

УДК 662.71

СРАВНЕНИЕ АДСОРБЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДШЕСТВЕННИКОВ

© А.А. Спицын¹, М.И. Минич¹, Д.А. Пономарев^{1*}, Н.И. Богданович²

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5У, Санкт-Петербург, 194021 (Россия), e-mail: dponomarev1@mail.ru

² Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, Архангельск, 163002 (Россия)

Изучена сорбционная способность активированного угля, полученного из различных растительных предшественников – древесины яблони, древесины березы, сосновых шишек и целлюлогина. Растительный материал был сначала подвергнут карбонизации нагреванием до температуры 700 °С и дальнейшей выдержке при этой температуре. Общее время нагрева составляло 8 ч. Уголь-сырец затем подвергали активацией водяным паром, при температуре реактора 950 °С и времени активации 40–45 мин. Выход активированного угля, считая на уголь-сырец, составил 42–46%. Методом низкотемпературной адсорбции азота определены характеристики пористой структуры. Суммарная удельная поверхность по методу ВЕТ составила (м²/г) 674, 594, 552, 552, 622 для древесины яблони, древесины березы, сосновых шишек, целлюлогина и промышленного образца активированного угля соответственно. Определение адсорбционной способности методами адсорбции иода показало, что эта величина в зависимости от источника сырья падает в ряду древесина березы > целлюлогин ≈ древесина яблони > сосновые шишки. Данные по сорбции бензола характеризуют примерно такой же ряд уменьшения сорбционной способности: древесина березы > целлюлогин > сосновые шишки ≈ древесина яблони. Данные по сорбционной способности показывают, что нетрадиционное растительное сырье вполне может быть использовано для получения активированного угля.

Ключевые слова: активированный уголь, сорбционная способность, растительные отходы.

Введение

Потребность в расширении сырьевой базы для получения углеродных наноструктурированных материалов и, прежде всего, активированных углей вызывает необходимость поиска новых источников растительного сырья. Растительная ткань, обладающая уникальной морфологической структурой, может после соответствующей обработки служить в последующем материалом для различных применений, среди которых следует отметить водоподготовку и очистку различных сточных вод. Необходимость получения биоуглерода с самыми различными структурными характеристиками для применения, например, в медицине или энергоаккумулирующих [1, 2] устройствах побуждает использовать в качестве исходного такое, на первый взгляд необычное, сырье как, например, скорлупа различных орехов или рисовая шелуха [3–10]. Рассмотрение разнообразных источников сырья для получения биоуглерода подробно изложено в монографиях [11, 12] и обзорных публикациях [13–16].

Использование для получения активированного угля других, отличных от традиционной древесины, растительных материалов преследует две цели. Во-первых, это получение угля со специфическими, необ-

Спицын Андрей Александрович – доцент,
e-mail: spitsyn.andrey@gmail.com

Минич Мария Игоревна – магистрант,
e-mail: vampiresuperman@gmail.com

Пonomарев Дмитрий Андреевич – профессор кафедры химии, e-mail: dponomarev1@mail.ru

Богданович Николай Иванович – профессор,
e-mail: n.bagdaovich@narfu.ru

ходимыми для конкретной задачи, свойствами, в том числе и структурой. Во-вторых, это повышение ценности различных отходов сельского хозяйства, а также лесной и деревообрабатывающей промышленности путем превращения их в различные сорбенты. Все эти направления в настоящее время успешно развиваются.

* Автор, с которым следует вести переписку.

С целью изучения возможности расширения сырьевой базы производства активированного угля нам представлялось интересным получить такой уголь из древесины яблони, сосновых шишек и целлюлогина. Для сравнения нами для карбонизации и последующей активации была взята древесина березы.

Необходимо отметить, что во многих случаях получение угля-сырца и его последующую активацию предполагается выполнять на небольших по производительности установках, расположенных поблизости от мест образования растительных отходов. В этом случае для характеристики полученного продукта возникает необходимость использования простых доступных методов, не требующих сложной приборной базы. К таким аналитическим методам можно отнести методы, основанные на сорбции иода, красителя метиленового голубого или бензола. Имеющиеся в нашем распоряжении образцы активированного угля различного происхождения позволяли выполнить определение их адсорбционной способности различными методами и выявить, если она имеется, корреляцию полученных значений.

Экспериментальная часть

Древесина яблони и березы была разрезана на куски, целлюлогин использовался в виде гранул, сосновые шишки использовались без предварительного измельчения. Под целлюлогином в нашем случае понимается остаток, полученный при гемицеллюлозном гидролизе древесины березы серной кислотой ультранизкой концентрацией (0.15%) при температуре 170 °С в течение 1 ч, гидромодуль 5. Для всех образцов по методике [17] была определена влажность (табл. 1). Для сравнения были определены структурные характеристики промышленного образца активированного угля БАУ-А.

Для получения угля-сырца куски исходного материала подвергали медленному пиролизу на стенде периодического действия. Время нагрева до температуры 700 °С и последующей выдержки составляло 8 ч. Затем содержимое реактора охлаждали в атмосфере газов пиролиза и определяли выход угля-сырца, который для древесины яблони, древесины березы, сосновых шишек и целлюлогина составил 26, 25, 33 и 32% соответственно. Дальнейшую активацию навески угля-сырца массой 0.3 г производили во вращающемся трубчатом реакторе, в который подавали водяной пар, при температуре с внешней стороны трубчатого реактора – 970 °С. Время активации изменялось от 15 до 40 мин для того, чтобы достигнуть для всех образцов одинакового выхода активированного угля, который характеризовался степенью обгара (табл. 2). По окончании активации подачу пара прекращали. После полного охлаждения реактора активированный уголь взвешивали и определяли потерю массы при активации (степень обгара). Процесс активации повторяли для получения необходимого количества активированного угля. Описание конструкции стенда для пиролиза и установки для активации угля-сырца приведено в работе [18].

Общая площадь поверхности и объем пор образцов найдены измерением адсорбции азота при 77 К на автоматизированной системе ASAP-2020 («Micrometrics»). Для определения удельной площади поверхности $S_{\text{ВЕТ}}$ использована модель Браунауэра-Эмета-Теллера (ВЕТ). Объем ($V_{\text{пор}}$, см³/г) и диаметр ($D_{\text{пор}}$, нм) пор образцов вычислены методами соответственно Баррета-Джойнера-Халенда (ВЖН) и t-анализа.

Определение адсорбционной активности образцов активированного угля по иоду (иодное число) было проведено в соответствии с ГОСТ 6217-74. Ранее эта методика была описана в нашей публикации [18]. Для определения сорбционной способности методом сорбции бензола мы использовали эксикаторный метод [19]. В предварительно высушенный и взвешенный бюкс помещают навеску угля около 0.6 г, взвешенную с точностью до 0.0002 г. Бюкс с открытой крышкой ставят в эксикатор, частично заполненный бензолом. Взвешивание бюкса периодически проводят через 24 ч от начала эксперимента. Процедуру повторяют до прекращения увеличения массы бюкса. Равновесную величину сорбции паров бензола рассчитывают, как отношение привеса к исходной навеске угля.

Результаты исследования и их обсуждение

Для активированных углей были определены изотермы низкотемпературной сорбции-десорбции азота, которые согласно классификации IUPAC можно отнести к изотерме типа I [20], что указывает на микропористую структуру полученных материалов.

В таблицах 3 и 4 приведены характеристики пористости и объем пор полученных активированных углей, под мезопорами понимались поры размером 1.7–50 нм.

Таблица 1. Физико-химические характеристики используемого растительного сырья

Параметр	Древесина яблони	Древесина березы	Сосновые шишки	Целлолигнин
Размеры, мм	20×10×5	70×15×3	15–35	5×5×5
Влажность, %	7.1	9.2	11.2	8.1

Таблица 2. Результаты активации образцов угля-сырца из различного растительного сырья

Исходный материал	Время активации, мин	Степень обгара, %
Древесина березы	45	44
Древесина яблони	15	46
Сосновые шишки	40	42
Целлолигнин	40	44

Таблица 3. Характеристики пористости и удельной поверхности полученных активированных углей (в скобках указаны методы измерения)

Исходный материал	Средняя ширина микропор (Хорват-Кавазое), нм	Средняя ширина мезопор (ВЕТ), нм	Суммарная удельная поверхность (ВЕТ), м ² /г	Удельная поверхность мезопор (ВН), м ² /г
Древесина березы	1.150	2.58	674	147
Древесина яблони	1.150	2.62	594	128
Сосновые шишки	1.128	2.55	552	82.6
Целлолигнин	1.166	2.55	552	87.0
Промышленный образец БАУ-А	1.147	2.69	622	111

Таблица 4. Объем пор полученных активированных углей

Исходный материал	Объем микропор, см ³ /г			Объем мезопор (ВН), см ³ /г	Суммарный объем пор (ВЕТ), см ³ /г
	Хорват-Кавазое	Дубинин-Радужкевич	t-анализ		
Древесина березы	0.308	0.300	0.219	0.141	0.434
Древесина яблони	0.269	0.262	0.185	0.130	0.389
Сосновые шишки	0.259	0.262	0.207	0.096	0.352
Целлолигнин	0.260	0.253	0.210	0.101	0.351
Промышленный образец БАУ-А	0.297	0.291	0.249	0.138	0.419

Из рассмотрения данных по удельной поверхности полученных углей (табл. 3) видно, что уголь из таких материалов как древесина яблони, сосновые шишки и целлолигнин по своим показателям несколько уступает древесине березы и углю БАУ-А, однако имеет характеристики, вполне достаточные для его практического применения, например, для очистки воды. Суммарная удельная поверхность полученных углей в зависимости от исходного сырья падает в ряду: древесина березы > БАУ-А > древесина яблони > сосновые шишки ≈ целлолигнин. Полученный из древесины березы уголь по своим характеристикам близок к углю БАУ-А, однако имеет значительно более высокую удельную поверхность мезопор (147 и 111 м²/г соответственно). С увеличением площади мезопор связано и увеличение суммарной удельной поверхности (674 и 622 м²/г соответственно).

Рассмотрение данных по ширине микро- и мезопор показывает, что независимо от источника происхождения материала эти величины практически одинаковы и изменяются в пределах 0.128–0.166 нм для микропор и 2.55–2.62 нм для мезопор.

Сорбционная емкость активированного угля из различных растительных материалов, полученная методами сорбции иода и бензола, показана в таблицах 5 и 6.

Данные таблицы 5 показывают, что все полученные сорбенты, кроме сосновых шишек, обладают хорошими показателями сорбции иода, которые близки соответствующему показателю для выпускаемого промышленностью угля БАУ-А. Сорбционная способность углей в зависимости от источника сырья падает в ряду древесина березы > целлолигнин ≈ древесина яблони > сосновые шишки.

Полученные данные по сорбции бензола (табл. 6) характеризуют примерно такой же ряд уменьшения сорбционной способности в зависимости от использованного растительного материала: древесина березы > целлолигнин > сосновые шишки ≈ древесина яблони.

Таблица 5. Определение сорбционной способности полученных углеродных сорбентов методом сорбции иода

Исходный материал	Иодное число, %	Исходный материал	Иодное число, %
Древесина березы	68	Целлолигин	61
Древесина яблони	59	Промышленный образец БАУ-А	71
Сосновые шишки	37		

Таблица 6. Определение сорбционной способности полученных углеродных сорбентов методом сорбции бензола

Исходный материал	Сорбция бензола, %	Исходный материал	Сорбция бензола, %
Древесина березы	32	Сосновые шишки	24
Древесина яблони	23	Целлолигин	27

Анализ наших результатов позволяет сказать, что, независимо от методов оценки сорбционной способности полученных активированных углей, во всех случаях древесина березы демонстрирует наилучшие результаты. Древесина яблони, сосновые шишки и целлолигин также представляют ценность как сырье для получения углеродных адсорбентов из различных растительных материалов, для которых выполнена оценка сорбционной способности. Однако необходимо иметь в виду, что неизбежные колебания в степени обгара при получении активированного угля (табл. 2) обязательно должны сказываться на величинах определяемых для этих углей сорбционной способности [12]. По нашему мнению, для более объективной оценки возможности использования нетрадиционного сырья следует изучить зависимость сорбционной способности от степени обгара при активации и затем уже сопоставлять эти зависимости для разных исходных растительных материалов.

Выводы

Активацией водяным паром угля-сырца из различных растительных материалов – древесины березы, древесины яблони, сосновых шишек и целлолигина получен активированный уголь, для которого различными способами определены сорбционные характеристики, объем микропор, характеристики пористой структуры, удельная площадь поверхности. Показано, что во всех случаях полученный материал обладает удовлетворительными сорбционными свойствами и может найти практическое применение. Активированный уголь из древесины березы во всех случаях демонстрирует наилучшие результаты сорбционной способности, в то время как древесина яблони, сосновые шишки и целлолигин дают уголь с близкими сорбционными свойствами. Наблюдаемые между ними небольшие различия могут быть вызваны разной степенью обгара в процессе активации. Сравнение сорбционных свойств активированного угля из различных предшественников не позволило выявить корреляцию между значениями, полученными методом адсорбции иода и методом адсорбции бензола.

Список литературы

1. Zhao W., Luo L., Wang H., Fan M. Synthesis of Bamboo-Based Activated Carbons with Super-High Specific Surface Area for Hydrogen Storage // *BioResources*. 2017. Vol. 12. N1. Pp. 1246–1262. DOI: 10.15376/biores.12.1.1246-1262.
2. Chen Y., Liu D., Shen Z., Bao B., Zhao S., Wu L. Functional Biomass Carbons with Hierarchical Porous Structure for Supercapacitor Electrode Materials // *Electrochimica Acta*. 2015. Vol. 180. Pp. 241–251. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.08.133.
3. Амерханова Ш., Уали А., Жаслан Р. Изучение свойств активных углей, полученных из сухих шишек сосны обыкновенной // *Химия растительного сырья*. 2015. №1. С. 205–209. DOI: 10.14258/jcprm.201501302.
4. Zhao S., Chen L. Utilization of biomass waste for activated carbon production by steam gasification in a rotary reactor: experimental and theoretical approach // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. Pp. 1–11. DOI: 10.1007/s13399-020-00921-9.
5. Abe I., Fukuhara T., Iwasaki S., Yasuda K., Nakagawa K., Iwata Y., Kominami H., Kera Y. Development of a high density carbonaceous adsorbent from compressed wood // *Carbon*. 2001. Vol. 39. Pp. 1485–1490. DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00273-6.
6. Tay T., Ucar S., Karagöz S. Preparation and characterization of activated carbon from waste biomass // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 165. Pp. 481–485. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.011.
7. Bouchelta C., Medjram M.S., Bertrand O., Bellat J.-P. Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2008. Vol. 82. Pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.jaap.2007.12.009.

8. Ahmad A., Loh M., Aziz J. Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on methylene blue adsorption // *Dyes and pigments*. 2007. Vol. 75. Pp. 263–272. DOI: 10.1016/j.dyepig.2006.05.034.
9. Rugayah A., Astimar A., Norzita N. Preparation and characterization of activated carbon from palm kernel shell by physical activation with steam // *Journal of Oil Palm Research*. 2014. Vol. 26. Pp. 251–264.
10. Zhang Y.-J., Xing Z.-J., Duan Z.-K., Li M., Wang Y. Effects of steam activation on the pore structure and surface chemistry of activated carbon derived from bamboo waste // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 315. Pp. 279–286. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.07.126.
11. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клушин В.Н. Активные угли России. М., 2000. 352 с.
12. Marsh H., Rodriguez-Reinoso. *Activated Carbon*. 2006. 536 p.
13. Burakov A.E., Galunin E.V., Burakova I.V., Kucheriva A.E., Agarwal S., Tkachev A.G., Gupta V. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purpose: A review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018. Vol. 148. Pp. 702–712. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034.
14. Yahya M.A., Al-Qodah Z., Zanariah Ngah C.W. Agricultural bio-waste as potential sustainable precursors used for activated carbon production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 46. Pp. 218–235. DOI:10.1016/j.rser.2015.02.051.
15. Qiao Y., He C., Zhang C., Yi K., Li F. Comparison of Adsorption of Biochar from Agricultural Wastes on Methylene Blue and Pb²⁺ // *Bioresources*. 2019. Vol. 14. N4. Pp. 9765–9780. DOI: 10.15376/biores.14.4.9766-9780.
16. Nanda S., Dalai A.K., Berruti F., Kozinski J.A. Biochar as an Exceptional Bioresource for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials // *Waste Biomass Valor*. 2016. Vol. 7. N2. Pp. 201–235. DOI: 10.1007/s12649-015-9459-z.
17. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М., 1991. 320 с.
18. Чу К.Н., Спицын А.А., Романенко К.А., Пономарев Д.А. Парогазовая активация древесного угля из бамбука // *Лесной журнал*. 2018. №4. С. 140–149. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140.
19. Белецкая М.Г. Синтез углеродных сорбентов методом термохимической активации гидролизного лигнина с использованием гидроксида натрия: дисс. ... канд. хим. наук. Архангельск, 2014. 153 с.
20. Sing K.S.W. Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of the Surface Area and Porosity (Recommendations 1984) // *Pure and Applied Chemistry*. 1985. Vol. 57. N4. Pp. 603–619.

Поступила в редакцию 1 марта 2021 г.

После переработки 18 сентября 2021 г.

Принята к публикации 30 сентября 2021 г.

Для цитирования: Спицын А.А., Минич М.И., Пономарев Д.А., Богданович Н.И. Сравнение адсорбционной способности углеродных сорбентов из различных растительных предшественников // *Химия растительного сырья*. 2021. №4. С. 345–350. DOI: 10.14258/jcrpm.2021049250.

Spitsyn A.A.¹, Minich M.I.¹, Ponomarev D.A.^{1*}, Bogdanovich N.I.² COMPARISON OF THE ADSORPTION CAPACITY OF CARBON SORBENTS FROM DIFFERENT PLANT PRECURSORS

¹ Saint Petersburg State Forestry University named after CM. Kirov, Institutskiy per., 5U, St. Petersburg, 194021 (Russia), e-mail: dponomarev1@mail.ru

² Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnoy Dviny, 17, Arkhangel'sk, 163002 (Russia)

The sorption capacity of activated carbon obtained from various plant precursors – apple wood, birch wood, pine cones and cellulignin was studied. The plant material was first subjected to carbonation by heating to a temperature of 700 °C and further exposure at this temperature. The total heating time was 8 hours. Charcoal was then subjected to steam activation at a reactor temperature of 950 °C and an activation time of 40–45 minutes. The yield of activated carbon estimated on charcoal was 42–46%. The characteristics of the porous structure were determined by the method of low-temperature nitrogen adsorption. The total specific surface area according to the BET method was (m²/g) 674, 594, 552, 552, 622 for apple wood, birch wood, pine cones, cellulignin and an industrial sample of activated carbon, respectively. Determination of the adsorption capacity by iodine adsorption methods showed that this value, depending on the source of raw materials, falls in the order: birch wood > cellulignin ≈ apple wood > pine cones. The data on the sorption of benzene characterize approximately the same range of sorption capacity: birch wood > cellulignin > pine cones ≈ apple wood. The data on the sorption capacity show that unconventional plant raw materials can be used to produce activated carbon.

Keywords: activated carbon, sorption capacity, plant wastes.

References

- Zhao W., Luo L., Wang H., Fan M. *BioResources*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 1246–1262. DOI: 10.15376/biores.12.1.1246-1262.
- Chen Y., Liu D., Shen Z., Bao B., Zhao S., Wu L. *Electrochimica Acta*, 2015, vol. 180, pp. 241–251. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.08.133.
- Amerkhanova Sh., Uali A., Zhaslan R. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 1, pp. 205–209. DOI: 10.14258/jcprm.201501302. (in Russ.).
- Zhao S., Chen L. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s13399-020-00921-9.
- Abe I., Fukuhara T., Iwasaki S., Yasuda K., Nakagawa K., Iwata Y., Kominami H., Kera Y. *Carbon*, 2001, vol. 39, pp. 1485–1490. DOI: 10.1016/S0008-6223(00)00273-6.
- Tay T., Ucar S., Karagöz S. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 165, pp. 481–485. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.011.
- Bouchelta C., Medjram M.S., Bertrand O., Bellat J.-P. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008, vol. 82, pp. 70–77. DOI: 10.1016/j.jaap.2007.12.009.
- Ahmad A., Loh M., Aziz J. *Dyes and pigments*, 2007, vol. 75, pp. 263–272. DOI: 10.1016/j.dyepig.2006.05.034.
- Rugayah A., Astimar A., Norzita N. *Journal of Oil Palm Research*, 2014, vol. 26, pp. 251–264.
- Zhang Y.-J., Xing Z.-J., Duan Z.-K., Li M., Wang Y. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 315, pp. 279–286. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.07.126.
- Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. *Aktivnyye ugli Rossii*. [Active coals of Russia]. Moscow, 2000, 352 p. (in Russ.).
- Marsh H., Rodriguez-Reinoso. *Activated Carbon*, 2006, 536 p.
- Burakov A.E., Galunin E.V., Burakova I.V., Kucheriva A.E., Agarwal S., Tkachev A.G., Gupta V. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, vol. 148, pp. 702–712. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.11.034.
- Yahya M.A., Al-Qodah Z., Zanariah Ngah C.W. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 46, pp. 218–235. DOI: 10.1016/j.rser.2015.02.051.
- Qiao Y., He C., Zhang C., Yi K., Li F. *Bioresources*, 2019, vol. 14, no. 4, pp. 9765–9780. DOI: 10.15376/biores.14.4.9766-9780.
- Nanda S., Dalai A.K., Berruti F., Kozinski J.A. *Waste Biomass Valor*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 201–235. DOI: 10.1007/s12649-015-9459-z.
- Obolenskaya A.V., Yel'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow, 1991, 320 p. (in Russ.).
- Chu K.N., Spitsyn A.A., Romanenko K.A., Ponomarev D.A. *Lesnoy zhurnal*, 2018, no. 4, pp. 140–149. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.4.140. (in Russ.).
- Beletskaya M.G. *Sintez uglirodnykh sorbentov metodom termokhimicheskoy aktivatsii gidroliznogo lignina s ispol'zovaniyem gidroksida natriya: diss. ... kand. khim. nauk*. [Synthesis of carbon sorbents by thermochemical activation of hydrolysis lignin using sodium hydroxide: diss. ... Cand. chem. sciences]. Arkhangel'sk, 2014, 153 p. (in Russ.).
- Sing K.S.W. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, vol. 57, no. 4, pp. 603–619.

Received March 1, 2021

Revised September 18, 2021

Accepted September 30, 2021

For citing: Spitsyn A.A., Minich M.I., Ponomarev D.A., Bogdanovich N.I. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 4, pp. 345–350. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021049250.

* Corresponding author.