



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.72

doi: 10.17308/sorpchrom.2022.22/9225

Сорбция ионов вольфрама (VI) на цеолитсодержащих туфах месторождений Забайкалья

Сэсэг Сергеевна Санжанова[✉]

Геологический институт им. Н.Л. Добрецова Сибирского отделения Российской академии наук,
Улан-Удэ, Россия

[✉]Sanzhanova@geo.stbur.ru

Аннотация. В данной работе исследована сорбция ионов W(VI) на природных цеолитсодержащих туфах с использованием современных методов анализа, в числе которых кристалл-дифракционный спектрометр ARL Perform'X, атомно-эмиссионный спектрометр Оптима-2000 DV с ИСП (анализ вольфрама в цеолитсодержащих туфах и растворах), спектрометры PinAAcle 900 F, UNICO 1201 (силикатный анализ пород), ИК-Фурье спектрометр Termo Scientific Nikolet 6700, электронно-сканирующий микроскоп LEO 1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350. Цель работы – определить сорбционную способность природных цеолитов по отношению к ионам W(VI) из водных растворов. Выявлена высокая сорбционная емкость цеолитсодержащих туфов двух месторождений Забайкалья (Россия) при pH~8. На основании данных ИК-спектроскопии и электронной микроскопии предположено, что сорбция ионов W(VI) на цеолитсодержащих туфах в нейтрально-щелочных условиях протекает по механизму ионного обмена кальция на натрий и последующей физической сорбции на их поверхности. Таким образом, цеолитсодержащие туфы могут быть использованы в очистке промышленных растворов и стоков в нейтрально-щелочных условиях среды.

Ключевые слова: цеолитсодержащие туфы, природные сорбенты, ионы вольфрама

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту № АААА-А21-121011890033-1. Автор благодарит к.х.н. Э.Л.Зонхоеву за всестороннюю помощь в работе над статьей.

Для цитирования: Санжанова С.С. Сорбция ионов вольфрама (VI) на цеолитсодержащих туфах месторождений Забайкалья // Сорбционные и хроматографические процессы. 2022. Т. 22, № 2. С. 205-213. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9225>

Original article

Sorption of tungsten (VI) ions on zeolite-bearing tuffs of deposits in Transbaikalia

Seseg S. Sanzhanova[✉]

Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russian Federation

[✉]Sanzhanova@geo.stbur.ru

Abstract. In this study, we investigated the sorption of W(VI) ions on natural zeolite-containing tuffs using modern methods of analysis, including an ARL Perform'X crystal diffraction spectrometer, an Optima-2000 DV atomic emission spectrometer with ICP (analysis of tungsten in zeolite-containing tuffs and solutions), PinAAcle 900 F, UNICO 1201 spectrometers (silicate rock analysis), Termo Scientific Nikolet 6700 IR Fourier

spectrometer, LEO 1430VP scanning electron microscope with INCA Energy 350 energy dispersive spectrometer. The purpose of this study was to determine the sorption capacity of natural zeolites in relation to W(VI) ions from aqueous solutions. The high sorption capacity of zeolite-containing tuffs from two deposits in Transbaikalia (Russia) at pH~8 has been revealed. Based on the data of IR spectroscopy and electron microscopy, it was suggested that the sorption of W(VI) ions on zeolite-containing tuffs under neutral-alkaline conditions proceeds by the mechanism of ion exchange of calcium for sodium and subsequent physical sorption on their surface. Thus, zeolite-containing tuffs can be used in the purification of industrial solutions and effluents under neutral-alkaline environmental conditions.

Keywords: zeolite-containing tuffs, natural sorbents, tungsten ions

For citation: Sanzhanova S.S. Sorption of tungsten (VI) ions on zeolite-bearing tuffs of deposits in Transbaikalia. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022. 22(2): 205-213. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9225>

Введение

Вольфрам используется в легировании сталей и сплавов [1, 2], производстве деталей современной микроэлектроники [3], новых фототермических материалов [4]. Поскольку вольфрам относится к тяжелым химическим элементам, необходим контроль его миграции в окружающей среде. Существует потенциальная опасность загрязнения сточных вод вольфрамом при переработке жидких отходов перерабатывающей промышленности [5], твердых вольфрамсодержащих отходов [6]. В литературе освещены способы очистки воды от ионов вольфрама модифицированным монтмориллонитом [7], оксидами металлов [8, 9], ионитами [10], макропористыми смолами [11].

Ионы вольфрама в водных растворах при pH<6.5 находятся большей частью в форме вольфрамат-ионов WO_4^{2-} [12, 13]. Подкисление растворов приводит к поликонденсации и превращению в изополианионы разного состава $[W_nO_{3n+a}]^{2a-}$, в присутствии комплексообразователей образуются гетерополианионы $[R_mW_nO_{3n+a}]^{(2a+mx)-}$, конечным продуктом реакции являются труднорастворимые триоксиды $[WO_3]_n \cdot mH_2O$ [12]. В разбавленных растворах с концентрацией вольфрама $<1 \cdot 10^{-5}$ М полимеризация не происходит [13].

Природные цеолиты используются как сорбенты ионов Zn, Pb, Cu из техногенных смесей [14, 15]. Цеолитсодержащие туфы представляют собой парагенезис цеолита и примесных минералов, обладающие пористой системой из микропор,

макропор и каналов [16]. Такая развитая структура строения позволяет цеолитсодержащим туфам эффективно сорбировать различные ионы [16-18]. Цеолиты еще называют молекулярными ситами из-за их сорбционных и ионообменных свойств [17]: они имеют активные кислотные центры - поверхностные гидроксильные группы и трехкоординированные ионы алюминия; для цеолитов характерен ионный обмен между ионами матрицы и сорбата, например, Ca^{2+} на $2Na^{+}$; $Na^{+} - K^{+}$; $Na^{+}, Al^{3+} - Si^{3+}$ и $Ca^{2+}, Al^{3+} - Na^{+}, Si^{3+}$. Цель работы – выявить сорбционную способность цеолитсодержащих туфов по отношению к ионам вольфрама (VI) из водных растворов.

Экспериментальная часть

В данной работе использованы цеолитсодержащие туфы Холинского и Мухорталинского месторождений Забайкалья (далее X- и M-туфы), натрий вольфрамвокислый 2-водный (чда), 0.0001-0.05 М растворы Na_2WO_4 с pH 8 и 2, где растворы с pH 2 получены добавлением HCl. Туфы первого месторождения содержат до 70% клиноптилолита, второго – до 40% морденита.

Анализ образцов проводился в Центре коллективного пользования ГИН СО РАН (Улан-Удэ). Содержание вольфрама в твердых пробах после сорбции определялось методом РФА на спектрометре ARL Perform'X; в жидких растворах – АЭС на Оптима-2000 DV с ИСП. Силикатный анализ пород проведен «мокрым» способом, с привлечением

спектрофотометрического, потенциометрического, титриметрического и гравиметрического методов. Погрешность анализов составляла не более аттестованных значений для силикатного метода (%): SiO_2 – 0.7, Al_2O_3 – 0.74, TiO_2 – 0.028, Fe_2O_3 – 0.2, FeO – 0.31, MnO – 0.01, MgO – 0.2, Na_2O – 0.12, K_2O – 0.3, P_2O_5 – 0.001; W РФА – 0.00025, W АЭС – 0.001. Электронные микроснимки получены на микроскопе LEO 1430VP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 в режиме VP с увеличением 200-1000. Для измерений pH растворов использовался pH-метр ЭКСПЕРТ-001 с допустимой погрешностью 0.02 pH. ИК-спектры сняты на приборе Termo Scientific Nicolet 6700 в области волновых чисел $4000\text{-}700\text{ см}^{-1}$ в ЦКП ВСГУТУ (Улан-Удэ).

Изотермы сорбции ионов вольфрама (VI) сняты в статических условиях на издробленных туфах с зернением 1-2 мм при соотношении туф:сорбат 1:10 из 0.0001-0.05 М растворов Na_2WO_4 с pH 8.1 в течение 5 суток. Разделение сорбентов от сорбата проводился водоструйным насосом с бумажным фильтром. Экспериментальные данные 3-6 параллельных опытов обрабатывались с помощью программы STATISTICA 6.0.

Обсуждение результатов

Изотермы сорбции ионов W(VI) на X- и M-туфах из щелочных растворов воль-

фрамата натрия в области низких концентраций имеют прямой участок, при увеличении концентрации внешнего раствора идут на крутой подъем, затем выходят на плато (рис. 1, кривые 1 и 2). Максимальная сорбционная емкость X-туфов достигает 2.9 ± 0.5 мг-экв/г и M-туфов – 1.95 ± 0.5 мг-экв/г. При этом зафиксировано снижение pH исходного 0.1 М раствора от 8.1 ± 0.02 до 7.7 ± 0.02 . Емкость пород из растворов с pH 2 значительно ниже (X-туфов 0.09 ± 0.01 , M-туфов 0.06 ± 0.01 мг-экв/г), здесь показатель pH повысился до 2.3 ± 0.02 . Цеолитсодержащие туфы в водных растворах подвержены гидролизу [17], поэтому происходит повышение pH растворов после сорбции. В растворах с pH~8 понижение величины pH в нашем случае объясняется связыванием OH-групп с ионами Ca^{2+} цеолитов. Химический анализ пород до и после сорбции после сорбции из 0.05 М раствора вольфрамата натрия с pH~8 показывает вынос ионов, кроме Na^+ (табл. 1).

ИК-спектры исходных X-туфов (рис. 2 спектр 1) и M-туфов (рис. 2, спектр 3) характеризуются самой сильной полосой поглощения (п. п) при $\sim 1000\text{ см}^{-1}$, относящейся к антисимметричным валентным колебаниям алюмосиликатного каркаса по внешним связям [17]. К деформационным колебаниям молекул воды в спектре первого сорбента принадлежит п. п. с

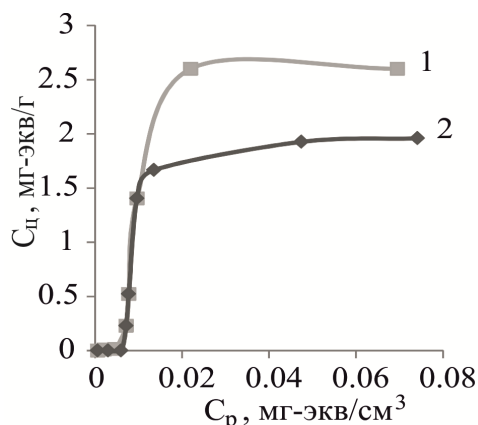


Рис. 1. Изотерма сорбции W (VI) на X-туфах (кривая 1), M-туфах (кривая 2).

Fig. 1. W (VI) sorption isotherm on X-tuffs (curve 1), M-tuffs (curve 2).

Таблица 1. Химический состав исходных пород до и после сорбции 0.05 М раствора вольфрамата натрия с рН~8, %

Table 1. Chemical composition of source rocks before and after sorption of 0.05 M sodium tungstate solution with pH~8, %

Химический состав	Х-туф		М-туф	
	до	после	до	после
SiO ₂	66.8	63.3	65.8	62.8
TiO ₂	0.74	0.69	0.11	0.09
Al ₂ O ₃	11.6	11.2	12	11.1
Fe ₂ O ₃	1.35	0.64	1.28	0.73
FeO	0.29	0.07	0.31	0.16
MnO	0.06	0.05	0.02	0.02
MgO	0.46	0.34	0.95	0.72
CaO	1.94	1.76	2.7	2.04
Na ₂ O	1.36	3.8	0.85	3.07
K ₂ O	3.91	3.88	4.11	3.03
P ₂ O ₅	0.012	0.01	0.01	0.01

максимумом при 1633 см⁻¹, в спектре второго – при 1643 см⁻¹. Следующая по интенсивности полоса с максимумом при 3731 см⁻¹ в спектре Х-туфов ответственна за валентные колебания поверхностных силанольных ОН-групп молекул воды. Аналогичные колебания с максимумом при 3744 см⁻¹ менее выразительны в спектре М-туфов. Кроме того, ИК-спектры обоих сорбентов содержат хорошо разрешенные п. п., принадлежащие колебаниям гидроксильных групп в молекулах воды: в спектре Х-туфов при 2893, 3012, 3192, 3270, 3363, 3421, 3515 см⁻¹, М-туфов – 2333, 2892, 3268, 3349, 3422, 3501, 3604, 3805, 3868 см⁻¹.

Анализ ИК-спектров после сорбции. Сорбция ионов W(VI) из 0.05 М раствора вольфрамата натрия с рН 8.1 вызвала изменения в ИК спектрах обоих исследованных туфов во всех группах характеристических частот (рис. 2, спектр 2 и 4). Так, наблюдается уменьшение интенсивности п. п. 1043 см⁻¹ у Х-туфов, 1023 см⁻¹ – М-туфов со смещением в низкочастотную область, появление слабых п. п. при 840 и 860 см⁻¹. Указанное изменение в спектрах обусловлено, вероятно, валентными колебаниями ионов вольфрама, однако наложение основных полос сорбентов в данной области не позволяет

надежно определить мерность сорбируемой формы. По справочным данным, валентные колебания ионов WO₄²⁻ проявляются при частотах 320, 405, 833, 928 см⁻¹ [19]. Полосы 990, 985, 1025 см⁻¹ характеризуют деформационные колебания δ(W–ОН) [20], которые накладываются в область влияния клиноптилолита (1074 см⁻¹) [16].

После сорбции ионов W(VI) в области волновых чисел 3400-3800 см⁻¹ в спектре Х-туфов исчезла п.п. при 3731 см⁻¹ (рис. 2, спектр 2), принадлежащая изолированным силанольным ОН-группам; появилась п.п. при 2331 см⁻¹, отсутствовавшая в спектре исходного цеолита. В спектре М-туфов (рис. 2, спектр 4) наблюдается сдвиг п.п. при 3744 см⁻¹ в низкочастотную область до 3727 см⁻¹ с возрастанием ее интенсивности, п. п. 2337 см⁻¹ становится интенсивнее.

Исчезновение поверхностных силанольных ОН-групп, предположительно, обязано физической адсорбции вольфрамат-ионов посредством образования водородной связи между кислородом вольфрамат-иона с водородом гидроксильной группы. При этом кислород сорбируемого иона оттягивает водород гидроксильной группы так, что валентные колебания гидроксильной группы проявля-

Таблица 2. Элементный состав (%) X- и M-туфов в точках, указанных на рис. 3, 4
 Table 2. Elemental composition (%) of X-tuffs and M-tuffs at the points shown in Figs. 3, 4

№	Na	Al	Si	K	Ca	W	Na	Al	Si	K	Ca	W
	X-туф исходный (рис. 3а)						X-туф после сорбции W(VI) при pH 8.1±0.02 (рис.3б)					
1	1.52	7.39	35.5	3.3	2.14	0	5.52	9.25	42.16	3.87	1.26	9.36
2	1.02	6.99	37.96	3.16	1.63	0	4.91	8.44	38.93	4.53	1.59	10.86
3	0.4	6.22	24.66	8.35	1.9	0	2.38	2.5	8.86	1.57	10.51	57.83
4	1.57	7.58	37	3.45	1.97	0	2.72	3.25	11.59	1.48	9.99	57.75
5	0.62	5.51	27.03	3.21	1.8	0	2.17	3.25	11.84	1.62	9.48	51.74
X-туф после сорбции W (VI) при pH 2±0.02(рис. 3в)						M-туф исходный (рис. 4а)						
1	1.55	6.15	33	3.14	0.5	3.22	1.83	8.79	46.2	2.98	1.94	0
2	1.91	7.29	35.26	5.04	0.4	8.6	1.5	8.57	41.67	4.66	1.6	0
3	1.11	5.64	24.28	5.66	0.25	6.76	0.87	6.19	30.56	4.75	1.31	0
4	2.14	7.83	35.52	5.88	0.31	7.09	0.51	4.53	19.67	8.27	0.56	0
5	1.03	4.94	20.17	5.64	0.27	6.76	0.42	4.27	24.12	4.33	0.48	0
M-туф после сорбции W (VI) при pH 8.1±0.02(рис.4б)						M-туф после сорбции W (VI) при pH 2±0.02 (рис. 4в)						
1	2.97	6.72	33.77	4.6	0.56	2.54	0.72	3.91	23.42	3.19	1.12	12.44
2	0.92	8.9	34.24	11	0.72	4.27	0.91	4.21	23.45	1.02	1.51	12.92
3	2.35	5.74	30.7	1.94	0.83	3.92	0.32	3.42	17.41	4.81	0.8	21.5
4	2.29	5.71	35.5	2.03	0.66	2.8	0.31	1.58	7.4	2.67	0.69	12.05
5	0.76	1.16	2.6	1.49	9.51	45.8	0.53	3.69	22.57	1.03	1.64	13.4

ются в низкочастотной области, а образование координационной связи кислорода ОН-группы с атомом металла понижает частоту валентных колебаний ОН-групп [21]. Также образование водородной связи между ионом вольфрамата и гидроксильной группой молекул воды в цеолите сказалось на уменьшении интенсивности и сдвиге п. п. в высокочастотную область от 1633 до 1639 см⁻¹ полосы деформационных колебаний воды в спектре X-туфов, аналогичный сдвиг п.п. от 1643 до 1647 см⁻¹ отмечен в спектре M-туфов.

Сорбция цеолитсодержащих туфов 0.05 М раствора вольфрамата натрия при pH 8.1 сопровождается образованием осадков на поверхности зерен и в растворе (рис. 3, 4). На электронных микрофотографиях идентифицируются прозрачно-белые кристаллы призматической формы с размерами до 3 мкм (рис. 3б, 4б). Полуколичественный анализ (табл. 2), по

данным электронного микроскопа, указывает, что кристаллы состоят из ионов кальция и вольфрама. Также силикатный состав осадка, собранного с поверхности зерен и бумажного фильтра, просушенного при 100°C до постоянной массы, подтверждает преобладающее содержание этих элементов (%): W – 49.2, CaO – 25.9, SiO₂ – 8.6, TiO₂ – 0.6, Al₂O₃ – 1.97, Fe₂O₃ – 0.1, FeO – 0.19, MnO – 0.06, MgO – 0.11, Na₂O – 0.54, K₂O – 0.4, P₂O₅ – 0.01. Это обстоятельство позволяет делать вывод о том, что в щелочной среде ионы вольфрама сорбируются на поверхности цеолитсодержащих пород, вероятно, в виде малорастворимого вольфрамата кальция.

После контакта туфов X и M с растворами W (VI) с pH 2 в ИК-спектрах значительных изменений интенсивности и смещений полос поглощения не произошло. На поверхности цеолитсодержащих

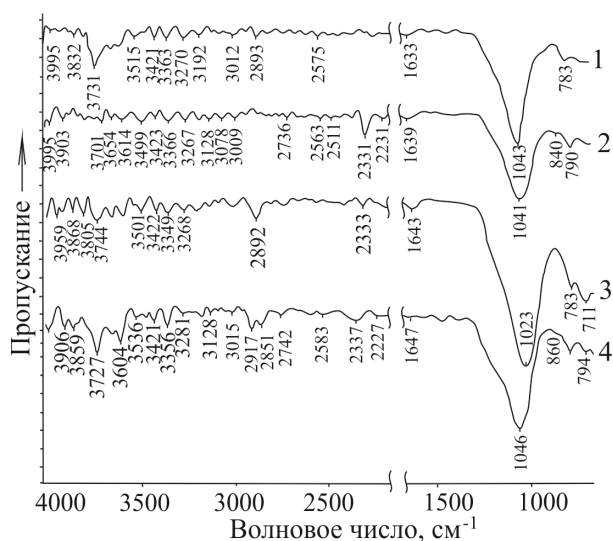


Рис. 2. ИК-спектры исходных X- и M-туфов (спектры 1 и 3), после сорбции W (VI) (спектры 2 и 4).

Fig. 2. IR spectra of initial X-tuffs and M-tuffs (spectra 1 and 3), after sorption of W (VI) (spectra 2 and 4).

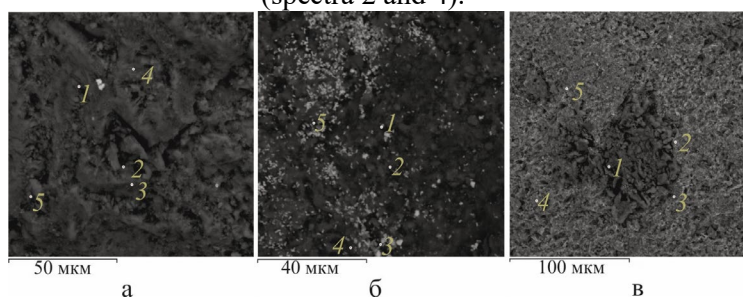


Рис. 3. Вид поверхности зерна X-туфа: исходного (а), после сорбции W (VI) при pH 8.1 (б) и pH 2 (в)

Fig. 3. Grain surface of X-tuff: initial (a), after sorption of W (VI) at pH 8.1 (b) and pH 2 (c)

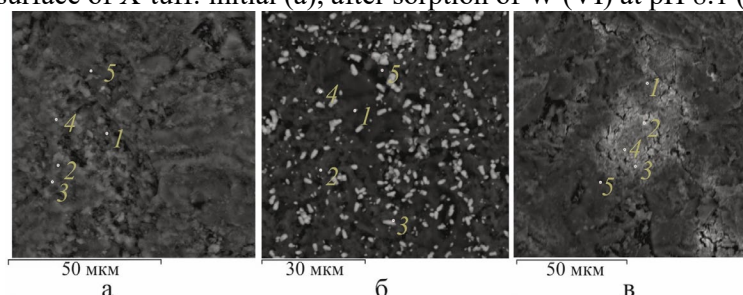


Рис. 4. Вид поверхности зерна M-туфа: исходного (а), после сорбции W (VI) при pH 8.1 (б) и pH 2 (в)

Fig. 4. Grain surface of M-tuff: initial (a), after sorption of W (VI) at pH 8.1 (b) and pH 2 (c)

туфов после сорбции в кислых условиях замечен более мелкодисперсный осадок (рис. 3 в, 4 в), в отличие от сорбции из щелочных растворов.

Закключение

Цеолитсодержащие туфы Холинского и Мухорталинского месторождений За-

байкаля в щелочной среде обладают высокой сорбционной способностью по отношению к ионам W(VI). В результате сорбции ионов вольфрама на поверхности зерен цеолитсодержащих туфов образуется кристаллическая фаза вольфрамата кальция, адсорбированная по меха-



низму физической адсорбции за счет образования водородных связей с поверхностными ОН-группами.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет из-

Список литературы

1. Fan X., Kuhn B., Pöpperlová J., Bleck W., Krupp U. Compositional optimization of high-performance ferritic (HiperFer) steels-effect of niobium and tungsten content. // *Metals*. 2020. Vol. 10. no. 10. P. 1-9.

2. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. Production of WC-15Co ultrafine-grained hard alloy from powder obtained by the electroerosive dispersion of VK15 alloy wastes in water // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021. Vol. 62. no. 1. P. 97-106.

3. Aamir L. Novel p-type Ag-WO₃ nanocomposite for low-cost electronics, photocatalysis, and sensing: synthesis, characterization, and application // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 864. 158108. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158108>

4. He C., Gao, X., Qiu X., Yu D., Guo H., Liu G. Scalable and ultrathin high-temperature solar selective absorbing coatings based on the high-entropy nanoceramic AlCrW-TaNbTiN with high photothermal conversion efficiency // *Solar RRL*. 2021. Vol. 5. no. 4. 2000790.

5. Shen L., Lia X., Lindberg D., Taskinen P. Tungsten extractive metallurgy: A review of processes and their challenges for sustainability // *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 142. 105934.

6. Danga D.H., Zhangb Z. Hazardous motherboards: Changes in metal contamination related to the evolution of electronic technologies // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 268. 115731.

7. Ординарцев Д.П., Свиридов А.В., Свиридов В.В. Адсорбционное извлечение ванадия, молибдена и вольфрама из кислых растворов на модифицированном монтмориллоните // *Физическая химия*. 2018. Т. 92. № 10. С. 1648-1652.

вестных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

8. Харламов И.П., Кривенкова Н.П., Бырко В.М. Хроматографическое разделение ниобия, молибдена и вольфрама на окиси алюминия // *Заводская лаборатория*. 1973. Т. 36. № 12. С. 1428-1433.

9. Семенов М.Н., Блохин А.А., Таушканов В.П. Применение гидратированных оксидов многовалентных металлов для глубокой очистки соединений молибдена от вольфрама // *Прикладная химия*. № 7. 1984. С. 1501-1504.

10. Холмогоров А.Г., Мохосоев М.В., Зонхоева Э.Л. Модифицированные иониты в технологии молибдена и вольфрама. Новосибирск. Наука. 1985. 181 с.

11. Zhongwei Zhao, Jialiang Zhang, Xingyu Chena, Xuheng Liu, Jiangtao Li, Weiguang Zhang. Separation of tungsten and molybdenum using macroporous resin: Equilibrium adsorption for single and binary systems // *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 140. P. 120-127.

12. Бурцева К.Г., Воропанова Л.А., Кочубей Л.А. Об изополисоединениях молибдена и вольфрама // *Неорганическая химия*. 1984. Т. 29. Вып. 6. С. 1463-1467.

13. Мохосоев М.В., Шевцова Н.А. Состояние ионов вольфрама в водных растворах. Улан-Удэ, Бурятское книжное издательство, 1977, 168 с.

14. Эпова Е.С., Еремин О.В., Филенко Р.А., Юргенсон Г.А. Изучение комплексной сорбции в системе геотехногенные растворы – цеолитовые породы // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. Т. 21. № 2. С. 207-210.

15. Buenaño X., Canoira L., Martín Sánchez D., Costafreda Zeolitic tuffs for acid mine drainage (AMD) treatment in Ecuador: breakthrough curves for Mn²⁺, Cd²⁺, Cr³⁺, Zn²⁺, and Al³⁺ // *J. Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 6794-680.

16. Цицишвили Г.В., Андроникашвили Т.Г., Киров Г.Н., Филизова Л.Д. Природные цеолиты. М. Химия. 1985. 58 с.

17. Брек Д. Цеолитовые молекулярные сита. М. Мир. 1976. 781 с.

18. Зонхоева Э.Л., Санжанова С.С. Исследование сорбционного взаимодействия в системе селенит натрия - цеолит-содержащий туф методом растровой электронной микроскопии // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2015. Т. 15. № 3. С. 404-411.

19. Накомото К. Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений. М. Мир. 1966. 151 с.

20. Матвейчук Ю.В. ИК-Фурье-спектроскопическое исследование растворов вольфрамата и молибдата натрия в широком диапазоне pH // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. Вып. 1. С. 56-63.
<https://doi.org/10.6060/tcct.2017601.5335>

21. Харланов А.Н., Шилина М.И. Инфракрасная спектроскопия для исследования адсорбционных, кислотных и основных свойств поверхности гетерогенных катализаторов. М. МГУ. 2011. 110 с.

References

1. Fan X., Kuhn B., Pöpperlová J., Bleck W., Krupp U. Compositional optimization of high-performance ferritic (HiperFer) steels-effect of niobium and tungsten content. *Metals*. 2020; 10(10): 1-9.
<https://doi.org/10.3390/met10101300>

2. Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. Production of WC-15Co ultrafine-grained hard alloy from powder obtained by the electroerosive dispersion of VK15 alloy wastes in water. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2021; 62(1): 97-106.
<https://doi.org/10.3103/S1067821221010065>

3. Aamir L. Novel p-type Ag-WO₃ nanocomposite for low-cost electronics, photocatalysis, and sensing: synthesis, characterization, and application. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 864: 158108.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158108>

4. He C., Gao, X., Qiu X., Yu D., Guo H., Liu G. Scalable and ultrathin high-temperature solar selective absorbing coatings based on the high-entropy nanoceramic AlCrW-TaNbTiN with high photothermal conversion efficiency. *Solar RRL*. 2021; 5(4): 2000790.

<https://doi.org/10.1002/solr.202000790>

5. Shen L., Lia X., Lindberg D., Taskinen P. Tungsten extractive metallurgy: A review of processes and their challenges for sustainability. *Minerals Engineering*. 2019; 142: 105934.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105934>

6. Danga D.H., Zhang Z. Hazardous motherboards: Changes in metal contamination related to the evolution of electronic technologies. *Environmental Pollution*. 2021; 268: 115731.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115731>

7. Ordinarcev D.P., Sviridov A.V., Sviridov V.V. Adsorbicnoe izvlechenie vanadiya, molibdena i vol'frama iz kislykh rastvorov na modifitsirovannom montmorillonite. *Fizicheskaya himiya*. 2018; 92(10): 1648-1652.
<https://doi.org/10.1134/S0044453718100229>

8. Harlamov I.P., Krivenkova N.P., Byrko V.M. Primenenie gidratirovannykh oksidov mnogovalentnykh metallov dlya glubokoj ochistki soedinenij molibdena ot vol'frama. *Zavodskaya laboratoriya*. 1973; 36(12): 1428-1433.

9. Semenov M.N., Blohin A.A., Taushkanov V.P. Hromatograficheskoe razdelenie niobiya, molibdena i vol'frama na okisi alyuminiya. *Prikladnaya himiya*. 1984; 7: 1501-1504.

10. Holmogorov A.G., Mohosoev M.V., Zonhоеva E.L. Modifitsirovannye ionity v tekhnologii molibdena i vol'frama. Novosibirsk. Nauka Publ. 1985. 181 p.

11. Zhongwei Zhao, Jialiang Zhang, Xingyu Chena, Xuheng Liu, Jiangtao Li, Weiguang Zhang. Separation of tungsten and molybdenum using macroporous resin: Equilibrium adsorption for single and binary systems. *Hydrometallurgy*. 2013; 140: 120-127.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.09.014>



12. Burceva K.G., Voropanova L.A., Kochubej L.A. Ob izopolisoedineniyah molibdena i vol'frama. *Neorganicheskaya himiya*. 1984; 29(6): 1463-1467.
13. Mohosoev M.V., Shevcova N.A. Sosoyaniye ionov vol'frama v vodnyh rastvorah. Ulan-Ude. Buryatskoe knizhnoe izdatel'stvo. 1977. 168 p.
14. Epova E.S., Eremin O.V., Filenko R.A., Yurgenson G.A. Izuchenie kompleksnoy sorbcii v sisteme geotekhnogennyye rastvory – ceolitovyye porody. *Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya*. 2013; 21(2): 207-210.
15. Buenaño X., Canoira L., Martín Sánchez D., Costafreda Zeolitic tuffs for acid mine drainage (AMD) treatment in Ecuador: breakthrough curves for Mn^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+} , Zn^{2+} , and Al^{3+} . *Environmental Science and Pollution Research*. 2017; 24: 6794-680. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8177-9>
16. Cicishvili G.V., Andronikashvili T.G., Kirov G.N., Filizova L.D. Prirodnyye ceolity. M. Himiya Publ. 1985. 224 p.
17. Brek D. Ceolitovyye molekulyarnyye sita. M. Mir Publ. 1976. 781 p.
18. Zonhoveva E.L., Sanzhanova S.S. Issledovaniye sorbcionnogo vzaimodeystviya v sisteme selenit natriya - ceolitsoderzhashchij tuf metodom rastrovoy elektronnoy mikroskopii. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015; 15(3): 404-411.
19. Nakomoto K. Infrakrasnyye spektry neorganicheskikh i koordinacionnykh soedineniy. M. Mir Publ. 1966. 151 p.
20. Matvejchuk Yu.V. IK-Fur'e-spektroskopicheskoye issledovaniye rastvorov vol'framata i molibdata natriya v shirokom diapazone pH. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2017; 60(1): 56-63. <https://doi.org/10.6060/tct.2017601.5335>
21. Harlanov A.N., Shilina M.I. Infrakrasnaya spektroskopiya dlya issledovaniya adsorbcionnykh, kislotnykh i osnovnykh svoystv poverhnosti geterogennykh katalizatorov. M. MGU imeni M.V.Lomonosova himicheskij fakul'tet MGU. 2011. 110 p.

Информации об авторах / Information about the authors

С.С. Санжанова – к.т.н., младший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии и геоэкологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт им. Н.Л. Добреева Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия

S.S. Sanzhanova – PhD, Junior Researcher, Dobretsov Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation, Sanzhanova7@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2021; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 18.04.2022.

The article was submitted 06.05.2021; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 18.04.2022.