



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.543

doi: 10.17308/sorpchrom.2024.24/12519

### **Оценка некоторых физико-химических характеристик ионообменных волокон ФИБАН А-1 и А-5 как сорбентов триптофана из водных растворов**

**Ираида Владимировна Воронюк<sup>✉</sup>, Анна Сергеевна Харламова,  
Татьяна Викторовна Елисеева**

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, i.voronyuk@yandex.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию образцов волокнистых ионообменных материалов марки ФИБАН как сорбентов из водных растворов гетероароматической аминокислоты – триптофана. Для предварительной оценки кислотно-основных свойств сорбентов ФИБАН А-1 и А-5 проведено их потенциометрическое титрование методом отдельных навесок при ионной силе раствора 0.1 М. Рассчитано общее количество ионогенных групп и количество аминогрупп, отличающихся своей основностью. Решением уравнения Гендерсона-Гассельбаха графическим способом рассчитаны кажущиеся константы основности функциональных групп исследуемых волокон.

Дана оценка возможности применения волокон ФИБАН А-5 и А-1 для извлечения из водных растворов гетероароматических аминокислот на примере β-индолиламинопропионовой кислоты (триптофана, Тр).

Отмечено, что по отношению к триптофану наиболее эффективным сорбентом является высокоосновный анионообменник ФИБАН А-1, обеспечивающий участие в поглощении аминокислоты не только функциональных групп, но и частично матрицы сорбента. Исследование количества поглощенного сорбтива при различных температурах (293 и 323 К) указывает на эндотермический характер сорбции – увеличение температуры повышает степень извлечения Тр исследуемыми волокнами.

В работе дана оценка гидратационных свойств сорбентов до и после поглощения гетероароматической аминокислоты. Отмечена дегидратация сорбентов после сорбции триптофана. Согласно анализу изотерм сорбции паров воды образцами ионообменников, данное явление связано с уменьшением количества «свободной» воды в матрице сорбента.

**Ключевые слова:** ионообменные волокна, ФИБАН, триптофан, потенциометрическое титрование ионообменников, сорбция.

**Благодарности:** работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2023-2025 годы, проект FZGU-2023-0009. Авторы выражают благодарность Поликарпову А.П. (ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ, Беларусь) за предоставленные образцы волокон марки ФИБАН. Результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <https://ckp.vsu.ru>.

**Для цитирования:** Воронюк И.В., Харламова А.С., Елисеева Т.В. Оценка некоторых физико-химических характеристик ионообменных волокон ФИБАН А-1 и А-5 как сорбентов триптофана из водных растворов // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2024. Т. 24, № 5. С. 806-813. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12519>

Original article

### **Evaluation of some physico-chemical characteristics of FIBAN A-1 and A-5 ion-exchange fibers as tryptophan sorbents from aqueous solutions**

**Iraida V. Voronyuk<sup>✉</sup>, Anna S. Kharlamova, Tatiana V. Eliseeva**

Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, i.voronyuk@yandex.ru<sup>✉</sup>



**Abstract.** The work is devoted to the study of samples of fibrous ion-exchange materials of the FIBAN brand as sorbents of the heteroaromatic amino acid tryptophan from aqueous solutions. For a preliminary assessment of the acid-base properties of the sorbents FIBAN A-1 and A-5, their potentiometric titration was carried out by the method of separate weighed portions at the ionic strength of the solution 0.1 M. The total number of ionogenic groups and the number of amino groups differing in their basicity are calculated. By solving the Henderson-Hasselbach equation, the apparent basicity constants of the functional groups of the fibers under study are calculated graphically.

The possibility of using FIBAN A-5 and A-1 fibers for the extraction of heteroaromatic amino acids from aqueous solutions is evaluated using the sample of  $\beta$ -indolylaminopropionic acid (tryptophan, Trp).

It is noted that, in relation to tryptophan, the most effective sorbent is the strong basic anion exchanger FIBAN A-1, which provides participation in the absorption of amino acids not only of functional groups, but also partially of the sorbent matrix. The study of the amount of sorbed sorbative at different temperatures (293 and 323 K) indicates an endothermic character of sorption - an increase in temperature increases the degree of Trp extraction by the studied fibers.

The paper evaluates the hydration properties of sorbents before and after sorption of a heteroaromatic amino acid. Dehydration of sorbents after tryptophan sorption was noted. According to the analysis of the isotherms of water vapor sorption by ion exchanger samples, this phenomenon is associated with a decrease in the amount of "free" water in the sorbent matrix.

**Keywords:** ion-exchange fibers, FIBAN, tryptophan, potentiometric titration of ion exchangers, sorption.

**Acknowledgments:** the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment to universities in the field of scientific activity for 2023-2025, project FZGU-2023-0009. The authors express their gratitude to A.P. Polikarpov (INSTITUTE OF PHYSICO-ORGANIC CHEMISTRY of the NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF Belarus, Belarus) for the provided fiber samples of the FIBAN brand. The research results were partially obtained on the equipment of the Center for Collective Use of Voronezh State University. URL: <https://ckp.vsu.ru>.

**For citation:** Voronyuk I.V., Kharlamova A.S., Eliseeva T.V. Evaluation of some physico-chemical characteristics of FIBAN A-1 and A-5 ion-exchange fibers as tryptophan sorbents from aqueous solutions. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2024. 24(5): 806-813. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12519>

## Введение

Известно, что сорбционные методы, предполагающие поглощение компонентов твердой фазой (сорбентом), используются для разделения, выделения и концентрирования веществ из жидких и газовых фаз. В качестве сорбентов при этом применяют различные материалы: активные угли, цеолиты, глинистые минералы, силикагель, оксид алюминия, модифицированные сорбенты на основе силикагеля и целлюлозы, синтетические неорганические и органические ионообменники [1-7].

В частности, ионообменные материалы могут решать важные практические задачи при их использовании в качестве сорбентов некоторых классов органических веществ, например, аминокислот [8-10]. Извлечение такого рода соединений сопряжено с возможностью протекания в системе ионообменник – раствор различных взаимодействий с сорбентом как непосредственно за счет ионного обмена, так и необменных реакций. Большое

число работ по исследованию особенностей сорбции аминокислот посвящено использованию гранульных ионообменников. Однако ионообменные материалы производятся и в виде волокон, в частности, волокон марок ВИОН и ФИБАН [11-13]. Цель настоящей работы – исследование некоторых физико-химических свойств волокнистых анионообменников марки ФИБАН как сорбентов триптофана.

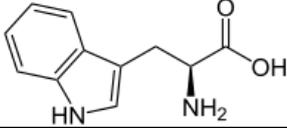
## Экспериментальная часть

В качестве сорбтива в настоящей работе использовали гетероароматическую аминокислоту триптофан –  $\beta$ -индолил-аминопропионовую кислоту (х.ч., Sigma Aldrich), основные свойства которой приведены в таблице 1.

Определение концентрации аминокислоты в растворе проводили спектрофотометрически на приборе СФ-2000 (ОКБ «Спектр», Россия) при длине волны 277 нм.

Таблица 1. Некоторые физико-химические свойства аминокислоты [14]

Table 1. Some physico-chemical properties of an amino acid [14]

Характеристики		Триптофан (Trp)
Структурная формула		
Молярная масса, г/моль		204.23
Растворимость, г/100гH <sub>2</sub> O		1.06
pI		5.89
pK	α-COOH	2.38
	α-NH <sub>2</sub>	9.49

В качестве сорбентов использовали ионообменные волокна ФИБАН А-1 и А-5 (ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ОРГАНИЧЕСКИЙ ХИМИИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ). Данные образцы представляют собой полипропиленовое и полиакрилонитрильное волокна, соответственно, с функциональными анионообменными группами. Сорбенты перед исследованием переводили в ОН-форму.

Кислотно-основные свойства исследуемых образцов ионообменников определяли с помощью потенциометрического титрования сорбентов добавлением к отдельным навескам сорбента различных объемов 0.1 М раствора соляной кислоты. Постоянную ионную силу раствора создавали добавлением 0.1 М раствора индифферентного электролита – КСl. Время установления равновесия в системе сорбент – раствор титранта (НСl) составляло 5 суток. Далее измеряли рН раствора на приборе иономер И-160МИ и строили кривые потенциометрического титрования.

Сорбцию триптофана проводили в статических условиях методом ограниченного объема при концентрации сорбтива в растворе 0.01 М при перемешивании 250 об/мин на орбитальном шейкере-инкубаторе BioSan ES-20/60 с контролем температуры ±2°C.

Изучение взаимодействия молекул воды с образцами волокон до и после сорбции триптофана проводили методом изопиестирования при температуре 298К.

Сорбенты в разных формах, высушенные до постоянной массы при 298К, приводили в контакт с парами насыщенных растворов солей K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, LiCl, NaCl, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, KCl, CaCl<sub>2</sub>, помещенных на дно эксикатора и выдерживали до достижения равновесного состояния.

### Обсуждение результатов

В ходе исследования определены кислотно-основные, гидратационные и сорбционные характеристики образцов волокон ФИБАН А-1 и А-5.

Методом кислотно-основного потенциометрического титрования получены интегральные и дифференциальные зависимости рН-V(НСl), которые позволили рассчитать суммарную обменную емкость и емкость по отдельным ионогенным группам образцов волокон. Представление полученных данных в координатах уравнения Гендерсона-Гассельбаха (1), позволило оценить кажущиеся константы основности (pK<sup>\*<sub>b</sub></sup>) функциональных групп волокнистых материалов.

$$pH = pK_b + n \lg \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (1)$$

где *n* – параметр, связанный с электростатическим взаимодействием; *α* – степень ионизации сорбента.

Результаты исследования емкостных и кислотно-основных свойств сорбентов представлены в таблице 2.

Согласно полученным данным, можно принимать, что при ионной силе раствора 0.1 М исследуемые сорбенты отличаются

Таблица 2. Емкостные и кислотно-основные характеристики волокон ФИБАН  
Table 2. Capacitive and acid-base characteristics of fibers of FIBAN

Сорбент	Вторичная аминогруппа			Третичная аминогруппа			Четвертичное аммониевое основание		
	Q, ммоль/г	$pK^*_b$	n	Q, ммоль/г	$pK^*_b$	n	Q, ммоль/г	$pK^*_b$	n
ФИБАН А-1	–	–	–	–	–	–	2.4	6.1	1.5
ФИБАН А-5	1.1	7.0	2.6	2.4	5.9	1.1	–	–	–

по своей основности незначительно и относятся к среднеосновным. В образце ФИБАН А-5 большее количество функциональных групп приходится на третичные аминогруппы и составляет от общего количества 68%.

Ввиду того, что аминокислоты способны удерживаться на гранульных ионообменниках различной основности [9, 15], вызывало интерес поведение волокнистых образцов по отношению к данным соединениям. В работе определена возможность применения волокон в качестве сорбентов для извлечения триптофана из водных растворов. Определение количества поглощенной аминокислоты для исследуемого ряда волокнистых ионообменников проводили при разных соотношениях контактирующих фаз (рис. 1) и температурах (рис. 2).

Согласно оценке количества поглощенной аминокислоты волокнами при различном объемном соотношении фаз сорбент – раствор, установлено наиболее оптимальное соотношение. Так, соотношение 1 : 300 является недостаточным для создания избыточной концентрации сорбтива в растворе, поэтому количество сорбированного триптофана ниже, чем в других условиях. Соотношение фаз Т : Ж = 1 : 400 является наиболее подходящим, обеспечивающим, с одной стороны, условие избытка аминокислоты в растворе, с другой стороны – позволяет избежать больших погрешностей при определении остаточной концентрации сорбтива в равновесном растворе.

Также отмечено, что образец ФИБАН А-1 проявляет большее сродство к триптофану, что, возможно, связано с тем, что в фазе данного сорбента протекает перезарядка аминокислоты и ее ионообменное закрепление в фазе сорбента.

Кроме того, в работе исследовано влияние температуры раствора на сорбцию триптофана анионообменными волокнами (рис. 2). Отмечено, что поглощение аминокислоты при 323К увеличивается на сорбентах ФИБАН А-1 и А-5, это свидетельствует об эндотермическом процессе поглощения сорбтива.

При этом лучшими сорбционными характеристиками относительно триптофана обладает сорбент ФИБАН А-1. Это связано не только с тем, что основным механизмом в нем можно считать ионообменный, но и с особенностями матрицы. А именно – наличие в полипропиленовом волокне сополимера стирола и дивинилбензола, что обеспечивает и необменное закрепление ароматической аминокислоты за счет стекинг-эффекта, связанного с возникновением сопряжения между бензольными кольцами сорбтива и матрицы сорбента.

Отметим, что важными свойствами ионообменников любой природы являются гидратационные, так как содержание влаги определяет набухаемость сорбента и, соответственно, пространственную доступность функциональных групп. Из литературных источников известно, что поглощение аминокислот, в особенности ароматических и гетероциклических, гранульными ионообменни-

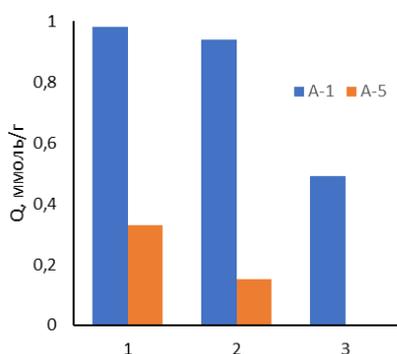


Рис. 1. Зависимость количества поглощенной аминокислоты волокном от соотношения контактирующих фаз сорбент : раствор ( $C_0=0.01M$ ): 1 – 1 : 1000; 2 – 1 : 400; 3 – 1 : 300  
 Fig. 1. Dependence of the amount of amino acid sorbed by the fiber on the ratio of the contacting phases sorbent : solution ( $C_0=0.01M$ ): 1 – 1 : 1000; 2 – 1 : 400; 3 – 1 : 300

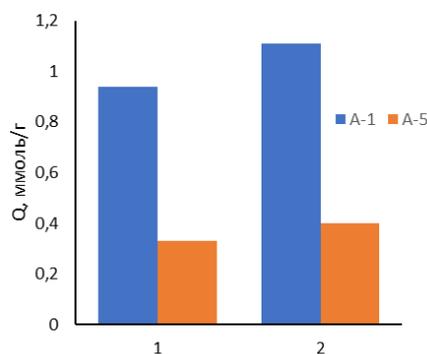


Рис. 2. Зависимость количества поглощенного сорбтива волокнами от температуры ( $C_0=0.01 M$ ): 1 – 293 К, 2 – 323 К

Fig. 2. Dependence of the amount of sorbed amino acid by the fibers on temperature ( $C_0 = 0.01 M$ ): 1 – 293 K, 2 – 323 K

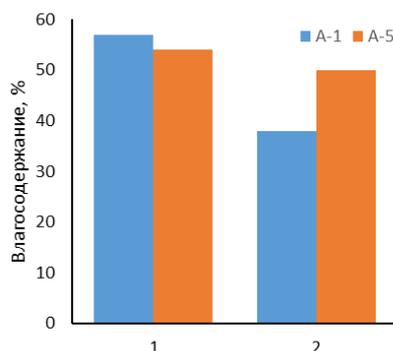


Рис. 3. Влагосодержание сорбентов марки ФИБАН в различных формах: 1 – ОН-форма; 2 – форма, насыщенная триптофаном

Fig. 3. Moisture content of FIBAN sorbents in various forms: 1 – OH-form; 2 – form saturated by tryptophan

ками и ионообменными мембранами сопровождается процессом дегидратации [16, 17]. В настоящей работе также оценено содержание растворителя в фазе сорбента до и после поглощения триптофана.

На рис. 3 представлено сравнение величин влагосодержания в сорбентах в ОН-форме и форме, насыщенной аминокислотой, полученных путем сухо-воздушной сушки образцов при температуре 323 К до постоянной массы.

Отмечено, что для волокон, насыщенных триптофаном, происходит уменьшение влагосодержания. Гидрофобность

сорбенту придает молекула гетероциклической аминокислоты. При этом снижение содержания растворителя почти на 34%, относительно ОН-формы, наиболее характерно для А-1 вследствие того, что данный сорбент больше всего поглощает триптофан из водных растворов. Для ФИБАН А-5 уменьшение влагосодержания не превышает 10% от исходного значения.

Более четкую картину процессов гидратации в сорбенте дает ее оценка по изотермам сорбции паров воды ионообменниками до и после сорбции Trp (рис. 4) при различных относительных давлениях насыщенного водяного пара.

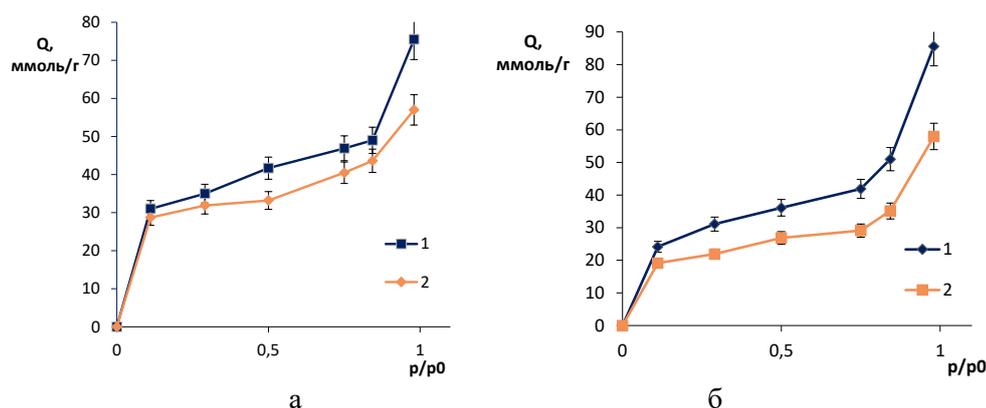


Рис. 4. Изотермы сорбции паров воды волокнами А-1 (а) и А-5 (б) в различных формах: 1 – ОН-форма; 2 – форма, насыщенная триптофаном

Fig. 4. Isotherms of water vapor sorption by fibers A-1 (a) and A-5 (b) in various forms: 1 – OH-form; 2 – form saturated by tryptophan

Известно, что по форме изопиесты можно проследить формирование в сорбенте слоя молекул «связанной» и «свободной» воды. Первое плато на полученных зависимостях указывает на сорбцию молекул растворителя, прочно связывающихся с функциональными группами ионообменника, далее идет поглощение уже менее связанной «свободной» воды.

По полученным данным можно утверждать, что после поглощения триптофана происходит дегидратация как высоко-, так и низкоосновных волокон. При этом влияние гидрофобного фрагмента аминокислоты в большей мере определяет снижение количества молекул «свободной» воды, чем «связанной».

Таким образом, как и в случае ионообменников в виде гранул и пластин (мембраны), волокна после сорбции триптофана приобретают гидрофобность, что сказывается на их гидратационных характеристиках.

### Заключение

В работе проведен анализ кислотно-основных свойств волокон марки ФИБАН. На основе данных потенциометрического титрования оценено общее количество ионогенных групп, а в сорбенте ФИБАН А-5 и количество отдельно третичных и вторичных аминогрупп, рассчитаны их кажущиеся константы основности.

Отмечено, что по отношению к триптофану наиболее эффективным сорбентом является высокоосновный анионообменник ФИБАН А-1, обеспечивающий участие в поглощении гетероароматической аминокислоты не только функциональных групп, но и частично матрицы сорбента. Это позволяет участвовать сорбтиву не только в обменном, но и не-обменном механизме поглощения.

Исследование гидратационных характеристик сорбентов до и после сорбции подтверждает, что присутствие аминокислот снижает набухаемость образцов волокон. При этом, согласно исследованию изотерм сорбции паров воды, наблюдается снижение количества «свободной» воды в структуре сорбента.

Таким образом, волокнистые материалы не уступают гранульным в эффективности при использовании в качестве сорбентов аминокислот, в частности, триптофана. Их исследование может быть перспективным для применения в биотехнологии.

### 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.

### Список литературы/References

1. Filippov O.A., Tihomirova T.I., Cizin G.I., Zolotov Ju.A. Dinamicheskoe koncentrirovaniye organicheskikh veshhestv na nepoljarnykh sorbentah. *Zhurnal analiticheskoy himii*. 2003; 58(5): 454-480. (In Russ.)
2. Zolotov Yu. A., Cizin G. I., Morosanova E. I., Dmitrienko S. G. Sorbcionnoe koncentrirovaniye mikrokomponentov dlja celej himicheskogo analiza. *Uspehi himii*. 2005; 74(1): 41-66. (In Russ.)
3. Gubin A.S., Kushnir A.A., Suhanov P.T. Sorbcionnoe koncentrirovaniye fenolov iz vodnykh sred magnitnymi molekuljarno imprintirovannymi polimerami na osnove N-vinilpirrolidona. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2021; 21(3): 326-335. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3466> (In Russ.)
4. Alieva A.F., Guseynov F.E., Afandieva N.T., Shamilov N.T., Chyragov F.M. Sorption of cerium(III) ions onto chelating polymeric sorbent. *ChemChemTech*. 2019; 62(8): 71-75. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196208.5898>
5. Temerdashev Z.A., Vinitskaya E.A., Milevskaya V.V., Statkus M.A. Preconcentration of Phenolic Compounds on Carbon Sorbents and Their Chromatographic Determination in Aqueous Extracts of Medicinal Plants. *Journal of Analytical Chemistry*. 2021; 76(3): 296-305. <https://doi.org/10.1134/S106193482103014X>
6. Bondareva L.P., Prushinskaya A.G. Concentration of anionic surfactants from aqueous solutions on sorbents of various nature. *Russian Chemical Bulletin*. 2020; 69(7): 1311-1315. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2903-7>
7. Shkutina I.V., Mironenko N.V., Selmenev V.F. Application of super-cross-linked polymers as carriers of heterogeneous biocatalysts for inulin hydrolysis reaction. *ChemChemTech*. 2022; 65(8): 48-54. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226508.6559>
8. Kharina A.Yu., Eliseeva T.V., Selmenev V.F. Mutual Effect of Mineral Salt and Amino Acid in Their Sorption by Heterogeneous Ion-Exchange Membranes. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2021; 95(10) 2118-2124. <https://doi.org/10.1134/S0036024421100125>
9. Khokhlova O.N., Khokhlov V.Yu., Lisitsyna S.A. Sorbcija aromaticeskikh aminokislot na nizkoosnovnykh anionoobmennikah v neprotonirovannoj forme. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2022; 22(1): 34-40. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9018> (In Russ.)
10. Kuvaeva Z.I., Karankevich E.G. Sorbcija dipeptidov i aminokislot ionitami. *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija himicheskikh nauk*. 2021; 57(3): 278-285. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-3-278-285> (In Russ.)
11. Grachek V.I., Shunkevich A.A., Polikarpov A.P., Isakovich O.I. Sorbcionnye svojstva novogo voloknistogo helatnogo ionita. *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija himicheskikh nauk*. 2020; 56(2): 206-211. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-2-206-211> (In Russ.)
12. Medjak G.V., Shunkevich A.A., Polikarpov A.P., Pansevich V.V., Akulich Z.I. Ocenka faktorov, vlijajushhih na sorbciju dioksida sery voloknistymi anionitami FIBAN. *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija himicheskikh nauk*. 2021; 57(1): 101-108. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-1-101-108> (In Russ.)
13. Peregudov Y.S., Bondareva L.P., Obidov B.A., Niftaliev S.I. Hydration of Carboxyl Fiber Sorbent in Different Ionic Forms. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021; 57(6): 1129-1135. <https://doi.org/10.1134/S2070205121060162>
14. PubChem National center for biotechnology information Tryptophan – URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Tryptophan> (date of application 24.05.2024).



15. Khokhlov V.Yu. Dissertacija ... doktora himicheskikh nauk: 02.00.04 – fizičeskaja himija. Voronezh, 2008. 315 p. (In Russ.)

16. Krisilova E.V. Sorbcija i gidratacija v sisteme kationoobmennaja membrana – osnovnaja aminokislota – voda : avto-ref. dis. ... kand. him. nauk / E.V. Krisilova ; Voronezh. VGU. – Voronezh, 2010. – 16 p. (In Russ.)

17. Majgurova N.I., Ressen F., Eliseeva T.V., Selemenov V.F. Sorbcija aminokisloty i izmenenie gidratacii geterogennykh kationoobmennykh i anionoobmennykh membran FUMASEP. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Serija: Himija i himicheskaja tehnologija.* 2016; 59(4): 73-77. (In Russ.)

### **Информация об авторах / Information about the authors**

**И.В. Воронюк** – к.х.н., доцент кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**А.С. Харламова** – студентка кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**Т.В. Елисеева** – к.х.н., зав. кафедрой аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**I.V. Voronyuk** – Assistant Professor, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: [i.voronyuk@yandex.ru](mailto:i.voronyuk@yandex.ru)

**A.S. Kharlamova** – student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia

**T.V. Eliseeva** – Head of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: [tatyanaeliseeva@yandex.ru](mailto:tatyanaeliseeva@yandex.ru)

*Статья поступила в редакцию 20.08.2024; одобрена после рецензирования 18.09.2024; принята к публикации 02.10.2024.*

*The article was submitted 20.08.2024; approved after reviewing 18.09.2024; accepted for publication 02.10.2024.*