimental data for all studied soil types, indicating that the process of metal sorption by soil is controlled by a chemical reaction. The maximum rate constant was recorded for sod-carbonate soil ($2.97\cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), the minimum values of the rate constant—for sod-podzolic soil ($0.68\cdot 10^{-6} \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$).

Keywords: nickel, soil, sorption, sorption kinetics, diffusion, pseudo-first and pseudo-second order reaction model

For citation: Shumilova M.A., Petrov V.G. Kinetics of Nickel Ion Sorption on Soils of Udmurtia. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(2): 173-182. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9222>

Введение

Развитие промышленности обуславливает поступление в природные среды все большего количества загрязняющих веществ, большая часть из них принадлежит тяжелым металлам (ТМ), в частности, ионам никеля, занимающим лидирующие позиции по объему загрязненных территорий [1]. За счет компонентов почвенного поглощающего комплекса (ППК) почва является мощным природным сорбентом ТМ в поверхностном слое, снижая, таким образом, негативное воздействие поллютантов [2-5]. Накопление в природных объектах, в частности в почве, ионов никеля, способных при изменяющихся внешних условиях вновь переходить в растворенное состояние, диктует необходимость изучения кинетики сорбционного процесса между ионами металла и почвой. Знание сорбционных особенностей почвы позволит успешно осуществлять экологический мониторинг, рекультивацию загрязненных ТМ территорий, внесение веществ-

инактиваторов для более прочной фиксации ионов ТМ в почве [6].

Имеются единичные работы по изучению сорбционных свойств почв Удмуртии по отношению к ионам никеля [7,8], но в литературных источниках отсутствуют данные по исследованию кинетики адсорбции ионов никеля наиболее распространенными типами почв, сформированными на территории республики. Учитывая слабую изученность данного вопроса, целью представленной работы является исследование кинетических закономерностей сорбции ионов никеля почвами Удмуртской республики.

Экспериментальная часть

Лабораторный эксперимент по изучению кинетики сорбции ионов никеля проводили в статических условиях взаимодействия раствора соли с верхним гумусовым горизонтом (A_0) дерново-подзолистой, дерново-карбонатной и серой лесной почв, наиболее широко представленных в Удмуртской республике [9].

Таблица 1. Основные агрохимические показатели почвенных образцов
 Table 1. Main agrochemical indicators of the soil samples

№ п/п	Тип почвы	Гумус, %	Содержание металла, мг·кг ⁻¹			pH	
			Mn	Fe	Al	H ₂ O	KCl
1	Дерново-сильнопodzо-листая слабосмытая	1.58	2.89	149.27	4620.40	6.23	5.22
2	Дерново-карбонатная выщелоченная слабосмытая	3.28	2.10	150.56	6753.20	6.63	5.57
3	Серая лесная опodzо-ленная	4.74	2.22	131.98	4175.80	6.41	5.37

Поскольку процесс поглощения ионов никеля обусловлен свойствами почвы; поэтому в табл. 1 представлены основные агрохимические характеристики исследуемых почв, определенные стандартными методами [10]. Все почвы обладают тяжело-суглинистым гранулометрическим составом.

Кинетику сорбции ионов никеля почвами из водного раствора NiSO₄ изучали методом ограниченного объема при температуре 293±1К [11]. Для минимизации воздействия реакций ионного обмена на процесс поглощения исследования проводили с применением 0.01М CaCl₂ в качестве фонового раствора. В конические колбы помещали 18 г почвы и 0.18 дм³ раствора сульфата никеля с концентрацией 6·10⁻⁴ моль·дм⁻³, при этом размер почвенных частиц не превышал 0.1 мм. Колбы с суспензиями перемешивали два часа на ротаторе. Время контакта раствора

с почвой варьировалось от 0.5 до 600 час, после чего образцы центрифугировали. Исходную и остаточную концентрации ионов никеля в фильтрате определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией на спектрофотометре «Shimadzu AA-7000» по стандартной методике М-02-902-125-2005 [12]. Представленные данные являются средними величинами измерений, выполненных в трех повторностях, с величиной относительного стандартного отклонения не более 6.0%.

Количество поглощенных почвой ионов никеля в момент времени *t* рассчитывали по формуле [13]:

$$A_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}, \quad (1)$$

где *A_t* – величина адсорбции в момент времени *t*, моль·кг⁻¹; *C₀* – начальная концентрации ионов никеля в растворе, М; *C_t* – концентрация иона никеля в растворе в

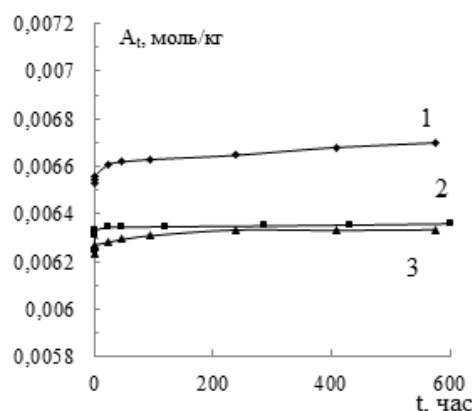


Рис. 1. Кинетические кривые сорбции ионов никеля почвой: 1 – дерново – подзолистой ; 2 – дерново – карбонатной; 3 – серой лесной

Fig. 1. Kinetic curves of sorption of nickel ions by soil: 1 – sod-podzolic; 2 – sod-carbonate; 3 – grey forest soil

Таблица 2. Диффузионные параметры сорбции ионов никеля на почвах Удмуртии
Table 2. Diffusion parameters of nickel ion sorption on the soils of Udmurtia

Тип почвы	$k_d \cdot 10^6$, моль·кг ⁻¹ ·час ^{-0.5}	A	R
Дерново-сильнопodzolistая слабосмытая	4.70	0.00658	0.99
Дерново-карбонатная выщелоченная слабосмытая	0.70	0.00634	0.98
Серая лесная оподзоленная	4.90	0.00626	0.99

момент времени t , М; V – объем раствора, дм³; m – масса почвы, кг.

Степень поглощения ионов металла (α , %) почвой определяли по формуле [13]:

$$\alpha = \frac{(c_0 - c_t) \cdot 100}{c_0} \%, \quad (2)$$

Все кинетические параметры рассчитаны методом наименьших квадратов [14].

Обсуждение результатов

При исследовании кинетики сорбции важно определить время наступления равновесия, когда сорбат насытил сорбент и его концентрация в жидкой фазе остается постоянной. Время достижения равновесия устанавливают экспериментально, отбирая пробы надосадочной жидкости через определенные промежутки времени [13].

Полученные экспериментальным путем кинетические кривые позволяют определить время установления равновесного распределения ионов никеля в гетерогенной системе. На рис. 1 представлены кривые сорбции ионов никеля разными типами исследуемых почв, которые показывают, что скорость сорбции на начальном этапе максимальна на всех трех типах почвы, при приближении к состоянию равновесия она уменьшается. В течение первых 30 мин поглощается ~97% от внесенной соли на дерново-карбонатной и серой лесной почвах и ~93% на дерново-подзолистой почве.

Данная закономерность характерна для адсорбции большинства ТМ [15,16], что обусловлено наличием множества разнообразных вакантных сорбционных центров ППК различной природы, активности и доступности на поверхности

твердой фазы в начальный момент взаимодействия почвы с раствором. При увеличении времени контакта фаз происходит постепенное насыщение сорбционных центров за счет связывания ионов металла из раствора, что влечет за собой уменьшение их количества [17]. Как следует из данных эксперимента (рис. 1, табл. 2), равновесие в системе «почва – ион никеля» наступает в среднем в течение 24 час для всех исследуемых нами типов почв, степень поглощения загрязняющего вещества достигает около 97-98% у дерново-карбонатной и серой лесной почв и 94% у дерново-подзолистой почвы.

Как известно [18], до наступления состояния равновесия на пористом сорбенте процесс сорбции включает четыре основных стадии: транспортировку адсорбтива, внешнюю диффузию пленки, внутренний (пористый) перенос, собственно адсорбция. На начальном этапе за счет диффузии либо турбулентного перемешивания адсорбтив движется в гидродинамическом пограничном слое адсорбента, от толщины которого зависит скорость переноса. Через него вследствие молекулярной диффузии адсорбтив попадает уже на поверхность самого адсорбента, по порам которого он перемещается к адсорбционным центрам благодаря молекулярной диффузии в поровом растворе (диффузия поры) либо диффузии по поверхности адсорбента (поверхностная диффузия). На заключительной стадии процесса адсорбтив становится адсорбатом, прикрепляясь к поверхности адсорбента с достаточно высокой

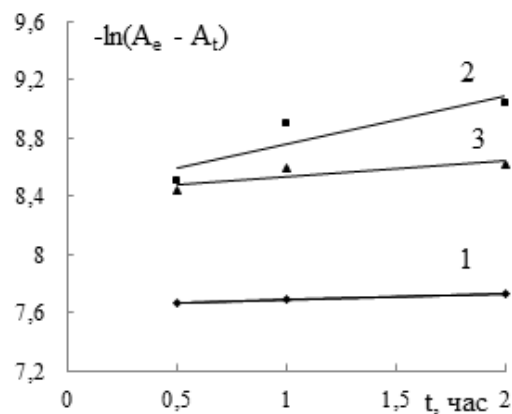


Рис. 2. Кинетические кривые внешне-диффузионных процессов ионов никеля в почве: 1 – дерново – подзолистой; 2 – дерново – карбонатной; 3 – серой лесной
 Fig. 2. Kinetic curves of external diffusion processes of nickel ions in soil: 1 – sod-podzolic; 2 – sod-carbonate; 3 – grey forest soil

скоростью, из чего следует, что скорость массопереноса зависит от одного из предыдущих этапов.

Изучая кинетику сорбции, устанавливают какая стадия – диффузионная или химическая является лимитирующей стадией процесса. Диффузионная кинетика подразделяется на внешнедиффузионную и внутридиффузионную: первая определяется временем переноса ионов из раствора к сорбенту, вторая характеризуется временем переноса ионов сорбтива внутри самого сорбента. Химическая кинетика зависит от времени химического взаимодействия ионов сорбтива с сорбентом, не учитывая время диффузии [6].

Экспериментальные кинетические кривые были обработаны посредством уравнений диффузионной кинетики для определения механизма процесса сорбции. Внешнедиффузионные процессы характеризуются прямолинейной зависимостью, представленной в координатах $-\ln(A_e - A_t) - t$ [19], где A_e – величина сорбции в равновесном состоянии, моль·кг⁻¹; A_t – величина сорбции в момент времени t , моль·кг⁻¹. Кривые сорбции ионов никеля для дерново-подзолистой и дерново-карбонатной почв в течение всего времени описываются прямыми линиями, в то время как для серой лесной почвы линейность наблюдается только на

начальном этапе (рис. 2). Следовательно, диффузия ионов металла через раствор к поверхности сорбента, контролирующая общую скорость процесса, в большей степени проявляется в случае дерново-подзолистой и дерново-карбонатной почв.

Вклад внутренней диффузии в процесс сорбции оценивают посредством эмпирического уравнения [20]:

$$A_t = k_d \cdot t^{1/2}, \quad (3)$$

где A_t – величина сорбции, моль/кг, во время t , k_d – константа скорости внутренней диффузии, моль·кг⁻¹·час^{-0.5}; t – время сорбции, час.

Однако, в большинстве случаев [19] зависимость $A_t - t^{1/2}$ является мультилинейной, состоящей из 2 – 3 участков, описываемая уравнением

$$A_t = k_d \cdot t^{1/2} + A, \quad (4)$$

где A – характеризует толщину граничного слоя.

Из анализа экспериментальных данных следует, что во всех случаях процесс диффузии ионов никеля на изучаемых почвах удовлетворительно описывается уравнением (4), поэтому можно предположить, что кинетика процесса смешанная. Вычисленные методом наименьших квадратов константы внутренней диффузии представлены в табл. 2. Согласно полученным данным, константы скорости внутренней диффузии никеля в дерново-подзолистой и серой лесной почвах

имеют близкие значения, а в дерново-карбонатной почве – на порядок меньше. Толщина граничного слоя А максимальна у дерново-подзолистой почвы, минимальна – у серой лесной почвы, дерново-карбонатная почва имеет среднее значение. Статистическая значимость коэффициента корреляции R зависимости величины сорбции ионов никеля от квадратного корня времени контакта для всех почв имеет высокие значения.

В случае химического взаимодействия ППК с ионами никеля вклад в кинетику может вносить стадия собственно химической реакции между сорбируемым ионом металла и функциональными группами сорбента, поэтому для определения вклада химической стадии были использованы модели псевдо-первого и псевдо-второго порядка [19]. Линейные формы этих моделей представлены уравнениями (5) и (6) соответственно:

$$\ln(A_e - A_t) = \ln A_e - k_1 t, \quad (5)$$

$$t/A_t = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{1}{A_e} t, \quad (6)$$

где A_e и A_t – количество сорбированного иона никеля на единицу массы почвы в состоянии равновесия и в момент времени t; k_1 – константа скорости сорбции в модели псевдо-первого порядка; k_2 – константа скорости сорбции в модели псевдо-второго порядка.

Уравнение псевдо-первого порядка (5) идентично уравнению плёночной диффузии: оно контролирует в самом начале скорость адсорбции в эксперимен-

тах с перемешиванием, при этом скорость процесса зависит как от размера частиц сорбента, так и от толщины пленки. Если ограничения идут от химической реакции, в этом случае скорость сорбции зависит только от концентрации ионов и температуры, следовательно, у модели псевдо-первого порядка диффузия предшествует сорбции.

Согласно уравнению (5) зависимость $\ln(A_e - A_t) - t$ является прямой линией, позволяющей определить параметры k_1 и A_e , представленные в табл. 3. Несмотря на достаточно высокие коэффициенты корреляции R для дерново-подзолистой и серой лесной почв значения A_e , полученные экспериментальным путем и по уравнению (5), не совпадают. В исследуемых условиях не получается описать кинетику сорбции ионов никеля дерново-карбонатной почвой из-за низкой величины аппроксимации.

Параметры уравнения псевдо-второго порядка k_2 и A_e , представленные в табл.3, были определены из зависимости $t/A_t - t$ методом наименьших квадратов. Сравнение параметров моделей псевдо-первого и псевдо-второго порядков при определении механизмов сорбции ионов никеля почвами Удмуртии (табл. 3) показывает, что в изученных условиях уравнение псевдо-второго порядка описывает экспериментальные данные с высокими значениями коэффициента корреляции R для всех исследуемых типов почв. Кроме

Таблица 3. Кинетические параметры процесса сорбции ионов никеля на почвах УР
 Table 3 Kinetic parameters of nickel ion sorption on the soils of Udmurt Republic

A_e , экспер моль·кг ⁻¹	Псевдопервый порядок			Псевдовторой порядок		
	$k_1 \cdot 10^{-3}$ моль·кг ⁻¹ ·час ⁻¹	A_e моль·кг ⁻¹	R	$k_2 \cdot 10^{-6}$, кг·моль ⁻¹ ·час ⁻¹	A_e , моль·кг ⁻¹	R
Дерново-сильноподзолистая слабосмытая						
0.00697	0.67	0.00425	0.907	0.68	0.00669	0.99
Дерново-карбонатная выщелоченная слабосмытая						
0.00645	0.69	0.00128	0.221	2.97	0.00636	0.99
Серая лесная оподзоленная						
0.00635	3.33	0.00070	0.897	1.74	0.00634	0.99



того, рассчитанные по уравнению (6) величины сорбированного иона никеля на единицу массы почвы в состоянии равновесия A_e дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными значениями. Вычисленные величины константы скорости в модели псевдо-второго порядка весьма незначительны, что свидетельствует о контроле процесса сорбции иона металла почвой химической реакцией. Максимальная константа скорости зафиксирована у дерново-карбонатной почвы, что обусловлено высоким средством ионов никеля ко всем реакционным центрам ППК [8]. Минимальные значения константы скорости дерново-подзолистой почвы можно объяснить минимальным количеством гумуса (табл. 1) по сравнению с другими почвами и существенным количеством полуторных оксидов, приводящих к преобладанию специфического механизма сорбции, что соответственно отражается на скорости процесса [8]. Средняя величина константы сорбции серой лесной почвы объясняется, по нашему мнению, превалированием ионообменного механизма сорбции ионов никеля [8], обусловленного высоким содержанием гумуса (табл. 1).

Таким образом, лимитирующей стадией процесса является химическая реакция ионного обмена. Исходя из [21,22], можно предположить, что реакция между ионами никеля и функциональными группами сорбента относится к реакции второго порядка, и они взаимодействуют в соотношении 1: 1.

Список литературы

1. Аристархов А.Н., Харитонов А.Ф. Состояние и методология прогноза загрязнения почв тяжелыми металлами // *Плодородие*. 2002. № 3. С. 22-24.
2. Леднёв А.В., Ложкин А.В., Поздеев Г.А. Ремедиация агродерново-подзолистой почвы, загрязненной никелем // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 6. С. 31-35. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019631-35>.

Заключение

Установлено, что в процессе сорбции ионов никеля почвами Удмуртии более 90% внесенного количества металла поглощается в течение двух часов. Время достижения сорбционного равновесия в системе «ион никеля – почва» составляет порядка 24 часов. Значение максимальной сорбционной емкости составляет $0.00697 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$ у дерново-подзолистой почвы, $0.00645 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$ у дерново-карбонатной и $0.00635 \text{ моль} \cdot \text{кг}^{-1}$ у серой лесной почвы.

Показано, что механизм поглощения ионов никеля ППК достаточно сложен. В результирующую скорость сорбции вносят вклад как диффузионные процессы, так и стадия химического взаимодействия между сорбтивом и функциональными группами почвы. Кинетика данного процесса является комбинацией внешней и внутренней диффузионной кинетики и лучше описывается моделью реакции псевдо-второго порядка.

Полученные результаты необходимо учитывать при осуществлении экологического мониторинга и рекультивации загрязненных земель.

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.

3. Ramachandran V., D'Souza S.F. Adsorption of nickel by Indian soils // *J. of Soil Sci. and Plant Nutrition*. 2013. Vol. 13. No. 1. P. 165-173. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000015>
4. Moreira C.S., Casagrande J.C., Alleoni L.R.F., D'Camargo O.A., Berton R.S. Nickel adsorption in two Oxisols and an Alfisol as affected by pH, nature of the electrolyte, and ionic strength of soil solution // *J. of Soils and Sediments*. 2008. Vol. 8. P. 442-451.



5. Зыкина Н.Г., Кузнецов М.Ф. К вопросу о фоновом содержании некоторых микроэлементов (V, Ni, Ti, Sn, Sc, Sr, Y, Yb) в почвах Удмуртии // *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле*. 2020. Т. 30. Вып. 1. С. 43-52. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-43-52>.
6. Жукова Л.А., Гуламова Н.В., Глебова И.В. Основные закономерности кинетики сорбции ионов циркония серыми лесными почвами Центрального черноземья // *Известия ТСХА*. 2008. Вып. 2. С. 25-31.
7. Карпова А.Ю., Шумилова М.А. сорбционная способность дерново-подзолистой почвы по отношению к ионам никеля // *Химическая физика и мезоскопия*. 2019. Т. 21. № 2. С. 262-266. <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.2.28>.
8. Шумилова М.А., Петров В.Г. Исследование механизмов поглощения ионов никеля почвой Удмуртии // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2020. Т. 20. №5. С. 594-601. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/3052>.
9. Ковриго В.П. Почвы Удмуртской Республики: монография. Ижевск. РИО ИжГСХА. 2004. 490 с.
10. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М. МГУ. 2009. 148 с.
11. Салдадзе К.М., Копылова-Валова В.Д. Комплексообразующие иониты (комплекситы). М. Химия. 1980. 336 с.
12. Методика количественного химического анализа. Определение металлов в питьевой, минеральной, природной, сточной воде и в атмосферных осадках атомно-абсорбционным методом. М-02-902-125-2005. С-Пб. 2005. 28 с.
13. Сосорова С.Б., Цыремпилов Э.Г., Болонева Л.Н., Лаврентьева И.Н., Убугунов В.Л. Сорбция свинца аллювиальной почвой Западного Забайкалья (Республика Бурятия) // *Известия ТСХА*. 2019. Вып. 6. С. 5-22. <https://doi.org/10.34677/0021-342x-2019-6-5-22>.
14. Онлайн расчет линейной регрессии методом наименьших квадратов. Режим доступа: <https://www.chemastu.ru/science/lsq/> (дата обращения 29.04.2021).
15. Шакирова В.В., Садомцева О.С., Кошкин Е.М., Кожина А.Д. Исследование процессов сорбции некоторых ионов тяжелых металлов на природных материалах // *Естественные науки. Химия*. 2016. Т. 57. № 4. С. 118-124.
16. Рогова О.Б., Водяницкий Ю.Н. Сорбция цинка и меди в почвах зоны воздействия Череповецкого металлургического комплекса // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2010. № 65. С. 65-74. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-65-74>
17. 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.
18. Фенелонов В.Б. Введение в физическую химию формирования супрамолекулярной структуры адсорбентов и катализаторов. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2004. 442 с.
19. Алосманов Р.М. Исследование кинетики сорбции ионов свинца и цинка фосфорсодержащим катионитом // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер.2. Химия*. 2011. Т. 52. № 2. С. 145-148.
20. Li N., Bai R. Copper adsorption on chitosan – cellulose hydrogel beads: behaviors and mechanisms // *Separ. Purific. Technol.* 2005. Vol. 42. no. 3. P. 237-247.
21. Неудачина Л.К., Петрова Ю.С., Засухин А.С., Осипова В.А., Горбунова Е.М., Ларина Т.Ю. Кинетика сорбции ионов тяжелых металлов пиридилэтилированным аминокпропилполисилоксаном // *Аналитика и контроль*. 2011. Т. 15. № 1. С. 87-95.



22. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G. Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review // *Separ. Purif. Methods*. 2000. Vol. 29. P. 189-232.

References

1. Aristarkhov A.N., Kharitonova A.F. Sostoyaniye i metodologiya prognoza zagryazneniya pochv tyazhelymi metallami. *Fertility*. 2002; 3: 22-24. (In Russ.).

2. Lednev A.V., Lozhkin A.V., Pozdeev G.A. Remediatsiya agrodernovo-podzolistoy pochvy, zagryaznennoy nikelom. *Russian agricultural science*. 2019; 6: 31-35. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019631-35>. (In Russ.).

3. Ramachandran V., D'Souza S.F., Adsorption of nickel by Indian soils *J. of Soil Sci. and Plant Nutrition*. 2013; 13(1): 165-173. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000015>.

4. Moreira. C.S., Casagrande. J.C., Aleoni. L.R.F., D'Camargo O.A., Berton R.S., Nickel adsorption in two Oxisols and an Alfisol as affected by pH, nature of the electrolyte, and ionic strength of soil solution. *J. of Soils and Sediments*. 2008; 8: 442-451.

5. Zykina N.G., Kuznetsov M.F. K voprosu o fonovom sodержanii nekotorykh mikroelementov (V, Ni, Ti, Sn, Sc, Sr, Y, Yb) v pochvakh Udmurtii. *Bulletin of the Udmurt University. Series Biology. Earth sciences*. 2020; 30(1): 43-52. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2020-30-1-43-52>. (In Russ.).

6. Zhukova L.A., Gulamova N.V., Glebova I.V. Osnovnyye zakonomernosti kinetiki sorbtsii ionov tsirkoniya serymi lesnymi pochvami Tsentral'nogo chernozem'ya. *Izvestiya TAA*. 2008; 2: 25-31. (In Russ.).

7. Karpova A.Yu., Shumilova M.A. Sorbtsionnaya sposobnost' derno-podzolistoy pochvy po otnosheniyu k ionam nikelya. *Chemical Physics and Mesoscopy*. 2019; 21(2): 262-266. <https://doi.org/10.15350/17270529.2019.2.2> 8. (In Russ.).

8. Shumilova M.A., Petrov V.G. Issledovaniye mekhanizmov pogloshcheniya

ionov nikelya pochvoy Udmurtii. *Sorbtsionnye I khromatograficheskiye protsessy*. 2020; 20(5): 594-601. <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2020.20/3052>. (In Russ.).

9. Kovrigo V.P. Pochvy Udmurtskoy Respubliki. Izhevsk. IzhSAA Publ. 2004. 490 p.

10. Krechetov P.P., Dianova T.M. Khimiya pochv. Analiticheskiye metody issledovaniya. M. MSU Publ. 2009. 148 p. (In Russ.).

11. Saldadze K.M., Kopylova-Valova V.D. Kompleksoobrazuyushchiye iony (kompleksity). M. Khimiya Publ. 1980. 336 p. (In Russ.).

12. Quantitative chemical analysis technique. Determination of metals in drinking, mineral, natural, waste water and atmospheric precipitation by the atomic absorption method. M-02-902-125-2005. St. Petersburg. 2005. 28 p. (In Russ.).

13. Sosorova S.B., Tsyrempilov E.G., Boloneva L.N., Lavrentyeva I.N., Ubugunov V.L. Sorbtsiya svintsa allyuvial'noy pochvoy Zapadnogo Zabaykal'ya (Respublika Buryatiya). *Izvestiya TAA*. 2019; 6: 5-22. (In Russ.).

14. On-line calculation of linear regression by the least squares method. Available at: <https://www.chem-astu.ru/science/lsq/> (accessed 29 April 2021). (In Russ.).

15. Shakirova V.V., Sadomtseva O.S., Koshkin E.M., Kozhina A.D. Issledovaniye protsessov sorbtsii nekotorykh ionov tyazhelykh metallov na prirodnykh materialakh, *Natural Sciences. Chemistry*. 2016; 57(4): 118-124. (In Russ.).

16. Rogova O.B., Vodyanitsky Yu.N. Sorbtsiya tsinka i medi v pochvakh zony vozdeystviya Cherepovetskogo metallurgicheskogo kompleksa. *Bulletin of the Soil Institute named after V.V. Dokuchaev*. 2010; 65: 65-74. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2010-65-65-74>. (In Russ.).

17. Pankin A.A., Linnik V.N., Molotok E.V. Kinetika sorbtsii ionov tyazhelykh metallov pochvoy. *Bulletin of Polotsk State University. Series C: Basic Sciences*. 2006; 10: 181-183. (In Russ.).



18. Fenelonov V.B. Vvedeniye v fizi-cheskuyu khimiyu formirovaniya supramolekulyarnoy struktury adsorbentov i katalizatorov. Novosibirsk. SB RAS Publ. 2004. 442 p. (In Russ.).

19. Alosmanov R.M. Issledovaniye kinetiki sorbtсии ionov svintsа i tsinka fosforsoderzhashchim kationitom. *Vestn. Moscow University. Ser. 2: Chemistry*. 2011; 52(2): 145-148. (In Russ.).

20. Li N., Bai R., Copper adsorption on chitosan – cellulose hydrogel beads: behaviors and mechanisms. *Separ. Purific. Technol.* 2005; 42(3): 237-247.

21. Neudachina L.K., Petrova Yu.S., Zasukhin A.S., Osipova V.A., Gorbunova E.M., Larina T.Yu. Kinetika sorbtсии ionov tyazhelykh metallov piridiletirovannym aminopropilpolisiloksanom. *Analytics and control*. 2011; 15(1): 87-95. (In Russ.).

22. Ho Y.S., Ng J.C.Y., McKay G., Kinetics of pollutant sorption by biosorbents: review. *Separ. Purif. Methods*. 2000; 29: 189-232.

Информации об авторах / Information about the authors

М.А. Шумилова – к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории информационно-измерительных систем, доцент, Удмуртский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

В.Д. Петров – д.х.н., ведущий научный сотрудник лаборатории информационно-измерительных систем, Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

M.A. Shumilova – senior researcher at the laboratory of information and measurement systems, Ph.D (chemistry), associate professor, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: shumilovama@udman.ru
V.G. Petrov – Leading Researcher at the laboratory of information and measurement systems, grand Ph.D (chemistry), Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS, Izhevsk, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 28.12.2021; одобрена после рецензирования 14.03.2022; принята к публикации 14.04.2022.

The article was submitted 28.12.2021; approved after reviewing 14.03.2022; accepted for publication 14.04.2022.