



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/10684

Исследование сорбции ионов Sr и Ni из природной воды на ферритизированном цеолитсодержащем туфе Холинского месторождения

**Валентина Алексеевна Никашина¹✉, Инна Борисовна Серова¹,
Татьяна Георгиевна Кузьмина¹, Владислав Евгеньевич Огнев¹**

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия,
nikashina_v@mail.ru ✉

Аннотация. Цель исследования- оценить сорбционные свойства ферритизированного цеолитсодержащего туфа (ФЦСТ) Холинского месторождения (Бурятия, Читинская обл.) по отношению к ионам Sr²⁺ и Ni²⁺-элементам различной природы- из растворов, моделирующих минерализацию природных вод. Определен химический и фазовый состав исследуемых образцов ЦСТ и ФЦСТ. Определены изотермы сорбции Sr²⁺ из модельного раствора питьевой воды на природной и аммонийной формах ЦСТ и ФЦСТ. Исследована кинетика сорбции Sr²⁺ на ЦСТ и ФЦСТ из поверхностной питьевой воды и выходные кривые Sr²⁺ из модельного раствора артезианской воды. Показано, что ФЦСТ работает намного эффективнее.

Исследована сорбция Ni²⁺ как наименее сорбируемого иона из семейства тяжелых переходных металлов из 0.003 н раствора CaCl₂ (модельный раствор питьевой воды) в равновесных и неравновесных условиях при pH=6.1-6.7. Показано, что в этих условиях сорбция Ni²⁺ невелика, выходные кривые Ni²⁺ имеют внешнедиффузионный характер. По-видимому, в этих условиях Ni²⁺ взаимодействует только с ОН-группами магнетита и его производными (маггемит и т.д.). Показано также, что при pH=8.0-8.3 сорбция Ni²⁺ резко возрастает.

Ключевые слова: ферритизированный цеолитсодержащий туф, сорбция стронция, никеля, речная вода, артезианская вода, изотермы, кинетика сорбции, влияние pH.

Для цитирования: Никашина В.А., Серова И.Б., Кузьмина Т.Г. Огнев В.Е. Исследование сорбции ионов Sr и Ni из природной воды на ферритизированном цеолитсодержащем туфе Холинского месторождения // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 5. С. 630-637. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10684>

Original article

Studying the sorption of Sr and Ni ions from natural water on a ferritized zeolite-containing tuff of the Kholinskoe deposit

Valentina A. Nikashina¹✉, Inna B. Serova¹, Tatyana G. Kuzmina¹, Vladislav E. Ognev¹

¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, nikashina_v@mail.ru ✉

Abstract. The purpose of our study was to assess the sorption properties of a ferritized zeolite-containing tuff (FZCT) of the Kholinskoe deposit (Republic of Buryatia, the Chita region) towards Sr²⁺ and Ni²⁺ ions, i.e. elements of different nature, from solutions simulating the mineralisation of natural water. We determined the chemical and physical composition of the studied samples of ZCT and FZCT. Isotherms were obtained for the sorption of Sr²⁺ from the model solution of drinking water on a natural and ammonium forms of ZCT and FZCT. We also studied the kinetics of sorption of Sr²⁺ on ZCT and FZCT from the surface drinking water and



output curves of Sr^{2+} from the model solution of artesian water. FZCT appeared to be significantly more effective.

We also investigated the sorption of Ni^{2+} as an ion having the smallest sorption activity of all the heavy transition metals from a 0.003 n solution of CaCl_2 (model solution of drinking water) under equilibrium and non-equilibrium conditions with $\text{pH}=6.1-6.7$. The study demonstrated that under these conditions the sorption of Ni^{2+} is low and the output curves of Ni^{2+} are of an external diffusion nature. Apparently, Ni^{2+} interacts only with OH-groups of magnetite and its derivatives (maghemite, etc.) under the said conditions. When $\text{pH}=8.0-8.3$, the sorption of Ni^{2+} increases dramatically.

Keywords: ferritized zeolite-containing tuff, strontium sorption, nickel sorption, river water, artesian water, sorption isotherms and kinetics, effect of the pH.

For citation: Nikashina V.A., Serova I.B., Kuzmina T.G., Ognev V.E. Studying the sorption of Sr and Ni ions from natural water on a ferritized zeolite-containing tuff of the Kholinskoe deposit. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2022. 22(5): 630-637. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/10684>

Введение

Получению магнитоактивных сорбентов путем их ферритизации последние десятилетия уделяется все большее внимание и главным компонентом при этом является магнетит (Fe_3O_4) [1-6]. Способов получения магнетита и магнитоактивных сорбентов описано очень много, но главное внимание уделяется получению наночастиц магнетита, т.к. они характеризуются уникальными свойствами, такими как супермагнетизм, большой поверхностью и отношением поверхность/объем, низкой токсичностью, возможностью разделения фаз с помощью магнитного поля, что позволяет извлекать загрязнения, например, радионуклиды из почв различной природы, очищать высокоомутные растворы и т.д. В работах [3-4] показана способность оксидов Fe сорбировать соединения различной природы вследствие наличия на их поверхности OH-групп. В зависимости от pH среды поверхность оксидов может быть заряжена положительно (+) или отрицательно (-). Ферритизируют природные и синтетические сорбенты [7-8], магнетит используют как ядро, покрытое оболочкой из органических полимеров, имеющих ионообменные свойства, а также как самостоятельный сорбент [9-10]. Ранее в наших исследованиях были представлены результаты извлечения из почв, илов радионуклидов (Sr, Cs) ферритизированным магнитоактивным природным клиноптилолитсодержащим туфом. Была показана

эффективность использования ферритизированных природных цеолитов для очистки загрязненных почв различной природы [12-13]. Большой интерес представляет более широкое и детальное исследование сорбционных свойств ферритизированных природных цеолитов в динамических условиях, что может значительно расширить области их применения [14-15]. Нами детально были исследованы физико-химические свойства цеолитсодержащих туфов, модифицированных магнетитом [16].

Цель представляемого исследования – оценить сорбционные свойства ферритизированного цеолитсодержащего туфа Холинского месторождения (Бурятия, Читинская обл.) по отношению к ионам стронция и никеля – элементам различной природы – из растворов, моделирующих минерализацию природных вод (например, артезианская вода, содержащая значительные количества стабильного стронция и поверхностная московская вода, загрязненная тяжелыми металлами).

Экспериментальная часть

Ферритизацию (намагничивание) цеолитсодержащего туфа (ЦСТ) осуществляли двумя методами. Первый – с использованием солей 2-х и 3-х валентного железа, подробно описанный в патенте [12]. Второй метод, более экономичный, с использованием 2-х валентного железа, растворов NH_4NO_3 и NaOH , нагревания на

водяной бане и барботирования полученной смеси воздухом. Методы подробно описаны в статье [16]. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определены размеры частиц магнетита и равномерность их распределения на поверхности ЦСТ. Более равномерное «напыление» магнетитом имеет место на ЦСТ, модифицированном по первому методу – частицы магнетита имеют размеры (30 и более нм), по второму – 25-30 нм. Зафиксировано присутствие в пробах свободного магнетита. Все это необходимо учитывать при анализе результатов по сорбции Sr^{2+} и Ni^{2+} на ферритизированных ЦСТ.

Химический состав исходного и намагниченного ЦСТ получен методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгено-флуоресцентном спектрометре Axios Advanced PANalytical (Нидерланды) и приведен в табл. 1. Фазовый состав исследуемых образцов определен на дифрактометре PANalytical Empyrean и приведен в табл. 2.

Для понимания механизма сорбции ионов различной природы на ферритизированных ЦСТ (ФЦСТ) были предприняты следующие исследования:

– исследование сорбции Sr^{2+} из 0.003 н раствора $CaCl_2$, моделирующего природную питьевую воду, и 0.006 н $CaCl_2$, моделирующего артезианскую воду, на природном и ферритизированном ЦСТ в равновесных и неравновесных условиях;

– исследование сорбции Ni^{2+} , как наименее сорбируемого иона из семейства тяжелых переходных металлов, из раствора 0.003 н $CaCl_2$ в равновесных и неравновесных условиях.

Для оценки сравнительной сорбционной способности исходного и ферритизированного ЦСТ были получены изотермы сорбции Sr^{2+} из 0.003 н раствора $CaCl_2$ на исходном природном ЦСТ, на NH_4^+ -форме ЦСТ, на ЦСТ, ферритизированном двумя методами, описанными выше. Время контакта раствора и сорбента 30 суток. Исследованы динамические выходные кривые сорбции Sr^{2+} из 0.006 н раствора $CaCl_2$ на исходном природном и ферритизированном ЦСТ в зависимости от условий (скорость фильтрации раствора, масса сорбента и т.д.). Исследована кинетика сорбции Sr^{2+} из 0.003 н раствора $CaCl_2$ методом «тонкого слоя» [17] на исходном природном и ферритизированном ЦСТ. Получены изотермы сорбции Ni^{2+} на Na-форме ЦСТ Холинского месторождения и ферритизированном

Таблица 1. Химический состав исходного и ферритизированного цеолитсодержащего туфа (ФЦСТ) Холинского месторождения (масс.%)

Table 1. Chemical composition of the initial and ferritized zeolite-containing tuff (FZCT) of the Kholinskoe deposit (wt. %).

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Sr	ппп*	Сумма. %
ЦСТ	67.95	0.18	12.92	0.89	0.096	0.39	1.58	1.89	4.59	0.04	0.01	9.36	99.89
ФЦСТ	65.30	0.31	9.54	7.24	0.10	0.34	1.70	0.87	3.83	0.059	0.16	10.5	99.94

*ппп-потери при прокаливании

Таблица 2. Фазовый состав исходного природного и ферритизированного ЦСТ Холинского месторождения

Table 2. Phase composition of the initial natural and ferritized zeolite-containing tuff of the Kholinskoe deposit

Образец	Клиноптилолит, масс. %	Другие минералы	Магнетит, масс. %
ЦСТ	49	кристобалит, кварц	–
ФЦСТ	44	кристобалит, кварц	7.1

ЦСТ при pH=6.1-6.2. Исследованы динамические выходные кривые сорбции Ni^{2+} из модельных растворов поверхностных вод на ЦСТ, намагниченных двумя методами. Исследована сорбция Ni^{2+} в зависимости от pH раствора.

Обсуждение результатов

Полученные изотермы сорбции Sr^{2+} представлены на рис. 1. Как видно из представленных данных, необработанный природный ЦСТ показывает наименьшую сорбцию Sr^{2+} из модельного раствора, имитирующего состав питьевой воды. Наилучшие результаты по сорбции получены на аммонийной форме ЦСТ. Ферритизированный ЦСТ занимает

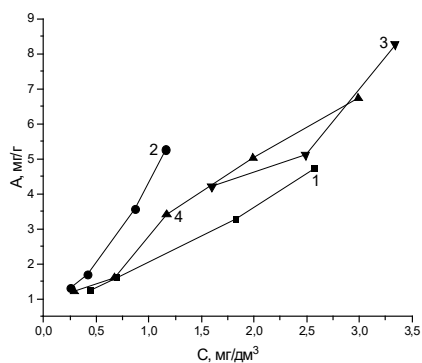


Рис. 1. Изотермы сорбции Sr^{2+} из модельного раствора природной питьевой воды (0.003 н $CaCl_2$) на ЦСТ Холинского месторождения в различных исходных катионных формах и ферритизированном ЦСТ (ФЦСТ) по 1-му и 2-му методу:

1 – природная форма, 2 – аммонийная форма, 3 – ферритизированный по 1-му методу, 4 – ферритизированный по 2-му методу

Fig. 1. Isotherms of sorption of Sr^{2+} from the model solution of natural drinking water (0.003 N $CaCl_2$) on the ZCT of the Kholinskoe deposit in various initial cation forms and on ferritized ZCT according to the first and the second method

промежуточное положение, т.к. в процессе ферритизации он частично перешел в Na-форму, произошла его активация. Сорбция стронция на образцах ЦСТ, ферритизированных разными методами, практически одинакова, т.е. способ ферритизации ЦСТ никак не влияет на сорбцию стронция.

Результаты исследования динамики сорбции стронция из модельного раствора артезианской воды (0.0065 н $CaCl_2$ + 47 мг/дм³ Sr^{2+}) на природном и ферритизированном по 1-му методу ЦСТ 2-х фракций - 0.5+0.25 мм и - 0.25+0.10 мм представлена на рис. 2. Как видно, активированный в процессе ферритизации ЦСТ работает эффективнее природного,

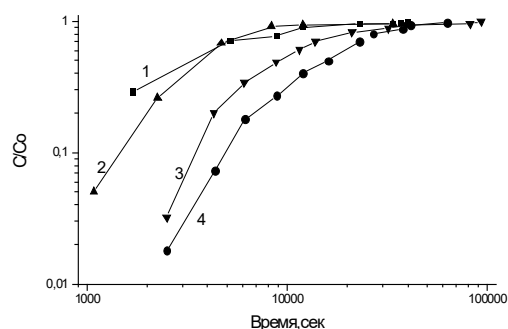


Рис. 2. Выходные кривые сорбции Sr^{2+} из модельного раствора артезианской воды состава 0.001 н $SrCl_2$ + 0.0065 н $CaCl_2$ на природном и ферритизированном ЦСТ:

1 – природный ЦСТ, фракция – 0.5+0.25 мм, высота слоя сорбента 1.4 см, диаметр колонки 0.9 см, скорость фильтрования раствора 0.59 см³/мин; 2. – ФЦСТ, фракция – 0.5+0.25 мм, высота слоя сорбента 1.6 см, диаметр колонки 0.9 см, скорость фильтрования раствора 0.60 см³/мин; 3 – природный ЦСТ, фракция – 0.25+0.10 мм, высота слоя сорбента 1.30 см, диаметр колонки 0.9 см, скорость фильтрования раствора 0.30 см³/мин; 4 – ФЦСТ, фракция – 0.25+0.10 мм, высота слоя сорбента 1.52 см, диаметр колонки 0.9 см, скорость фильтрования раствора 0.40 см³/мин.

Fig. 2. Breakthrough curves of Sr^{2+} from the model solution of artesian water with the composition 0.001 N $SrCl_2$ + 0.0065 N $CaCl_2$ on a natural and ferritized ZCT.

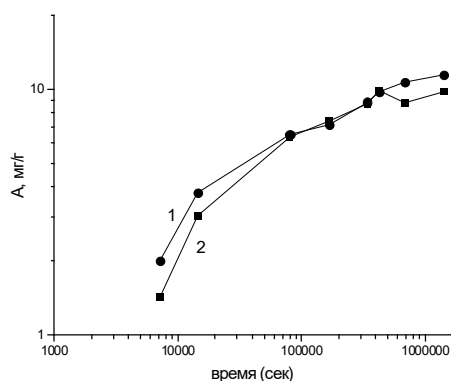


Рис. 3. Кинетика сорбции Sr^{2+} из поверхностной питьевой воды на аммонийной форме и ферритизированном ЦСТ Холинского месторождения (метод «тонкого слоя» [17]): 1 – NH_4 -форма ЦСТ, 2 – ФЦСТ.

Fig. 3. Kinetics of the sorption of Sr^{2+} from the surface drinking water on the ammonium form and ferritized ZCT of the Kholinskoe deposit (thin layer method [17]): 1 – NH_4 -form of ZCT, 2 – FZCT

но характер кинетики остается неизменным – внутридиффузионным. Исследование кинетики сорбции стронция из водопроводной воды осуществляли методом «тонкого слоя» на ранее предложенной авторами установке [17], позволяющей изучать кинетику, не используя «радиоактивные метки». Результаты сравнительных кинетических исследований сорбции стронция из водопроводной воды на ферритизированном ЦСТ и аммонийной форме ЦСТ приведены на рис. 3. Как следует из анализа полученных данных, кинетический характер сорбции стронция не меняется, т.е. Sr^{2+} не взаимодействует с поверхностью ферритизированного ЦСТ и замещает способные к обмену катионы ЦСТ практически также, как если бы этот процесс протекал на неферритизированном ЦСТ.

Ион Ni^{2+} является наименее сорбируемым ионом при сорбции на ЦСТ среди тяжелых металлов в исследуемых растворах (поверхностная питьевая вода и модельные раствора поверхностной питьевой воды). На рис. 4 приводятся изотермы сорбции Ni^{2+} на Na-форме ЦСТ

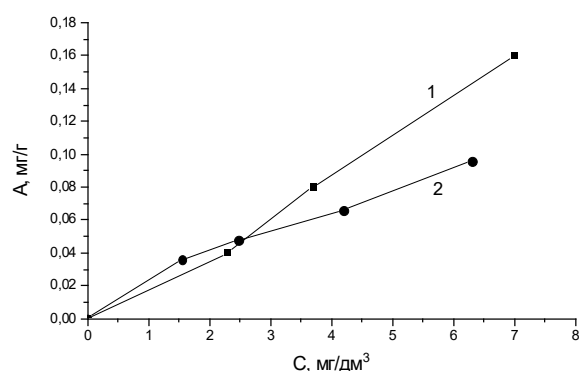


Рис. 4. Изотермы сорбции Ni^{2+} : 1 – на Na-форме ЦСТ Холинского месторождения и 2 – на ферритизированном ЦСТ по методу 2, $\text{pH}=6.1-6.2$.

Fig. 4. Sorption isotherms of Ni^{2+} : 1 – on the Na-form of ZCT of the Kholinskoe deposit 2 – on the ZCT ferritized using the second method, $\text{pH}=6.1-6.2$.

Холинского месторождения и ферритизированном ЦСТ (по методу 2), $\text{pH}=6.1-6.2$. Как видно из представленных данных, сорбция Ni^{2+} при $\text{pH} 6.1-6.2$ невелика и коэффициент распределения Ni^{2+} составляет не более $20 \text{ cm}^3/\text{g}$. Динамические эксперименты по сорбции Ni^{2+} из модельных растворов поверхностных вод на ЦСТ, намагниченных двумя методами, представлены на рис. 5. Характер выходных кривых Ni^{2+} на ФЦСТ отличается от характера выходных кривых Sr^{2+} на том же сорбенте. Он имеет внешнедиффузионный механизм лимитирования скорости сорбции, что связано с невысокой концентрацией Ni^{2+} в исходном растворе. Сопоставление выходных кривых Ni^{2+} с теоретическим решением для внешнедиффузионной динамики сорбции и линейной изотермы позволило рассчитать внешнедиффузионные коэффициенты в зависимости от скорости фильтрования. Результаты представлены на рис. 6. Для расчета динамических выходных кривых Ni^{2+} , полученных на других образцах ФЦСТ и при других скоростях фильтрации, в работе использована модель для однокомпонентной системы, линейной

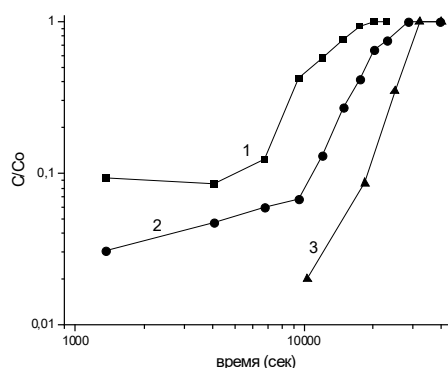


Рис. 5. Выходные кривые Ni^{2+} на ФЦСТ Холинского месторождения из модельного раствора природной воды (0.003 н $CaCl_2 + 1.5$ мг/дм³ Ni^{2+}) в зависимости от скорости фильтрации, массы сорбента и метода ферритизации. 1 – масса сорбента 2 г, $V=2.5 \cdot 10^{-2}$ см/с; 2 – масса сорбента 2 г, $V=1.45 \cdot 10^{-2}$ см/с; метод ферритизации №2; 3 – масса сорбента 4 г, скорость фильтрации $1.4 \cdot 10^{-2}$ см/с; метод ферритизации №1, $pH=6.5-6.7$.

Fig. 5. Breakthrough curves for Ni^{2+} on FZCT of the Kholinskoe deposit from the model solution of natural water (0.003 N $CaCl_2 + 1.5$ mg/dm³ Ni^{2+}) depending on the filtration speed, the mass of the sorbent, and the ferritization method

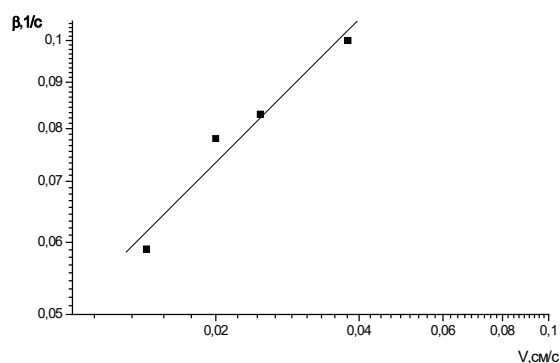


Рис. 6. Внешне-диффузионный коэффициент βNi^{2+} в зависимости от скорости фильтрации при сорбции Ni^{2+} из раствора состава: 0.003 н $CaCl_2 + 1.3$ мг/дм³ Ni^{2+} на ФЦСТ, рассчитанный из динамических выходных кривых

Fig. 6. Film diffusion coefficient βNi^{2+} depending on the speed of filtration during the sorption of Ni^{2+} from the solution: 0.003 N $CaCl_2 + 1.3$ mg/dm³ Ni^{2+} on FZCT calculated using dynamic output curves

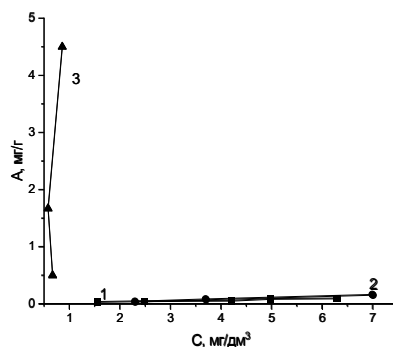


Рис. 7. Изотермы сорбции Ni^{2+} на Na-форме и ФЦСТ Холинского месторождения из поверхностной питьевой воды в зависимости от pH раствора: 1 – Na-форма, $pH=6.1-6.3$; 2 – ФЦСТ, $pH=6.1-6.3$; 3 – ФЦСТ, $pH=8.0-8.3$, время контакта 20 дней

Fig. 7. Isotherms of sorption of Ni^{2+} on an Na-form and FZCT of the Kholinskoe deposit from the surface drinking water depending on the pH of the solution.

изотермы и внешнедиффузионной динамики сорбции. Расчет показал хорошее соответствие с экспериментом. Однако следует отметить, что после перерыва в фильтрации (несколько недель) и ее последующего возобновления процесс

сорбции Ni^{2+} продолжается, но уже, как можно предположить, на самом ЦСТ. Высказывается предположение – 1-ый этап сорбции Ni^{2+} – это взаимодействие с магнетитом, описываемое моделью

внешнедиффузионной динамики сорбции для линейной изотермы, 2-этап – это сорбция, описываемая внутридиффузионной моделью уже на самом ЦСТ. Но такое взаимодействие Ni^{2+} с сорбентом проявляется только после весьма длительного контакта раствора с намагниченным ЦСТ при перерыве в фильтрации.

Отмечена зависимость сорбции ионов Ni^{2+} на ФЦСТ от pH раствора (рис. 7). Как видно из представленных данных, увеличение pH исходного раствора резко увеличивает сорбцию никеля на ферритизированном ЦСТ.

Заключение

Как следует из представленных данных, ферритизация ЦСТ активизирует сорбент, создавая условия для более глубокой диффузии ионов Sr^{2+} в цеолитсодержащий туф, и тем самым увеличивает его рабочую ионообменную емкость. Магнетит, покрывающий поверхность ЦСТ не взаимодействует со Sr^{2+} или взаимодействует в незначительной степени. Харак-

Список литературы/References

1. Gubin S.P., Koksharov YU.A., Khomutov G B., Yurkov G.YU. Magnitnye nanochasticy : metody polucheniya, stroenie i svoystva. *Uspekhi khimii*. 2005; 74(6): 539-574. (In Russ.)
2. Egunova O.R., Konstantinova T.A., Shtykov S.N. Magnitnye nanochasticy magnetita v razdelenii i koncentrirovanii. *Izv.Sarat. un-ta .Nov.ser. Khimiya. Biologiya. Ehkologiya*. 2014; 14(4): 27-34. (In Russ.)
3. Cornell R.M., Schwertmann U. The iron oxides: structure, properties reactions, occurrences and uses. Weinheim(Germany). Wiley-VCH. 2003. 664 p.
4. Jolstera R. Gunneriusson L., Holmgren A. Surface complexation modeling of $Fe_3O_4-H^+$ and magnesium (II) sorption on tomaghemite and magnetite. *J.Colloid. Interf. Sci*. 2012; 386: 260-267.

тер кинетики сорбции Sr^{2+} на ферритизированном ЦСТ такой же, как на ЦСТ в аммонийной форме.

На первом этапе сорбции Ni^{2+} взаимодействует с магнетитом, или другими оксидами Fe, которые могут присутствовать на поверхности ферритизированного ЦСТ. Сорбция Ni^{2+} при pH=6.1-6.3 невелика, и кинетика сорбции Ni^{2+} на этом этапе описывается внешнедиффузионным механизмом. При увеличении pH сорбция Ni^{2+} на ферритизированном ЦСТ резко возрастает. Следует отметить также, что после весьма длительного перерыва процесс сорбции Ni^{2+} на ФЦСТ возобновляется, это связано с взаимодействием ионов металла с основным сорбентом – ЦСТ.

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.

5. Ambashta R.D., Sillanpaa M. Water purification using magnetic assistance: A review. *J. of Hazardous Materials*. 2010; 180: 38-49.
6. Du G., Li Zh., Hanson R., Li Zh., Luok S., Hoeffner N., Wei-The-Jiang. Cr(VI) retention and transport through Fe(III)-coated natural zeolite. *J. Hazardous Materials*. 2012; 221-222.
7. Behrens S. Preparation of functional magnetic nanocomposites and hybrid materials: recent progress and future directions. *Nanoscale*. 2011; 3: 877-892.
8. Xu P., Zeng G.M., Huang D.L., Feng C.L., Hu S., Zhao M.H., Lai C., Wei Z., Huang C., Xie G.X., Liu Z.F. Use of iron oxide nanomaterials in wastewater treatment: A review. *Sci.Total Environ*. 2012; 424: 1-10.
9. Kiseleva M.S., Pryazhnikov D.V., Kurbakova I.V. Magnitnyj sorbent s mezoporistoj obolochkoj dlya odnovenennogo koncentrirovaniya ehkotoksikantov



razlichnoj prirody. *ZH. A KH.* 2018; 73(1): 14-21. (In Russ.)

10. Fan L., Luo Ch., Lv Zh., Lu F., Qiu H. Preparation of magnetic modified chitosan and adsorption Zn^{2+} from aqueous solutions. *Colloid and Surfaces B: Biointerfaces.* 2011; 574-581.

11. Sankevich N.A., Bozhko O.V., Mechkovskij S.A. Osobennosti kationnogo obmena na gibridnykh sorbentakh silikagel'-magnetit. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2006; 6(6): 954-959. (In Russ.)

12. Nikashina V.A., Serova I.B., Rudenko B.A. Kompozitsiya dlya prigotovleniya ferromagnitnogo ionoobmennika. Patent RF №94011364/26, 1994.

13. Serova I.B., Nikashina V.A. Ochistka pochv ot radionuklidov ceziya i stronciya ferromagnitnymi prirodnyimi i sinteticheskimi ceolitami. Trudy Mezhd. Konf. «Radioaktivnost' posle yadernykh vzryvov i aviarij», Gidrometeoizdat. Sankt-Peterburg. 2006; 455-460.

14. Oliveira L.C.A., Petkowicz D.I., Smaniotta A., Pergher S.B.C. Magnetic zeolites: a new adsorbent for removal of metallic contaminants from water. *Water Research.* 2004; 38; 3699-3704.

15. Huang Y., Wang W., Feng Q., Dong F. Preparation of magnetic clinoptilolite/ $CoFe_2O_4$ composites for removal of Sr^{2+} from aqueous solutions: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic Studies. *J. of Saudi Chemical Society.* 2017; 21: 58-66.

16. Nikashina V.A., Novakova A.A., Dem'yanenko A.V., Serova I.B., Katasonova O.N. Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoystv ceolitsoderzhashchikh tufov, modifitsirovannykh magnetitom. *Geokhimiya.* 2021; 66(1): 81-88.

17. Nikashina V.A., Serova I.B., Kuzmina T.G., Lihareva N.I., Petrov O.E., Gromyak I.N. Kinetics of Sr^{2+} sorption on clinoptilolite-containing tufts of different deposits from the surface drinking water. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2017; 17(6): 886-892. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2017.17/449> (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

В.А. Никашина – с.н.с., канд. хим. наук, лаборатория сорбционных методов, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН; Москва, Россия

И.Н. Серова – научный сотрудник, лаборатория сорбционных методов, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

Т.А. Кузьмина – старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук, ЦЛАВ, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

В.Е. Огнев – мл. науч. сотрудник, ЦЛАВ, Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

V.A. Nikashina – Senior Researcher, PhD (Chemistry), the sorption methods laboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAN, Moscow, Russian Federation; e-mail: nikashina_v@mail.ru; nikashina@geokhi.ru

I.B. Serova – Researcher, the sorption methods laboratory, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAN, Moscow, Russian Federation

T.G. Kuzmina – Senior Researcher, PhD (Phys.-Math.), Central laboratory of substances analysis, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAN, Moscow, Russian Federation

V.E. Ognev – Researcher Central laboratory of substances analysis, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAN, Moscow, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 13.04.2022; одобрена после рецензирования 18.07.2022; принята к публикации 25.07.2022.

The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 18.07.2022; accepted for publication 25.07.2022.