

**ФІЗИЧНАЯ ХІМІЯ**  
**PHYSICAL CHEMISTRY**УДК 661.183.123  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-263-269>Поступила в редакцию 13.04.2021  
Received 13.04.2021**В. С. Солдатов, Т. А. Коршунова, Е. Г. Косандрович, П. В. Нестеронюк***Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ТИТРОВАНИЕ ХЕЛАТООБРАЗУЮЩЕГО ВОЛОКНИСТОГО СОРБЕНТА  
В ПРИСУТСТВИИ КОМПЛЕКСООБРАЗУЮЩИХ ДВУХВАЛЕНТНЫХ КАТИОНОВ**

**Аннотация.** Получены кривые титрования Н-форм волокнистого хелатного сорбента с иминодиацетатными группами на основе промышленного полиакрилонитрильного волокна Нитрон гидроксидом калия в 1М растворе КСl в присутствии хлоридов Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup>. Использованный метод позволял одновременное измерение pH раствора и концентрации двухвалентного катиона в каждой точке кривой титрования. Из этих данных были рассчитаны зависимости величин их сорбции от pH равновесного раствора. Кривые прямого и обратного титрования во всех случаях практически совпадали. По мере изменения pH при титровании наблюдалось выпадение осадков соответствующих гидроксидов. При этом возрастание pH приостанавливалось или сильно замедлялось при добавлении щелочи в ячейку для титрования. Образование осадка происходило преимущественно в растворе для Co<sup>2+</sup> и Ni<sup>2+</sup> (pH 8), когда ионит был насыщен металлическим ионом. В случае Cu<sup>2+</sup> (pH образования осадка 4) сорбция Cu<sup>2+</sup> происходит и при более низких, и при более высоких pH за счет ионизации карбоксильных групп и частичного растворения осадка. Во всех случаях максимальная сорбция Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> соответствовала образованию сорбционных комплексов типа R–N(CH<sub>2</sub>COO<sup>–</sup>)<sub>2</sub> Me<sup>2+</sup>.

**Ключевые слова:** хелатные сорбенты, иминодиацетатные группы, сорбция, ионы переходных металлов, комплексобразование

**Для цитирования.** Титрование хелатообразующего волокнистого сорбента в присутствии комплексообразующих двухвалентных катионов / В. С. Солдатов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім.навук. – 2021. – Т. 57, № 3. С. 263–269. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-2-263-269>

**V. S. Soldatov, T. A. Korshunova, E. G. Kosandrovich, P. V. Nesteronok***Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***TITRATION OF CHELATING FIBROUS SORBENT IN THE PRESENCE  
OF COMPLEX-FORMING DIVALENT CATIONS**

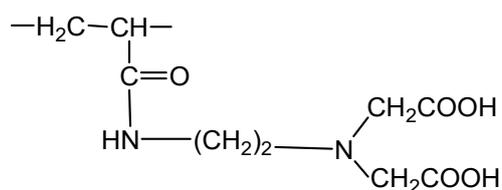
**Abstract.** Titration curves of H-forms of the fibrous chelating sorbent with iminodiacetic groups based on industrial polyacrylonitrile fiber Nitron with potassium hydroxide in 1M KCl solution in the presence of Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> chlorides were obtained. The method used made it possible to simultaneously measure the pH of the solution and the concentration of the divalent cation at each point of the titration curve. From these data, the dependences of their sorption values on the pH of the equilibrium solution were calculated. The curves of direct and back titration practically coincided in all cases. As the pH changed during titration, precipitation was observed at pH values of precipitation of the corresponding hydroxides. In this case, the increase in pH was suspended or greatly slowed down by adding alkali to the titration cell. The formation of a precipitate occurred mainly in a solution for Co<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> (pH 8), when the ion exchanger was saturated with a metal ion. In the case of Cu<sup>2+</sup> (precipitate formation pH 4), Cu<sup>2+</sup> sorption occurs at both lower and higher pH due to ionization of carboxyl groups and partial dissolution of the precipitate. In all cases, the maximum sorption of Ni<sup>2+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> corresponded to the formation of sorption complexes of the R–N(CH<sub>2</sub>COO<sup>–</sup>)<sub>2</sub>Me<sup>2+</sup> type.

**Keywords:** chelating sorbents, iminodiacetic groups, sorption, transition metal ions, complexation

**For citation.** Soldatov V. S., Korshunova T. A., Kosandrovich E. G., Nesteronok P. V. Titration of chelating fibrous sorbent in the presence of complex-forming divalent cations. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya khimicheskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 263–269 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-263-269>

**Введение.** Сетчатые полимеры с иминодиацетатными (ИДА) группами являются наиболее распространенными селективными сорбентами поливалентных катионов и широко применяются в аналитической химии и гидрометаллургии редких и драгоценных металлов [1–5]. Их основным недостатком является относительно малая скорость сорбционного процесса. Волокнистые сорбенты лишены этого недостатка [6–8]. В частности, сорбент, описанный в настоящей статье, ФИБАН X-1 нашел применение в очистке питьевой воды и сертифицированной методике измерений концентраций ионов тяжелых металлов в питьевой воде методом атомно-абсорбционной спектроскопии с предварительным сорбционным концентрированием этим волокнистым хелатообразующим сорбентом [9, 10]. Новое применение в качестве носителей микроэлементов в составе волокнистых питательных субстратов для растений этот материал может найти в космическом растениеводстве [11, 12]. Хелатные комплексы ионов переходных металлов, являющиеся микроудобрениями для растений, в настоящее время широко применяются в растениеводстве [13]. Недостатком таких микроудобрений является опасность их передозировки и строгие ограничения на введение хелатирующих соединений в почвы и сырье для пищевых продуктов. Использование нерастворимых в воде хелатных носителей микроэлементов исключает возможность попадания хелатов в раствор. Поскольку в этом случае процессы их поглощения и выделения протекают на фоне макроконцентраций ионов калия и кальция (основных катионных питательных элементов растений), сорбция этих ионов также была исследована. Это делает их перспективными в качестве компонентов волокнистых питательных сред для растений, предназначенных для использования в условиях невесомости, сильных вибраций и смен ориентации. Сильное и различное влияние на сорбцию всех катионов хелатными сорбентами оказывает pH контактирующего раствора. В статье описывается новый метод изучения равновесий в системе «сорбент–раствор КСl и микроэлемента с изменяющимся pH», заключающийся в одновременном измерении pH раствора после добавления к гетерогенной системе «сорбент–раствор» порции титранта (KOH) и иона двухвалентного металла.

**Экспериментальная часть.** Образец исследованного сорбента (торговое название ФИБАН X-1) получен в лаборатории по ранее описанному методу [14] из промышленного полиакрилонитрильного волокна Нитрон путем реакции присоединения этилендиамина по нитрильной группе с последующим алкилированием первичной аминогруппы монохлоруксусной кислотой. Его хелатообразующая группа имеет формулу:



Кроме этого, сорбент содержит карбоксильные и слабоосновные группы, не входящие в эту структуру, образующиеся в нем за счет побочных реакций в процессе синтеза. Исследование кислотно-основных свойств сорбентов этого типа показало, что он содержит три типа доминирующих кислотных групп, различающихся по кислотной силе. Исследованный образец ионита имел катионную обменную емкость 5,0 мэкв/г и содержал 0,8 мэкв/г слабоосновных групп. Его набухание в H<sup>+</sup>/Cl<sup>−</sup>-форме равно 0,60 г H<sub>2</sub>O/г на фоне 1 н. КСl. Компьютерный анализ кривой потенциометрического титрования KOH [15] показал присутствие в нем катионообменных групп со следующими значениями pK<sub>a</sub>: 3,1, 5,0 и 9,0, что соответствует первой диссоциирующей карбоксильной группе в составе ИДА, свободной карбоксильной группе и второй карбоксильной группе в ИДА. Эти значения довольно близки к полученным независимо для растворимой диэтилентетрауксусной кислоты [16].

Титрование ионита в H-форме проводили на фоне 1 н. КСl растворами KOH в присутствии избытка HCl (3–10 ммоль/г, концентрация HCl 1,75M). Добавление HCl в фоновый раствор было необходимо для полной протонизации всех кислотных и основных групп ионита и титрование начиналось с практически одинакового и очень низкого значения pH (~1), когда все виды кати-

онов еще не сорбируются ионами и целиком находятся в растворе. Если не добавлять избыток кислоты к иониту, то уже в нулевой точке (когда титрант еще не добавлен) будут получены разные значения рН для разных катионов из-за их различной сорбции ионами и информация, относящаяся к более низким рН, будет потеряна. Высокую концентрацию КОН в титранте необходимо использовать для предотвращения существенного изменения объема раствора при добавке порций титранта. В этот же раствор добавляли хлориды  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$  в количестве, превышающем возможную предполагаемую поглотительную емкость ионита. Кроме того, снимались кривые титрования ионита в их отсутствие и растворов самих солей.

Титрование проводили методом одной навески с учетом рекомендаций в работе [17]. Точная навеска нарезанных на фрагменты волокон ионита длиной 2–4 мм и массой ~ 0,5 г помещалась в исходный подкисленный раствор, содержащий хлориды двухвалентных катионов. Объем исходного раствора составлял 30 мл. Суспензию ионита в растворе постоянно интенсивно перемешивали магнитной мешалкой. Комбинированный стеклянный электрод оставался в перемешиваемой суспензии все время в процессе титрования (около 10 ч). После установления постоянного рН добавляли в суспензию порции титранта 0,15 мл микропипеткой и дополнительно контролировали взвешиванием с максимальной погрешностью  $\pm 0,4$  мг. Следующую порцию титранта вводили в ячейку для титрования после установления постоянного значения рН, изменяющегося не более чем на 0,01 единицы в течение последующих 5 мин. В это время из ячейки отбирали пробу раствора объемом 0,15 мл (контроль по массе), которую переносили в мерную колбу, подкисляли азотной кислотой для растворения возможных осадков, разбавляли и отдавали на определение концентрации двухвалентного иона на спектрометре с индуктивно связанной плазмой. По окончании титрования суспензии проводили ее обратное титрование раствором  $\text{HCl}$ . В процессе всего эксперимента ячейка для титрования была герметично закрыта для предотвращения поглощения углекислого газа из воздуха. Небольшое отверстие для введения порции титранта и отбора пробы раствора для анализа открывали на несколько секунд для выполнения этих операций. Изменение общего объема раствора за счет отобранного для анализа составляло около 2 % от исходного и в дальнейших расчетах не учитывалось. рН раствора измеряли электродом HI 1139 с иономером Hanna HI 221, концентрацию двухвалентных ионов определяли с помощью атомно-абсорбционного спектрометра Spectr AA-200 фирмы Varian.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены кривые титрования КОН суспензий «Н-форма ионита–раствор  $\text{KCl-HCl-MeCl}_2$ », включая крайние случаи этой системы: «Н-форма ионита–раствор  $\text{KCl-HCl}$ » и «раствор  $\text{KCl-HCl-MeCl}_2$ ».

Кривые прямого и обратного титрования практически совпадают, что свидетельствует о равновесности процесса в каждой точке кривых. Это же относится и к титрованию растворов самих солей. При титровании смешанных растворов  $\text{HCl-MeCl}_2$  ( $\text{Me} = \text{Ni}^{2+}, \text{Co}^{2+}, \text{Cu}^{2+}$ ) на кривых титрования имеются две вертикальные точки перегиба. Первая соответствует титрованию избыточной  $\text{HCl}$ , вторая – окончанию выпадения осадка гидроксида. В области рН между двумя точками перегиба кривая титрования имеет небольшой, но заметный наклон. Если бы осадок имел одинаковый состав в начале и конце его образования, кривая титрования должна была бы иметь плоский участок ( $\text{pH const}$ ). Наличие наклона однозначно свидетельствует о некотором непостоянстве состава осадка, что может быть связано с образованием смешанных  $\text{Me(OH)}_m\text{Cl}_n$  осадков. Расстояние между точками перегиба кривых титрования солей  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$  по шкале  $g$  ( $g_1 - g_2$ ) практически совпадает с количеством миллиэквивалентов ионов металла, добавленного к системе (таблица).

Это позволяет сделать вывод, что потенциометрическое титрование может быть использовано в качестве метода количественного определения ионов осадкообразующих металлов в водных растворах. Наиболее близка к идеальному варианту система с  $\text{CoCl}_2$ , где на КПП имеется достаточно протяженный участок постоянства рН.

Зависимость сорбции двухвалентных ионов от рН раствора рассчитывали по разнице между его введенным в ячейку количеством и обнаруженным в суспензии спектральным анализом. Соответствующие данные представлены на рис. 2. Сорбция всех изученных двухвалентных ионов начинается при очень низких рН растворов и возрастает с ростом рН до величин, близких

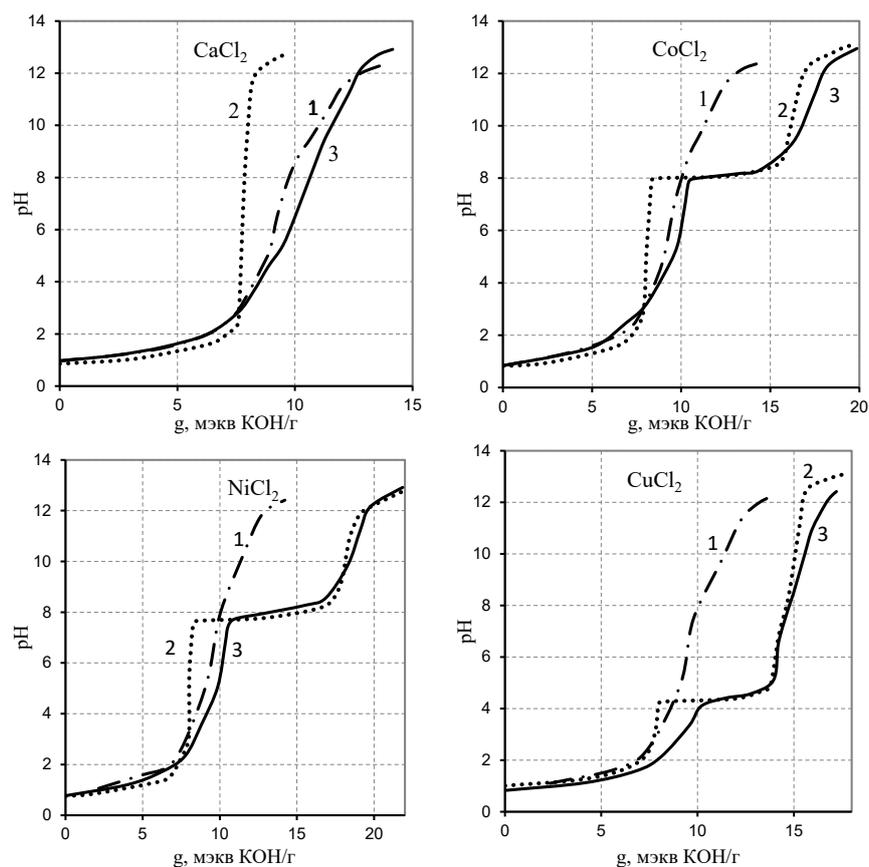


Рис. 1. Кривые титрования системы: Н-форма ионита–1 М КСl–НСl (стартовый рН 0,85) –  $\text{MeCl}_2$  (количества даны в таблице): 1 –  $\text{MeCl}_2$  отсутствует, 2 – ионит отсутствует, 3 – присутствуют все компоненты

Fig 1. Titration curves of the system: H-form of the ion exchanger – 1 M KCl – HCl (initial pH 0.85) –  $\text{MeCl}_2$  (table): 1 –  $\text{MeCl}_2$  is absent, 2 – ion exchanger is absent, 3 – all components are present

к обменной емкости сорбента по карбоксильным группам, равной 5,0 мэкв/г. При достижении рН величин осадкообразования наблюдается резкий перегиб кривых титрования и сорбции с последующим плато. Присутствие в системе сорбента может препятствовать осадкообразованию.

Кривые титрования и сорбции разных катионов наряду со сходством имеют существенные индивидуальные особенности и далее будут рассмотрены по отдельности.

#### Параметры кривых титрования

#### Titration curves parameters

Ион	Добавлено, мэкв/г	$(g_1 - g_2)$ , мэкв/г	рН плато эксп.	Сорбция на плато, мэкв/г	Максимальная сорбция, мэкв/г (рН 12)
$\text{Co}^{2+}$	7,83	7,80	7,9–8,2	4,8	4,8
$\text{Ni}^{2+}$	9,74	9,70	7,7–8,0	5,0	5,0
$\text{Cu}^{2+}$	6,30	6,25	4,3–4,5	3,1	4,2

**Система  $\text{Ca}^{2+}$ – $\text{K}^+$ – $\text{H}^+$ –сорбент.** Квантовохимические расчеты структуры молекулярных моделей сорбционных комплексов кальция и иминодиацетатной группы в водной среде при достаточно высоких рН имеют классическую клешневидную структуру, в которой связи  $\text{O}-\text{Ca}^{2+}-\text{O}$  обладают электростатическим характером без признаков ковалентности. В кислотных средах одна из этих связей меняется на ион-молекулярную связь иона  $\text{Ca}^{2+}$  и атома кислорода недиссоциированной карбоксильной группы. Эта структура также довольно устойчива и обеспечивает значительную сорбцию кальция из кислотных сред. На кривых титрования ионита без добавки солей двухвалентных металлов и с добавкой  $\text{CaCl}_2$  и кривой поглощения  $\text{Ca}^{2+}$  имеется слабывы-

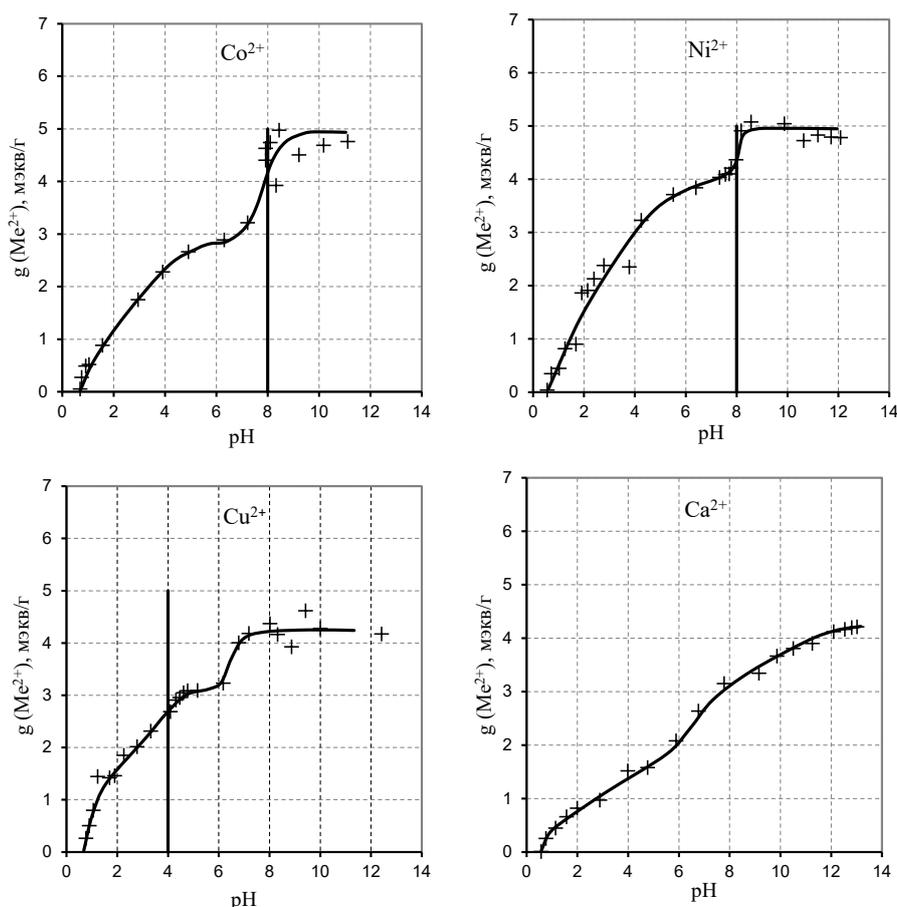


Рис. 2. Сорбция двухвалентных катионов в зависимости от pH раствора. Вертикальные линии на рисунках соответствуют pH осадкообразования

Fig. 2. Sorption of divalent cations as a function of pH. Vertical lines correspond to pH of the formation of a precipitate

раженный перегиб при pH 6 и  $g = 2$ , соответствующий окончанию титрования первой диссоциирующей группы ИДА.

**Системы  $Co^{2+}-K^+-H^+$ -сорбент и  $Ni^{2+}-K^+-H^+$ -сорбент.** Закономерности, обнаруженные для этих систем, сходны и будут рассматриваться вместе. Для обоих этих ионов справочное значение pH образования осадка гидроксидов одинаковое и равно  $\sim 8$ , что подтверждается данными рис. 1 и 2. При этих и более высоких значениях pH наблюдается плато сорбции. Величины максимальной сорбции в пределах возможной ошибки эксперимента совпадают и равны емкости сорбента 5,0 мэкв/г. Оба иона значительно более селективно поглощаются ионитом, чем  $Ca^{2+}$  при  $pH < 8$ , что связано с их более сильным взаимодействием с атомами кислорода функциональной группы и образованием дополнительной короткой связи с атомом азота. Эти связи имеют значительную долю ковалентности [9]. Кривые сорбции имеют участки медленного подъема в интервале pH 5–8, когда 50–70 % емкости ионита занята двухвалентным ионом металла. Это может быть связано со ступенчатостью кислотной диссоциации иминодиацетатной группы по первой и второй карбоксильным группам в ее структуре. При повышении pH увеличивается степень диссоциации функциональной группы по второй ступени и появляется второй фактор, способствующий росту максимальной сорбции ионов кобальта и никеля – их собственный гидролиз с образованием однозарядных ионов типа  $MeOH^+$ .

**Система  $Cu^{2+}-K^+-H^+$ -сорбент** имеет особенности, главной из которых является низкое критическое значение pH осадкообразования. Осадок  $Cu(OH)_2$  выпадает уже при  $pH \sim 4$ . При низких pH поглощение меди выше, чем никеля и кобальта. После окончания осадкообразования и выхода кривой сорбции на плато с ростом pH наблюдается еще один участок возрастания

сорбции, который, вероятно, вызван продолжающимся ростом степени нейтрализации с увеличением рН. В работе [18] с помощью *ab initio* квантовохимического расчета было показано, что при высоких рН сорбционный комплекс меди меняет структуру на более устойчивую, с чем и может быть связано возрастание ее сорбции.

**Заключение.** Получены кривые титрования Н-форм волокнистого хелатного сорбента с иминодиацетатными группами на основе промышленного полиакрилонитрильного волокна Нитрон гидроксидом калия в 1М растворе КСl в присутствии хлоридов  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . Предложен метод позволяющий одновременное измерение рН раствора и концентрации двухвалентного катиона в каждой точке кривой титрования. Из этих данных были рассчитаны зависимости величин их сорбции от рН равновесного раствора. Кривые прямого и обратного титрования во всех случаях практически совпадали. По мере изменения рН при титровании наблюдалось выпадение осадков соответствующих гидроксидов. Возрастание рН приостанавливалось или сильно замедлялось при добавлении щелочи в ячейку для титрования. Во всех случаях максимальная сорбция  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  соответствовала образованию сорбционных комплексов типа  $\text{R-N}(\text{CH}_2\text{COO}^-)_2 \text{Me}^{2+}$ .

### Список использованных источников

1. Херинг, Р. Хелатообразующие ионообменники / Р. Херинг. – М.: Мир, 1971. – 280 с.
2. Мясоедова, Г. В. Хелатообразующие сорбенты / Г. В. Мясоедова, С. Б. Саввин. – М.: Наука, 1984. – 173 с.
3. Riley, J. P. Chelating resins for the concentration of trace elements from sea water and their analytical use in conjunction with atomic absorption spectrophotometry / J. P. Riley, D. Taylor // *Anal. Chim. Acta.* – 1968. – Vol. 40. – P. 479–485. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)86764-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)86764-1)
4. Sahni, S. K. Coordination chemistry of chelating resins and ion exchanges / S. K. Sahni, J. Reedijk // *Coord. Chem. Rev.* – 1984. – Vol. 59. – P. 1–139. [https://doi.org/10.1016/0010-8545\(84\)85053-5](https://doi.org/10.1016/0010-8545(84)85053-5)
5. Bonn, G. Ion chromatography on an iminodiacetic acid bounded stationary phase / G. Bonn, S. Reiffenstuhel, P. Jandik // *J. Chromatography A.* – 2001. – Vol. 499. – P. 669–676. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(00\)97011-0](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(00)97011-0)
6. Soldatov, V. S. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers / V. S. Soldatov, A. A. Shunkevich, G. I. Sergeev // *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents.* – 1988. – Vol. 7, N 2-3. – P. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
7. Kosandrovich, E. G. Fibrous ion exchangers / E. G. Kosandrovich, V. S. Soldatov // *Ion exchange technology I: theory and materials.* – London, 2012. – P. 299–371. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9)
8. Chemically active textile materials as efficient means for water purification / V. S. Soldatov [et al.] // *Desalination.* – 1999. – Vol. 124, N 1–3. – P. 181–192. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(99\)00103-4](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(99)00103-4)
9. Soldatov, V. S. Sorption of bivalent ions by a fibrous chelating ion exchanger and the structure of sorption complexes / V. S. Soldatov, V. M. Zelenkovskii, L. A. Orlovskaya // *Reactive and Functional Polymers.* – 2011. – Vol. 71, N 1. – P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2010.11.003>
10. Orlovskaya, L. A. Sorption preconcentration of heavy metal ions in the atomic absorption analysis of background contents in drinking water / L. A. Orlovskaya // *Problemy inzhenerii srodoviska. Material XXII Miedzynar. Sympoz. AQUA-2003 / Politechnik Warszawska, Ed. Board W. Fluch [et al.].* – Plock, 2007. – P. 16.
11. Nechitaio, G. S. Space Biology: Studies at Orbital Stations / G. S. Nechitaio, A. L. Mashinsky. – Moscow: Mir, 1993. – 503 p.
12. Солдатов, В. С. Ионитные почвы / В. С. Солдатов, Н. Г. Перышкина, Р. П. Хорошко. – Минск: Наука и техника, 1978. – 270 с.
13. Микроудобрения на хелатной основе: опыт и перспективы использования / Е. Ю. Гейгер [и др.] // *Агрохимический вестник.* – 2017. – № 2. – С. 30–32.
14. Хелатные иониты на основе полиакрилонитрильного волокна с аминодиацетатными функциональными группами / Е. Г. Косандрович [и др.] // *Химия и технология новых веществ и материалов: сб. науч. тр.* – Минск: Беларуская навука, 2014. – Вып. 4. – С. 262–281.
15. Acid-base properties of ion exchangers. I. Optimising of potentiometric titration of ion exchangers exemplified by carboxylic acid resins / V. S. Soldatov [et al.] // *Reactive and Functional Polymers.* – 2004. – Vol. 58, N 1. – P. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.003>
16. Szabadka, O. Studies on chelating resins. II. Determination of the protonation constants of a chelating resin containing iminodiacetic acid groups / O. Szabadka // *Talanta.* – 1982. – Vol. 29, N 3. – P. 183–187. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(82\)80092-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(82)80092-1)
17. Soldatov, V. S. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality / V. S. Soldatov, Z. I. Sosinovich, T. V. Mironova // *Reactive and Functional Polymers.* – 2004. – Vol. 58, N 1. – P. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.004>
18. Зеленковский, В. М. Компьютерное моделирование структуры полимерных ионитов: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04 / В. М. Зеленковский. – Минск, 2012.

## References

- Hering P. *Chelating ion exchangers*. Moscow, Mir Publ, 1971. 280 p. (in Russian).
- Myasoedova G. V., Savvin S. B. *Chelating Sorbents*. Moscow, Nauka Publ, 1984. 173 p. (in Russian).
- Riley J. P., Taylor D. Chelating resins for the concentration of trace elements from sea water and their analytical use in conjunction with atomic absorption spectrophotometry. *Analytica Chimica Acta*, 1968, vol. 40, pp. 479–485. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)86764-1](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)86764-1)
- Sahni S. K., Reedijk J. Coordination chemistry of chelating resins and ion exchanges. *Coordination Chemistry Reviews*, 1984, vol. 59, pp. 1–139. [https://doi.org/10.1016/0010-8545\(84\)85053-5](https://doi.org/10.1016/0010-8545(84)85053-5)
- Bonn G., Reiffenstahl S., Jandik P. Ion chromatography of transition metals on an iminodiacetic acid bonded stationary phase. *Journal of Chromatography A*, 2001, vol. 499, pp. 669–676. [https://doi.org/10.1016/s0021-9673\(00\)97011-0](https://doi.org/10.1016/s0021-9673(00)97011-0)
- Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Sergeev G. I. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers. *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, 1988, vol. 7, no. 2-3, pp. 159–172. [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(88\)90136-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(88)90136-5)
- Kosandrovich E. G., Soldatov V. S. Fibrous ion exchangers. *Ion exchange technology I: theory and materials*. London, 2012, pp. 299–371. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1700-8_9)
- Soldatov V. S., Shunkevich A. A., Elinson I. S., Johann J., Iraushek H. Chemically active textile materials as efficient means for water purification. *Desalination*, 1999, vol. 124, no. 1–3, pp. 181–192. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(99\)00103-4](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(99)00103-4)
- Soldatov V. S., Zelenkovskii V. M., Orlovskaya L. A. Sorption of bivalent ions by a fibrous chelating ion exchanger and the structure of sorption complexes. *Reactive and Functional Polymers*, 2011, vol. 71, no. 1, pp. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2010.11.003>
- Orlovskaya L. A. Sorption preconcentration of heavy metal ions in the atomic absorption analysis of background contents in drinking water. *Problemy inzhenerii srodoviska. Material XXII Miedzynar. Sympoz. AQUA-2003*. Plock, 2007, pp. 16.
- Nechitailo G. S., Mashinsky A. L. *Space Biology: Studies at Orbital Stations*. Moscow, Mir Publ, 1993. 503 p.
- Soldatov V. S., Peryshkina N. G., Horoshko R. P. *Ion Exchange Soils*. Minsk, Nauka i Tehnika Publ., 1978. 270 p. (in Russian).
- Geiger E. Yu., Varlamova L. D., Semenov V. V., Pogodina Yu. V., Sirotnina Yu. A. Chelated microfertilizers: experience and prospects of use. *Agrohimicheskii vestnik = Agrochemical Herald*, 2017, no. 2, pp. 30–32 (in Russian).
- Kosandrovich E. G., Korshunova T. A., Doroshkevich O. N., Kashinskii A. V., Shachenkova L. N., Leshkevich A. O., Zelenkovskii V. M. Chelating ion exchangers on the base of PAN fibers with aminodiacetic functional groups. *Khimiya i tekhnologiya novykh veshchestv i materialov: sb. nauch. tr.* [Chemistry and technology of new substances and materials. Collection of scientific works]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014, iss. 4, pp. 262–281 (in Russian).
- Soldatov V. S., Sosinovich Z. I., Korshunova T. A., Mironova T. V. Acid-base properties of ion exchangers. I. Optimizing of potentiometric titration of ion exchangers exemplified by carboxylic acid resins. *Reactive and Functional Polymers*, 2004, vol. 58, no. 1, pp. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.003>
- Szabadka O. Studies on chelating resins. II. Determination of the protonation constants of a chelating resin containing iminodiacetic acid groups. *Talanta*, 1982, vol. 29, no. 3, pp. 183–187. [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(82\)80092-1](https://doi.org/10.1016/0039-9140(82)80092-1)
- Soldatov V. S., Sosinovich Z. I., Mironova T. V. Acid-base properties of ion exchangers. II. Determination of the acidity parameters of ion exchangers with arbitrary functionality. *Reactive and Functional Polymers*, 2004, vol. 58, no. 1, pp. 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2003.11.004>
- Zelenkovskii V. M. *Computer modeling of structure of polymeric ion exchangers*. Minsk, 2012 (in Russian).

## Информация об авторах

Солдатов Владимир Сергеевич – академик, д-р хим. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Коршунова Татьяна Александровна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 2019Korshunova@gmail.com

Косандрович Евгений Генрихович – канд. хим. наук, доцент, зав. лаб. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by

Нестеронко Петр Викторович – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: petr.nester@gmail.com

## Information about the authors

Vladimir S. Soldatov – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Chief Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soldatov@ifoch.bas-net.by

Tatyana A. Korshunova – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 2019Korshunova@gmail.com

Evgenii G. Kosandrovich – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kosandrovich@ifoch.bas-net.by

Petr V. Nesteronok – Ph. D. (Chemistry), Senior Researcher. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: petr.nester@gmail.com