

Научная статья
УДК 546.711:542.67
EDN: NNNBMP
DOI: 10.21285/achb.897



Применение углеродных сорбентов для извлечения марганца из растворов

В.И. Дударев*✉, Л.А. Минаева**

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

**Средняя общеобразовательная школа № 5, г. Усолье-Сибирское, Российская Федерация

Аннотация. Марганец – один из наиболее часто встречающихся элементов в природных водах. Он является биомикроэлементом, потребность в котором для человеческого организма составляет 5–7 мг в сутки. Недостаток содержания марганца в питьевой воде может приводить к негативным последствиям в жизнедеятельности человека. В то же время большое содержание марганца в воде и повышенное суточное его потребление приводят к блокированию ферментов, задействованных в процессах перевода неорганического иода в органический и в дальнейшем изменении неактивного диодотиронина в действующий гормон тироксин. Нами изучена возможность применения углеродных сорбентов, обладающих микропористой структурой, для изменения содержания марганца в водных растворах. Адсорбционная способность марганца существенно зависит от кислотности среды. Наибольшая величина адсорбции катионов марганца (II) наблюдается в слабощелочной среде (pH 7,5). Кинетические исследования показали, что взаимодействие может быть описано уравнением псевдопервого порядка. Константа скорости реакции, вычисленная графическим и расчетным вариантами, составила 0,067 с⁻¹. Функциональная оценка адсорбционного процесса может быть представлена изотермами мономолекулярной адсорбции, которые в целом описываются классическим уравнением Ленгмюра. Параметры характеристических констант адсорбции: предельная величина адсорбции – 1,68 ммоль/г, константа адсорбционного равновесия – 0,979×10³ при температуре 298 К. Энергия Гиббса при 298 К равна -7,41 кДж/моль. Изучение процесса при повышенных температурах 308, 318 и 328 К указывает на его экзотермический характер. Величина предельной адсорбции при нагревании снижается.

Ключевые слова: марганец, углеродные сорбенты, извлечение из растворов

Для цитирования: Дударев В.И., Минаева Л.А. Применение углеродных сорбентов для извлечения марганца из растворов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 1. С. 35–40. DOI: 10.21285/achb.897. EDN: NNNBMP.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Use of carbon sorbents to extract manganese from solutions

Vladimir I. Dudarev*✉, Ludmila A. Minaeva**

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Secondary School no. 5, Usolye-Sibirskoye, Russian Federation

Abstract. One of the most common elements present in naturally occurring waters, manganese is an essential trace element, whose daily intake requirement by the human body is around 5–7 mg. While a lack of manganese in drinking water can lead to negative health consequences, a high manganese content in water and increased daily intake leads to the blocking of enzymes used in the conversion of inorganic iodine to organic, additionally changing inactive diiodothyronine into the active hormone thyroxine. The study investigates the possibility of using carbon sorbents having a microporous structure to change the manganese content in aqueous solutions. The adsorption capacity of manganese significantly depends on the acidity of the medium. The highest adsorption value of manganese (II) cations is observed in a weakly alkaline medium (pH 7.5). Kinetic studies demonstrated the possibility of describing the interaction using a pseudo first-order equation. The reaction rate constant as calculated by graphical and computational variants was 0.067 s⁻¹. A functional assessment of the adsorption process can be represented by

© Дударев В.И., Минаева Л.А., 2024

monomolecular adsorption isotherms, which are described by the classical Langmuir equation. The characteristic adsorption constant parameters were as follows: limiting adsorption value – 1.68 mmol/g; adsorption equilibrium constant – 0.979×10^3 at a temperature of 298 K. Gibbs energy at 298 K is equal to – 7.41 kJ/mol. The study of the process at elevated temperatures of 308, 318 and 328 K indicates its exothermic nature. With heating, the limiting adsorption decreases.

Keywords: manganese, carbon sorbents, extraction from solutions

For citation: Dudarev V.I., Minaeva L.A. Use of carbon sorbents to extract manganese from solutions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(1):35-40. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.897. EDN: NNHBMF.

ВВЕДЕНИЕ

Марганец является наиболее часто встречающимся элементом во всех типах природных вод [1]. Особенно характерно его присутствие в подземных источниках воды [2], которые, в свою очередь, широко используются для питьевых целей и обеспечения водой различных земельных участков сельскохозяйственного и бытового назначения [3]. По данным государственных докладов 2020–2021 гг.^{1,2}, среднее содержание соединений марганца в природных источниках и водоемах Прибайкалья колеблется в широких пределах от 190 до 780 мкг/дм³. Вместе с тем предельно допустимые концентрации марганца в воде питьевого и рыбохозяйственного назначения не должны превышать 0,01 мг/дм³ [4]. При концентрациях, превышающих эти значения, у воды ухудшаются органолептические свойства, наблюдается розовая окраска и неприятный вкус. Количество марганца, попавшего в водоемы со сточными водами в 2020 г. в Иркутской области, составило 6,25 т¹. Анализ более 200 проб воды в Прибайкалье показал превышение содержания марганца в основных водоемах региона от 2,2 до 7,8 предельно допустимых концентраций¹.

Марганец является микробиоэлементом, потребность в котором для человеческого организма составляет 5–7 мг в сутки. Недостаток количественного содержания данного элемента в питьевой воде может приводить к негативным последствиям в жизнедеятельности человека, так как марганец входит в состав ферментной системы энергетического обмена (пируваткиназы), ферментной системы антиоксидантной защиты (супероксиддисмутазы) и ДНК-полимеразы, играет важную роль в синтезе холестерина, полисахаридов, гемоглобина [5, 6]. В то же время при дефиците иода повышенное количество марганца в питьевой воде может приводить к угнетению функции щитовидной железы. Также избыточное содержание марганца в воде и чрезмерное его суточное потребление приводит к блокированию ферментов, задействованных в процессах перевода неорганического иода в органический и в дальнейшем в изменении неактивного диодотиронина в действующий гормон тироксин [7, 8].

Анализ работ, связанных с оптимизацией содержания марганца в природных водах, показывает, что в основном деманганация водных растворов, содержащих избыток ионов марганца (II), сводится к окислению его до четырехвалентного состояния и осаждению мало-растворимого в воде диоксида марганца [9]. Одним

из актуальных и перспективных методов извлечения марганца из природных вод может быть адсорбционный обмен [10, 11], поскольку сорбционные методы выделения марганца из различных водных растворов позволяют регулировать концентрации металла в необходимых интервалах [12]. Для выполнения адсорбционных процессов, связанных с марганцем, используются активированные угли и углеродные сорбенты [13, 14], цеолиты, а также другие природные материалы [15–17] и даже отходы сельскохозяйственного и промышленного производства [18]. Нами исследована возможность применения углеродных сорбентов для выделения ионов марганца (II) из водных растворов и регулирования его содержания.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Углеродные адсорбенты синтезированы из природных каменных углей по стандартным схемам технологической переработки с применением высокотемпературной карбонизации и последующей активационной обработки смесью перегретого пара и углекислого газа [12]. Углеродный сорбент АД-05-2 с базовой крупностью частиц $2 \pm 0,5$ мм имеет технические характеристики и параметры пористой структуры, представленные в табл. 1 и 2. Его можно отнести к пористым материалам с преобладающей микропористой структурой.

Таблица 1. Характеристические параметры углеродных сорбентов

Table 1. Chemical parameters of carbon sorbents

Параметр	Значение
Гранулометрический состав, % при массовой доле кусков размером:	
– более 2,0 мм, не более	5,00
– 0,5–2,0 мм, не менее	90,00
– менее 0,5 мм, не более	5,00
Насыпная плотность, г/см ³	0,55
Механическая прочность (по ГОСТ 16188), %, не менее	68,00
Суммарный объем пор (по воде), см ³ /г, не менее	0,60
Удельная поверхность, м ² /г, не менее	550,00
Сорбционная активность по йоду, %, не менее	50,00

¹О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году: государственный доклад. Иркутск: Изд-во ООО «Мегапринт», 2020. 314 с.

²О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2020 году: государственный доклад. Иркутск: Изд-во ООО «Мегапринт», 2021. 330 с.

Таблица 2. Параметры пористой структуры

Table 2. Parameters of the porous structure

Параметр	Значение
Параметры объема пор:	
V_{Σ} , см ³ /г	0,60
W_s , см ³ /г	0,30
$V_{\text{микропор}}$, см ³ /г	0,26
$V_{\text{мезопор}}$, см ³ /г	0,04
$V_{\text{макропор}}$, см ³ /г	0,30
Параметры микропористой структуры:	
X_0 , нм	0,6100
δ , нм	0,0697
E , кДж/моль	21,3000

Примечание. V_{Σ} – суммарный объем микро-, мезо- и макропор; W_s – предельный объем адсорбционного пространства; X_0 – полуширина микропор для максимума кривой распределения; δ – дисперсия, характеризующая интервал распределения пор; E – характеристическая энергия адсорбции.

Адсорбционное взаимодействие ионов марганца (II) исследовали в статических условиях с использованием стандартных методов переменных навесок и переменных концентраций [10]. По результатам кинетических исследований определяли время установления равновесия в системе сорбент – раствор соли металла. В качестве сорбатов применяли модельные растворы. Для приготовления растворов использовали соли $MnCl_2$ и $MnSO_4 \cdot 5H_2O$ квалификации «х.ч.», серную кислоту квалификации «ч.д.а.» и бидистиллированную воду. Концентрацию ионов металла варьировали от 0,2 до 2,0 ммоль/дм³. Время контактирования сорбента с растворами металла составляло до 72 ч. Адсорбцию при повышенных температурах 298, 308, 318 и 328 К проводили в термостатированной установке с перемешиванием растворов на магнитной мешалке ММ-5 (группа компаний «Гранат», Россия). Для определения области рН максимальной адсорбции ионов марганца (II) строили зависимости сорбции от рН в диапазоне от 1 до 12. Кислотность растворов контролировали на универсальном иономере ЭВ-74 (Завод измерительных приборов г. Гомель, СССР) со стеклянным электродом. Последовательность выполнения действий заключалась в следующем: к навеске сорбента 0,1 г приливали 50 см³ раствора соли марганца и доводили до объема 100 см³ буферным раствором. Смесь перемешивали в течение 30 мин. Концентрацию ионов марганца (II) по ходу процесса сорбции определяли фотометрическим методом по методике анализа, основанной на окислении его соединений до перманганат-ионов MnO_4^- в кислой среде персульфатом аммония на фотоколориметре КФК-3 (Загорский оптико-механический завод, Россия) в присутствии в качестве катализатора ионов серебра [19]. Периодически устанавливали содержание марганца в сорбенте. При этом высушенный материал подвергали разложению при кипячении в смеси концентрированных азотной и серной кислот. Количественное содержание марганца определяли после

полного разложения образца. Дополнительно выполняли контроль результатов атомно-абсорбционным анализом по стандартной методике [20]. Правильность результатов оценивали при помощи статистических методов и методики сравнительной оценки данных [21].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

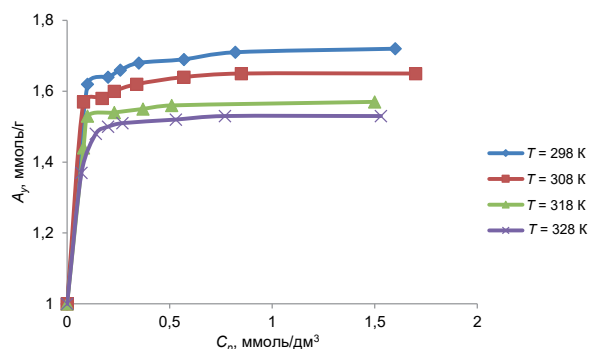
Государственные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области за 2020 и 2021 гг. показывают, что целых шесть административных регионов области содержат марганец в качестве приоритетного загрязнителя водной среды^{1,2}. При попадании в почву марганец подвергается биологическому восстановлению или окислению в соединения с промежуточными степенями окисления металла +2 и +4. Конечный результат зависит от значения рН среды, температуры, аэрации почвы, и затем он попадает в воду. Для повышения потребительских качеств природной воды необходима разработка приемов и методов очистки данных соединений и доведения их до кондиционного состояния, одним из вариантов которого может быть корректировка содержания марганца с помощью адсорбционной технологии.

Количество A_y ионов марганца (II), адсорбирующихся на углеродном сорбенте, определяли по уравнению (1):

$$A_y = (C_{\text{и}} - C_p) \times V_{\text{р-ра}}/m, \quad (1)$$

где $C_{\text{и}}$ – концентрация катионов марганца (II) в исходном растворе, ммоль/дм³; C_p – равновесное содержание катионов в растворах после процесса адсорбции, ммоль/дм³; $V_{\text{р-ра}}$ – объем раствора, дм³; m – навеска сорбента, применяемого для процесса адсорбции, г.

При изучении адсорбционного процесса установлено, что извлечение ионов марганца (II) существенно зависит от кислотности среды. Наибольшая величина адсорбции катионов марганца(II) наблюдается в слабощелочной среде при рН = 7,5. Кинетические исследования показали, что адсорбционное взаимодействие в системе металлосодержащий раствор – углеродный сорбент протекает достаточно интенсивно и равновесие устанавливается за 45 мин. При исходной концентрации металла 0,18–0,27 ммоль/дм³ за 30–45 мин достигается 80–90%-я степень насыщения сорбента. Вероятно, определяющей стадией кинетики процесса адсорбции в изученных условиях является диффузия внутри гранул сорбента, то есть процесс адсорбции реализуется в условиях «гелевой» кинетики и скорость адсорбции тормозится внутридиффузионными процессами [12]. Исследования показали, что взаимодействие может быть описано уравнением псевдопервого порядка. Константу скорости реакции вычисляли с использованием кинетических данных графическим и расчетным способами [20]. Для расчета применили следующее уравнение: $k = u/\Delta C$, где u – скорость изменения концентрации во времени; ΔC – изменение концентрации. Константа скорости сорбции марганца (II) равна 0,067с⁻¹. Функциональная оценка адсорбционного процесса может быть представлена изотермами мономолекулярной адсорбции, которые в целом описываются классическим уравнением Ленгмюра [12]. Полученные изотермы адсорбции ионов марганца (II) (рисунок) можно отнести к изотермам мономолекулярной адсорбции.



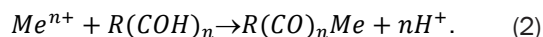
Изотермы адсорбции ионов марганца (II) на углеродном сорбенте

Isotherms of sorption of manganese ions (II) on carbon sorbent

Уравнение изотермы Ленгмюра адекватно для описания процесса достижения предельного значения сорбции $A = A_{\infty} K_c \times C / (1 + K_c \times C)$, где A – текущая величина адсорбции, ммоль/г; A_{∞} – предельная величина адсорбции, ммоль/г; K_c – константа адсорбционного равновесия; C – концентрация раствора, ммоль/дм³. Известное преобразование уравнения Ленгмюра позволяет получить уравнение прямой линии в координатах $1/A = f(1/C): 1/A = 1/A_{\infty} + (1/A_{\infty} K_c) \times 1/C$, с помощью которого графическим способом вычисляются характеристические постоянные A_{∞} и K_c . Численные значения их следующие: $A_{\infty} = 1,68$ ммоль/г, $K_c = 0,979 \times 10^3$ при температуре 298 К. Энергию Гиббса определяли по формуле $\Delta G = -RT \ln K_c$, где ΔG – энергия Гиббса; R – универсальная газовая постоянная 8,314 Дж/(моль×К); T – температура реакционной среды; K_c – константа равновесия. Энергия Гиббса при 298 К равна -7,41 кДж/моль. Изучение процесса при повышенных температурах 308, 318 и 328 К указывает на его экзотермический характер. Величина предельной адсорбции при нагревании снижается.

Наиболее вероятно, что адсорбционная способность амфотерного углеродного сорбента, использованного в работе, объясняется тем, что на поверхности пор присутствуют активные центры, определяющие его

катионообменные свойства [17]. Извлечение ионов марганца (II) из раствора протекает предпочтительно по ионообменному типу с обменом ионов металла из раствора на протоны в твердой фазе сорбента, о чем свидетельствует понижение равновесного значения pH от 7,5 до 7,1. В этом случае уравнение процесса адсорбции может быть представлено в таком виде:



Осуществляется процесс замещения в гидроксильных группах, закрепленных на углеродной поверхности, с выделением протонов, что и приводит к понижению pH системы при протекании адсорбции. Равновесный процесс адсорбции будет описываться уравнением с константой равновесия:

$$K_c = [R(CO)_nMe] \times [H^+]^n / [Me^{n+}] \times [R(COH)_n]. \quad (3)$$

Учитывая, что концентрации $[R(CO)_nMe]$ и $[R(COH)_n]$ в уравнении (3) должны быть приняты за константы, можно заключить: кроме температуры процесс адсорбции в основном зависит от концентрации ионов металла в растворе и кислотности среды, что и наблюдается на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование углеродных сорбентов для извлечения марганца из водных растворов показало, что максимальная адсорбция катионов марганца (II) наблюдается в слабощелочной среде при pH 7,5. Константа скорости адсорбции марганца (II) составила $0,067 \text{ с}^{-1}$. Изотерма адсорбции описывается уравнением Ленгмюра. Характеристические константы уравнения сорбционного процесса $A_{\infty} = 1,68$ ммоль/г и $0,979 \times 10^3$ при температуре 298 К. Энергия Гиббса при 298 К составляет -7,41 кДж/моль. Проведение процесса при повышенных температурах 308, 318 и 328 К указывает на его возможный экзотермический характер. Величина предельной адсорбции при нагревании снижается. Понижение общей кислотности равновесной системы после адсорбции позволяет предположить, что адсорбционное выделение ионов марганца (II) из раствора идет предпочтительно по ионообменному типу.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иваницкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость ее учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2016. N 6. С. 3–72. EDN: WBALCN.
2. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основные закономерности геохимии марганца. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2013. 40 с.
3. Khabaz-Saberi H., Rengel Z., Wilson R., Setter T.L. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2010. Vol. 173, no. 1. P. 103–112. DOI: 10.1002/jpln.200900063.
4. Трубачева Л.В., Лоханина С.Ю., Леонтьева А.Н. Определение содержания ионов марганца в образце для контроля состава природных вод // Вестник Удмур-

тского университета. Серия физика и химия. 2011. N 2. С. 80–86. EDN: OESQST.

5. Левина Э.Н. Общая токсикология металлов. Л.: Медицина, 1972. 184 с.

6. Pankau C., Nadolski J., Tanner H., Cryer C., Di Girolamo J., Haddad C., et al. Examining the effect of manganese on physiological processes: invertebrate models // Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology. 2022. Vol. 251. P. 109209. DOI: 10.1016/j.cbpc.2021.109209.

7. Мазунина Д.Л. Негативные эффекты марганца при хроническом поступлении в организм с питьевой водой // Экология человека. 2015. N 3. С. 25–31. EDN: TMITFB.

8. Williams M., Todd G.D., Roney N., Crawford J., Coles C., McClure P.R., et al. Toxicological profile for manganese. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2012. 506 p.

9. Дударев В.И., Минаева Л.А., Филатова Е.Г. Аналитический обзор методов очистки природных и технологических вод от марганца: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 124 с.

10. Краснова Т.А., Беляева Е.Е., Беляева О.В., Гора Н.В., Иванова Л.А. Использование углеродных сорбентов для удаления марганца из водных сред // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. N 7. С. 18–24. DOI: 10.35776/VST.2022.07.03. EDN: OPPBQZ.

11. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. Л.: Химия, 1982. 168 с.

12. Синтез, свойства и применение углеродных адсорбентов: кол. монография / под ред. А.А. Фомкина. М.: ИД «Граница», 2021. 312 с.

13. Rachel N.Y., Nsami N.Ju., Placide B.B., Daouda K., Abega A.V., Benadette T.M., et al. Adsorption of manganese (II) ions from aqueous solutions onto granular activated carbon (GAC) and modified activated carbon (MAC) // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology. 2015. Vol. 2, no. 8. P. 606-614.

14. Chowdhury Z.Z., Zain S.M., Rashid A.K., Rafiu R.F., Khalid K. Breakthrough curve analysis for column dynamics sorption of Mn (II) ions from wastewater by using *Mangostana garcinia* peel-based granular-activated carbon // Journal of Chemistry. 2013. P. 959761. DOI: 10.1155/2013/959761.

15. Ястребов К.Л., Дружинина Т.Я., Надршин В.В.,

Карлина А.И. Подготовка и очистка природных и сточных вод: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 564 с. EDN: TJNFUX.

16. Калюкова Е.Н., Письменко В.Т., Иванская Н.Н. Адсорбция катионов марганца и железа природными сорбентами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2010. Т. 10. N 2. С. 194–200. EDN: MUEQJSJ.

17. Гимаева А.Р., Валинурова Э.Р., Игдавлетова Д.К., Кудашева Ф.Х. Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2011. Т. 11. N 3. С. 350–356. EDN: NWGXVT.

18. Холомейдик А.Н., Земнухова Л.А. Удаление ионов марганца из водных растворов сорбентами на основе рисовой шелухи // Экология и промышленность России. 2011. N 11. С. 34–35. EDN: OJMGLH.

19. Марченко З. Фотометрическое определение элементов. М.: Мир, 1971. 502 с.

20. Лаврухина А.К., Юкина Л.В. Аналитическая химия марганца. М.: Наука, 1974. 219 с.

21. Марочкина В.В., Буева Е.И., Кулагина Е.С. Сравнительный анализ методик определения хрома, ванадия, меди, никеля, марганца в сталях и чугунах методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. N 2-2. С. 57–64. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-57-64. EDN: SUQAWB.

REFERENCES

1. Yanin E.P., Kuz'mich V.N., Ivanitskii O.M. Regional natural heterogeneity of the chemical composition of surface water and the need to take it into account when assessing their ecological state and intensity of technogenic pollution. *Problemy okruzhayushchei sredy i prirodnikh resursov*. 2016;6:3-72. (In Russian). EDN: WBALCN.

2. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Basic regularities of manganese geochemistry*. Syktyvkar: Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2013, 40 p. (In Russian).

3. Khabaz-Saberi H., Rengel Z., Wilson R., Setter T.L. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2010;173(1):103-112. DOI: 10.1002/jpln.200900063.

4. Trubacheva L.V., Lohanina S.Yu., Leontyeva A.N. Analysis of the concentration of Mn-ions in a sample to control chemical composition of natural water resources. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya fizika i khimiya*. 2011;2:80-86. (In Russian). EDN: OESQST.

5. Levina E.N. *General toxicology of metals*. Leningrad: Meditsina; 1972, 184 p. (In Russian).

6. Pankau C., Nadolski J., Tanner H., Cryer C., Di Girolamo J., Haddad C., et al. Examining the effect of manganese on physiological processes: invertebrate models. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2022;251:109209. DOI: 10.1016/j.cbpc.2021.109209.

7. Mazunina D.L. Manganese negative effects in body chronic intake with drinking water. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*. 2015;3:25-31. (In Russian). EDN: TMITFB.

8. Williams M., Todd G.D., Roney N., Crawford J., Coles C., McClure P.R., et al. *Toxicological profile for manganese*. Atlanta: Agency for Toxic Substances and Disease Registry; 2012, 506 p.

9. Dudarev V.I., Minaeva L.A., Filatova E.G. *Analytical review of methods for cleaning natural and technological waters from manganese*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2013, 124 p. (In Russian).

10. Krasnova T., Belyaeva E., Belyaeva O., Gora N., Ivanova L. The use of carbon sorbents to remove manganese from aqueous media. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water Supply and Sanitary Technique*. 2022;7:18-24. (In Russian). DOI: 10.35776/VST.2022.07.03. EDN: OPPBQZ.

11. Smirnov A.D. *Sorption water purification*. Leningrad: Khimiya; 1982, 168 p. (In Russian).

12. A.A. Fomkin *Synthesis, properties and application of carbon adsorbents*. Moscow: Granitsa; 2021, 312 p. (In Russian).

13. Rachel N.Y., Nsami N.Ju., Placide B.B., Daouda K., Abega A.V., Benadette T.M., et al. Adsorption of manganese (II) ions from aqueous solutions onto granular activated carbon (GAC) and modified activated carbon (MAC). *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. 2015;2(8):606-614.

14. Chowdhury Z.Z., Zain S.M., Rashid A.K., Rafiue R.F., Khalid K. Breakthrough curve analysis for column dynamics sorption of Mn (II) ions from wastewater by using *Mangostana garcinia* peel-based granular-activated carbon. *Journal of Chemistry*. 2013;959761. DOI: 10.1155/2013/959761.

15. Yastrebov K.L., Druzhinina T.Ya., Nadrshin V.V., Karlina A.I. *Preparation and purification of natural and waste waters*. Irkutsk State Technical University; 2014, 564 p. (In Russian). EDN: TJNFUX.

16. Kaljukova E.N., Pismenko V.T., Ivanskaya N.N. Adsorption of manganese and iron cations by natural sorbents. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2010;10(2):194-200. (In Russian). EDN: MUEQJSJ.

17. Gimaeva A.R., Valinurova E.R., Igdavletova D.K., Kudasheva F.Ch. Sorption of heavy metals ions from water by the activated carbon adsorbents. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2011;11(3):350-356. (In Russian). EDN: NWGXVT.

18. Kholomeydik A.N., Zemnoukhova L.A. Removal of manganese ions from water solutions by sorbents based on rice husk. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;11:34-35. (In Russian). EDN: OJMGLH.

19. Marchenko Z. *Photometric determination of elements*. Moscow: Mir; 1971, 502 p. (In Russian).

20. Lavrukina A.K., Yukina L.V. *Analytical chemistry of manganese*. Moscow: Nauka; 1974, 219 p. (In Russian).

21. Marochkina V.V., Bueva E.I., Kulagina E.S. Comparative analysis of methods for the determination of chromium, vanadium, copper, nickel, and manganese in steel and cast iron by flame atomic absorption spectrometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2023;89(2):57-64. (In Russian). DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-57-64. EDN: SUQAWB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дударев Владимир Иванович,

д.т.н., профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

Минаева Людмила Анатольевна,

учитель физики,
Средняя общеобразовательная школа № 5,
665452, г. Усолье-Сибирское, пр. Космонавтов, 1,
Российская Федерация,
llyda@yandex.ru

Вклад авторов

В.И. Дудаев, Л.А. Минаева выполнили
экспериментальную работу, на основании
полученных результатов провели обобщение
и подготовили рукопись.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.06.2023.
Одобрена после рецензирования 25.12.2023.
Принята к публикации 29.02.2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Dudarev,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉ vdudarev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2378-7574>

Ludmila A. Minaeva,

School Teacher,
Secondary School no. 5,
1, Kosmonavtov Ave, Usolye-Sibirskoye, 665452,
Russian Federation,
llyda@yandex.ru

Contribution of the authors

Vladimir I. Dudarev, Ludmila A. Minaeva
carried out the experimental work,
on the basis of the results summarized
the material and wrote the manuscript.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 28.06.2023.
Approved after reviewing 25.12.2023.
Accepted for publication 29.02.2024.